

## Idrodinamica indotta sulla costa da un *artificial surfing reef* ed ipotesi di progetto a Cattolica (RN)

Mirko Castagnetti<sup>1</sup>, Barbara Zanuttigh<sup>1</sup> e Stefano Bagli<sup>2</sup>

<sup>1</sup>DICAM, Università di Bologna, Viale Risorgimento, 2 - 40136 Bologna,  
mirko.castagnetti2@unibo.it, barbara.zanuttigh@unibo.it

<sup>2</sup>GECOSISTEMA Viale Carducci, 15 - 47023 Cesena. Tel.: 0547 22619 ,  
stefano.bagli@gecosistema.it

### Riassunto

Un *artificial surfing reef* (di seguito ASR) è un'opera multifunzionale che ha come obiettivo principale la riproduzione di condizioni idrodinamiche ideali per eseguire il *surfe* contemporaneamente può servire come opera di difesa dall'erosione della spiaggia per effetto dello smorzamento dell'energia ondosa incidente. Quest'articolo evidenzia i parametri idrodinamici fondamentali per rendere un paraggio fruibile dai surfisti, analizza gli effetti di un ASR sul litorale, definisce i criteri di progettazione di ASR, sulla base di studi pregressi e applica infine tali criteri progettuali ad un caso pratico sulle coste emiliano - romagnole, nella provincia di Rimini laddove il fiume Conca sfocia in Adriatico. Per questa applicazione si considerano più alternative progettuali, tra le quali si effettua la scelta sulla base dell'analisi dei costi di costruzione e posa e si verifica quindi il funzionamento della soluzione prescelta mediante il codice MIKE21.

**Parole chiave:** Artificial Surfing Reef, peel angle, rip-channel, MIKE21, Cattolica.

### Abstract

*A multipurpose artificial surfing reef (ASR) has the main objective of generating ideal hydrodynamic conditions for surf whereas defending at the same time the coast from erosion caused by incident wave energy. This article highlights the basic hydrodynamic parameters necessary for making the beach appropriate to be used and enjoyed by surfers, analyses the effects of ASR on the coast, sets criteria for ASR design based on previous studies, and applies those criteria to design a real case of study on the Emilia – Romagna coast (Rimini province, where Conca river flows into the Adriatic Sea). For this application some design alternatives shall be considered, including a cost analysis based on construction and installation costs. The preferred solution shall be verified through by a numerical code such as MIKE21.*

**Keywords:** Artificial Surfing Reef, peel angle, rip-channel, MIKE21, Cattolica.

### Introduzione

Un *artificial surfing reef* (ASR) è un'opera marittima che combina difesa costiera e sviluppo della pratica del *surf*. Favorendo la frequentazione da parte dei *surfers*, un'opera di questo genere può "ripagare" automaticamente negli anni l'esborso iniziale mediante la promozione di un circuito turistico che si basa su questo spettacolare sport (Black e Mead, 2001).

Al contempo, con la sua capacità di smorzare il moto ondoso incidente, un ASR può essere usato a protezione

della spiaggia quale opera a cresta bassa. In generale, tale affermazione è vera se, allo studio della trasmissione ondosa, viene affiancata la valutazione dell'idrodinamica e della morfodinamica indotta sul litorale. Infatti, il coefficiente di trasmissione per opere a cresta bassa dipende essenzialmente dalla quota e dalla larghezza della cresta (Pilarczyk, 2003) ma questo da solo non basta a giustificare la sua effettiva funzionalità per quanto attiene alla difesa della costa dall'erosione. Lo studio dell'idrodinamica del *reef* e dell'alterazione del trasporto solido possono fornire importanti indicazioni circa l'evoluzione della costa a seguito della costruzione dell'opera, specialmente per quanto riguarda la formazione di correnti di ritorno che, com'è noto, possono creare non pochi problemi per l'erosione (Zanuttigh, 2006).

Inoltre, come per qualsiasi opera marittima, la forma, la posizione rispetto alla linea di riva ed il materiale con cui è fatto un ASR devono essere scelti in modo da limitare sgradevoli effetti sull'ecosistema della costa, in particolare modo nei riguardi delle diverse specie che vivono in tale sito.

Molti materiali presenti sul mercato attualmente permettono di limitare i danni dovuti alla sostituzione di un fondale soffice, come quello sabbioso, con uno più duro e roccioso, come per esempio avviene con la costruzione di scogliere parallele a riva. I geocontenitori e i geosacchi appartengono certamente a questa categoria di materiali (Matteotti et al., 2006) e possono essere usati a pieno titolo per la costruzione di un ASR. Alcuni progetti sono stati realizzati nell'ultimo decennio lungo le coste australiane, americane, neozelandesi ed inglesi, ed alcuni esempi di seguito riportati mostrano come la scelta oculata del materiale da costruzione possa rendere queste opere meno impattanti dal punto di vista ambientale.

Il *reef* di Narrowneck (Fig.1), realizzato in sacchi di sabbia, è forse l'esempio progettuale meglio riuscito, poiché ha presentato negli anni una modesta necessità di manutenzione a fronte di benefici riguardanti la difesa della costa, l'implementazione di un eco-turismo imperniato sulla pratica del *surf* ed uno sviluppo di biodiversità che ha portato alla rapida colonizzazione del *reef* e quindi al suo inserimento all'interno dell'ecosistema marino autoctono. L'impiego di un ASR sulla Gold Coast in luogo alle tradizionali opere di difesa ha permesso di:

- ridurre la volumetria di circa la metà rispetto alla stessa opera costruita in massi;
- impiegare sabbia autoctona ed eliminare il rischio di contaminazione per rottura del geosacchetto;
- ridurre la durezza del fondale, e quindi aumentare il livello di sicurezza sia per i surfisti che possono cadere dalla tavola, sia per le piccole imbarcazioni turistiche che, trovandosi nelle vicinanze, possono urtare il proprio scafo contro l'opera;
- permettere l'impianto stabile di fauna e flora marina.

L'ASR, di dimensioni indicativamente 270 m per 170 m paralleli alla costa e del volume di 120.000 m<sup>3</sup>, era composto inizialmente da 408 *geocontainers* lunghi 20 m cadauno e di 3.0 – 4.5 m di diametro, riempiti di sabbia del luogo per una capacità che varia tra 100 e 300 m<sup>3</sup>; l'opera presentava valori di sommergezza compresi tra -1.5 m (sulla cresta) e -10 m (ai piedi del *reef*, lato mare) in condizioni di bassa marea. Il *reef* è formato da due bracci disposti a "V" ed un canale centrale che assicura moderate correnti di ritorno verso largo a seguito del frangimento, che possono essere sfruttate dal surfista per raggiungere la zona di *take off*. Uno dei due bracci (nella fattispecie, quello Nord) è prolungato fino a riva e funge da pennello sommerso per ostacolare il trasporto litoraneo, permettendo l'accumulo di sabbia. Il punto di forza di questa struttura risiede nella modesta manutenzione richiesta dall'opera in termini di ricarica di geotubi (ricarica cumulata di 50 geotubi in sei anni).

L'obiettivo principale dal punto di vista della difesa costiera era evitare la dispersione della sabbia impiegata nei ripascimenti periodici, allargando la spiaggia e rinforzando il cordone dunare presente. Tale scopo è stato conseguito con un avanzamento verso il mare della linea di riva di circa 50 m, permettendo di intrappolare oltre 100.000 m<sup>3</sup> all'anno di sabbia mediante la formazione di un saliente (Jackson et al., 2007). L'allargamento della spiaggia ha certamente incrementato il numero di bagnanti e surfisti, che già peraltro affollavano le coste australiane, rendendo più appetibile la spiaggia dal punto di vista ricreativo. Il secondo (ma non meno importante) obiettivo era quello di migliorare i parametri di surfabilità del paraggio. Dopo circa otto anni di monitoraggio (Jackson et al., 2007) si registra una frequenza annua con cui si sono venute a creare onde ideali per il *surf* in media pari al 50% (vale a dire quasi 184 giorni l'anno), con massimi del 62% (nel 2002) e minimi del 21% (nel 1999, quando però l'opera era ancora in fase di costruzione). La tipologia di frangenti che si presentano per onde medie che vanno da 1.0 m a 1.5 m d'altezza è più *spilling* che *plunging* (favorendo i surfisti meno esperti). Per mareggiate di media ed elevata intensità ( $H_s > 2$  m), il frangente diventa decisamente

*plunging*. L'impiego di pietrame nella costruzione di opere di difesa poteva inoltre rappresentare un deterrente per i numerosi surfisti che tutto l'anno affollavano lo *spot* (cioè il luogo deputato alla pratica del *surf*). Terzo, ma non ultimo, obiettivo da conseguire era la creazione di un habitat colonizzabile dalle variegatae forme di vita acquatica. I progettisti ed i biologi si attendevano una colonizzazione abbastanza vasta da parte della fauna marina (pesci, granchi, mitili, ecc.) mentre fu del tutto inaspettata una massiva adesione alle porose fibre del geotessile da parte della flora, specie in acque basse: questo sviluppo fu così rapido che dopo una sola settimana fu chiaramente visibile un biofilm algale di 50 mm che ricopriva parte della superficie dei geocententori mentre, dopo 2-3 settimane, l'intero reef era completamente coperto. Contestualmente a questo processo, si è affermata la presenza di una vasta varietà di pesci e di creature sottomarine. La colonizzazione da parte delle microalghe è comunque quella più massiccia sull'opera e ricopre circa il 70% della superficie disponibile del reef (Jackson et al., 2007).

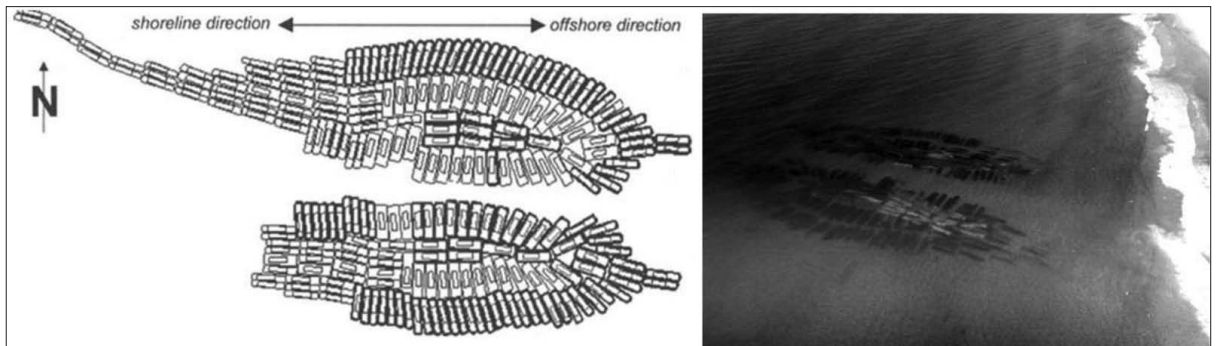


Figura 1 - A sinistra, geometria del reef di Narrowneck (Heerten et al., 2000), mentre a destra una foto dall'alto dello stesso reef.

L'ASR di Cable Station (Fig. 2) fu costruito a scopo essenzialmente ricreativo. Il progetto originale, partito già nel 1988, intendeva rendere tale *spot* il più surfabile tra tutti quelli dell'area metropolitana di Perth. Tuttavia, la costruzione del reef in massi ebbe inizio nel 1997 e fu completata solo nel 1999. A causa di alcune scogliere naturali poste a largo, nonché per la presenza dell'isola di Rottnest, una notevole quantità di energia ondosa incidente viene dissipata. Questa dissipazione si ripercuote specialmente nella riduzione dell'altezza d'onda e nella manifestazione di frangenti talora tendenti al *surging* (del tutto inadatti al *surf*). La costruzione dell'ASR in tale luogo ha incrementato l'altezza d'onda per *shoaling* ed ha riprodotto al contempo un frangente ideale (tipicamente *spilling* o *plunging*) per effettuare spettacolari manovre in acqua. Dall'analisi delle registrazioni

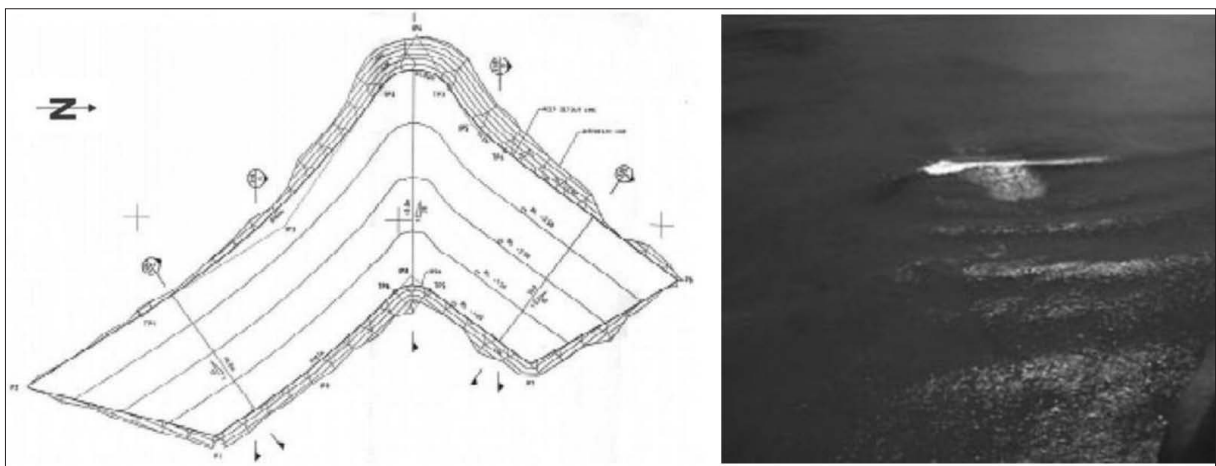


Figura 2 - A sinistra, geometria del reef di Cable Station (Bancroft, 1999) mentre a destra una foto dall'alto dello stesso reef durante il frangimento dell'onda.

mediante webcam si può infatti asserire che le condizioni ondose ricreate siano in accordo (se non migliori) di quelle ipotizzate in fase di progetto (Pattiaratchi, 2000). Inoltre, è opinione comune di molti surfisti che il reef di Cable Station sia uno degli *spot* migliori di tutta l'Australia. Nel 1999 furono ben 178 i giorni in cui si registrarono onde frangenti sul reef e 142 di queste presentavano un'elevata surfabilità. Il numero di giorni in cui lo *spot* si presentò altamente surfabile rimase poi praticamente invariato nel corso degli anni in cui il reef ha funzionato. L'attività di monitoraggio (Pattiaratchi, 2000) a distanza di un anno dalla completazione dell'opera ha dimostrato che le onde incidenti frangono con frangenti tipicamente *plunging* per periodi superiori a 6 s (periodi inferiori a tale valore si verificano con una frequenza media annua del 20%) ed altezze d'onda maggiori a 0.5 m, in accordo soprattutto con le condizioni di marea. In effetti il reef risulta essere troppo profondo (-1.78 m in cresta) per poter indurre al frangimento onde di altezza uguale o addirittura inferiori a 0.5 m, com'era inizialmente previsto dal progetto originale. L'ASR è aperto ad un settore di Nord-Ovest, sebbene lo *swell* dominante sia Ovest-Sud-Ovest. L'intervento ha richiesto l'impiego di massi naturali di granito per un totale di circa 10.000 t. Le attività di monitoraggio (Pattiaratchi, 2000) mostrano un folto e variegato strato di alghe che hanno ricoperto la superficie dei massi, confermando il pieno inserimento dell'opera nell'ecosistema del sito.

Non tutti gli ASR sono riusciti nel loro intento di proteggere la spiaggia e di ricreare condizioni d'onda ideali per la *surf*. Un esempio chiarificatore è quello di El Segundo, in California (Fig. 3). Il reef, uno dei primi al mondo assieme a quello di Cable Station, fu costruito nel 2000. Nel 1984 venne costruito a Santa Monica (cittadina attigua a El Segundo) un molo che inficiò le condizioni di surfabilità della spiaggia limitrofa. Le associazioni di surfisti promossero una dura lotta per la costruzione di un ASR nel caso in cui fosse dimostrato che il molo in questione avesse alterato negativamente il clima ondoso idoneo per la *surf*.

Nel 1999, dopo aver vinto numerose cause, prese il via la costruzione del reef (conosciuto anche come *Pratt's reef*, in onore del fondatore delle associazioni dei surfisti) con un primo finanziamento di 300mila dollari. Venne fatta una prima gettata di 110 geosacchi. Le condizioni di surfabilità dello *spot* però non migliorarono e con un ulteriore finanziamento di 200 mila dollari venne eseguito una seconda ricarica di 90 geosacchi nella primavera del 2001 (Frost, 2003). Nonostante ciò, non si ebbero incrementi ragionevoli nella surfabilità delle onde incidenti, specie per quanto attiene alla frequenza con cui esse si presentavano. Questo fece decadere del

tutto la sua funzione ricreativa, avviando al declino il reef di El Segundo. Ragione principale del suo insuccesso fu la cresta dell'opera, posta tra -0.5 m in bassa marea e -2.0 m in alta marea, e come risultato venne fatto un utilizzo poco frequente del reef, che fu smantellato nel 2008 vista la sua inutilità.

In Italia questa tipologia di opera non ha ancora trovato un radicato accoglimento, sia per la scarsa surfabilità naturale dei paraggi, sia per la predilezione della maggior parte dei surfisti ad "emigrare" per cercare onde oceaniche di altezza consistente e lungo periodo. Tuttavia nel 2007 venne proposta (Franco et al, 2007) la costruzione di un ASR in località S.Marinella (Roma). Nel litorale di S.Marinella è costituita una baia naturale detta dei "Tre Zeppi" e un vicino *spot* detto "Banzai", noto per le sue discrete caratteristiche di surfabilità. In effetti, anche nelle aree a ridotta escursione mareale come il Mar Tirreno il *surf* è uno

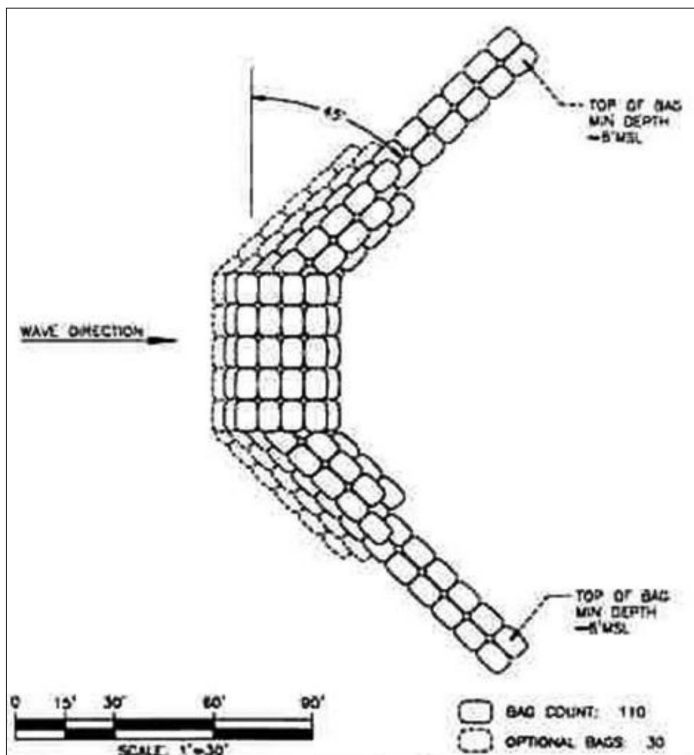


Figura 3 - Geometria e forma dell'ASR di El Segundo (Borrero, 1999).

sport assai popolare fin dai primi anni '80. Il *natural reef* presente a Tre Zeppi, come si può osservare dalla ricostruzione della batimetria (Franco et al., 2007), ha una forma tipicamente a "V", attinente con il modello batimetrico dei *surf break* naturali che Mead e Black individuarono (2003) al fine di confrontarli con gli *artificial reef*. Inoltre, il passaggio dell'importante arteria stradale della via Aurelia, la presenza di ristoranti ed esercizi commerciali nell'immediato entroterra hanno via via richiesto la costruzione di scogliere parallele prossime a riva, lunghe circa 120 m. La costruzione di un ASR migliorerebbe la capacità di difesa della costa da parte delle opere tradizionali già esistenti ed al contempo permetterebbe di potenziare le caratteristiche di surfabilità dello *spot*.

Il progetto dell'ASR, che ingloba e rafforza le barriere già esistenti, è orientato a 200°N (settore di Libeccio) ed ha una lunghezza di progetto di 380 m con due bracci convergenti di diverso orientamento e quota in cresta, i cui estremi sono distanti 300 m l'un dall'altro. La quota è variabile tra -0.5 e -1.0 m rispetto al m.m., mentre il varco centrale ha una profondità di 3.5 m. La pendenza lato mare è abbastanza moderata (1/7) al fine di ottenere un frangente di debole intensità per poter effettuare manovre quali il *tube riding*. Secondo il progetto, i bracci principali sono costituiti di geotubi e geocontenitori, mentre solo le zone dove non si pratica il *surf* sono costruite in massi di pietra naturale, al fine di risparmiare sui costi e di riutilizzare parte del materiale dei frangiflutti esistenti. La superficie liscia dei geotubi, oltre a ridurre la turbolenza locale, abbassa il rischio di incidenti per i surfisti in caso di collisione. La costruzione dell'ASR deve prevedere infine un ripascimento della spiaggia per un volume stimato di sabbia pari 10.000 m<sup>3</sup> (Franco et al., 2007).

Dopo questa serie di esempi si passerà ora alla dettagliata disamina del progetto di un *reef* artificiale, tenuto conto delle molteplici variabili progettuali in gioco. Dapprima si cercherà di stabilire le condizioni di surfabilità di un'onda (anche in relazione alla tipologia di *surf* eseguito dai *surfers*), poi, dopo aver descritto le componenti batimetriche principali, si cercherà di definire i criteri ed i parametri di progetto ed i metodi per combinarli al fine di poter giungere ad una soluzione progettuale che soddisfi gli obiettivi preposti. Si illustrerà un'ipotesi di progetto sul litorale romagnolo, tra Porto Verde e Cattolica (RN). La progettazione passerà dalla ricognizione delle caratteristiche del sito, da una definizione di massima della geometria impiegando le formule dedotte nei paragrafi precedenti e da una verifica mediante codice numerico MIKE 21. Infine si riporteranno i risultati delle simulazioni, sia per quanto attiene al funzionamento ottimale del *reef* sia per quanto riguarda le necessità di salvaguardia della spiaggia e gli effetti indotti sull'idrodinamica.

### L'idrodinamica e l'esercizio del surf

I parametri che regolano il *surf* sono sostanzialmente quattro, qui di seguito riportati.

#### Altezza e tipologia dell'onda frangente

In dipendenza dalla preparazione del surfista, sono considerate cavalcabili le onde di altezza maggiore di 0.5 m. Non è così semplice definire un frangente ideale per l'esercizio del *surf*. E' risaputo che cavalcare l'onda è più piacevole se l'onda frange con una forma *plunging*, identificabile per mezzo del parametro di Iribarren e Battjes

$$\xi = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{s}} \quad , \text{dove} \quad s = \frac{H}{L} \quad (1)$$

ove  $s$  è la ripidità dell'onda,  $L$  la lunghezza d'onda,  $H$  l'altezza d'onda al frangimento e  $\tan\alpha$  è la pendenza locale del fondale. Esistono tre tipi di frangenti: *spilling* ( $\xi < 0.5$ ), *plunging* ( $0.5 < \xi < 3.3$ ) e *surgling* ( $\xi > 3.3$ ). Tra la categoria *plunging* e *surgling* è pure presente la tipologia *collapsing*, in una prima fase simile al *plunging*, differenziandosi per il fatto che il fronte d'onda s'innalza repentinamente all'inizio e subito dopo collassa.

Tornando alla questione del frangente *plunging* ideale per il *surf*, esso in generale dipende dalla pratica che il surfista intende espletare e ciò si comprende maggiormente dalla Tabella 1, nella quale vengono sinteticamente riportate le preferenze dei surfisti (Hutt et al., 1998) riguardo al frangente desiderato in base al tipo di pratica da eseguire. Ora, il parametro di Iribarren e Battjes definito mediante la (1) è tuttavia inadatto a descrivere, all'interno della categoria *plunging*, le caratteristiche con cui le onde frangono (Fig. 4).

In altre parole non basta che sia *plunging*, ma la forma assunta dal frangente condiziona fortemente la categoria di *surf* praticata dai surfisti. Sayce (1999) sviluppò un modo per predire l'intensità delle *plunging waves* basato sull'analisi del cosiddetto *vortex ratio* di seguito definito:

Tabella 1 - Frangente ideale per i surfisti (Hutt et al., 1998).

PRATICA	TIPOLOGIA DI FRANGENTE IDEALE		
	SPILLING	PLUNGING	COLLAPSING e SURGING
Bodysurfing			
Bodyboard			
Shortboard			
Minimalibu			
Malibu			
Surf Skys			
Paddle Board			
Surf Kayaks			

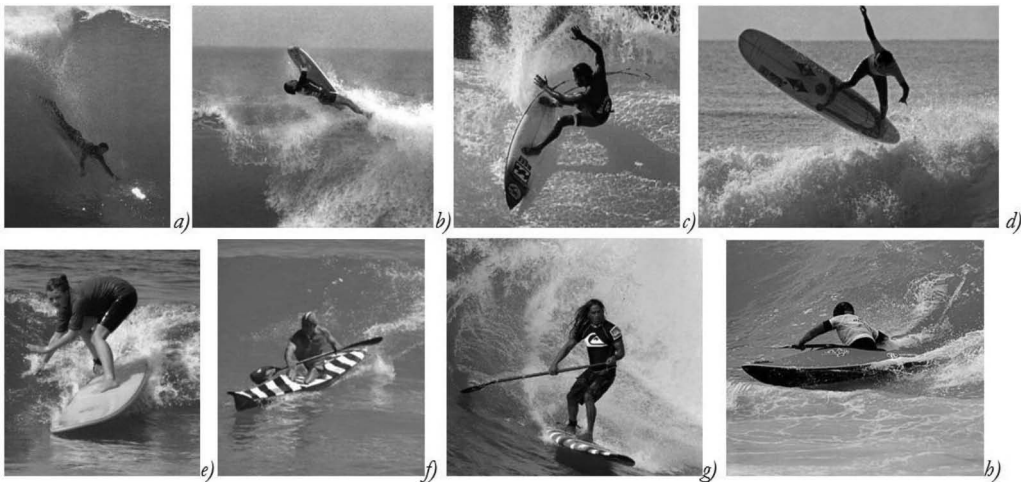


Figura 4 - Diverse categorie del surf che illustrano quelle elencate in Tab. 1: a) Bodysurfing; b) Bodyboard; c) Shortboard; d) Minimalibu; e) Malibu; f) Surf-Skys; g) Paddle-Board; h) Surf-Kayaks.

$$VR = \frac{L}{W} \quad (2)$$

dove  $L$  e  $W$  sono l'ampiezza maggiore e minore del tubo ideale sotteso dal frangente *plunging* (Fig. 5), ipotizzando che il labbro superiore dell'onda che ricade nel cavo successivo descriva una sezione che può essere analiticamente rappresentata da una curva di terzo grado (Longuet-Higgins, 1982).

L'intensità del frangimento è inversamente proporzionale al *vortex ratio*. Mead e Black (2001) arrivarono anche a definire un legame di tipo puramente empirico tra il *vortex ratio* e la variazione del fondale. E' cioè possibile stimare il rapporto e quindi identificare, all'interno della categoria *plunging*, qual è la tipologia di frangente che si forma mediante questa formula sperimentale:

$$VR = \frac{0,065}{\Delta} + 0,821 \quad (3)$$

dove  $\Delta$  è il gradiente del fondale ortogonale alle isobate.

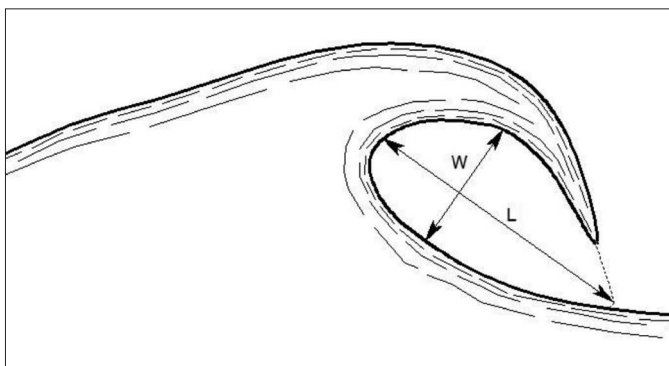


Figura 5 - Forma del frangente *plunging*, per definire il *Vortex Ratio*.

### Angolo e velocità di peel e velocità del surfista

L'onda non può frangere lungo tutta la linea di cresta al medesimo momento. Come risultato di questa evidenza, l'onda comincia a frangere da una zona ben definita e progredisce in maniera graduale fino a rompersi lungo tutto lo sviluppo della cresta. Con riferimento alla Figura 6, la velocità con cui l'onda, nel sistema di riferimento relativo e solidale al verso con cui essa avanza, viene franta è definita velocità di *peel* o anche *peel velocity* e simbolicamente espressa come  $V_p$ . L'angolo di *peel*, detto anche *peel angle*, è compreso tra la linea di cresta e la linea che congiunge i frangenti tra la stessa cresta ad istanti consecutivi  $t_1$  e  $t_2$  dove l'onda ha compiuto un tragitto pari a  $d = c (t_2 - t_1)$ . In altri termini, l'angolo di *peel* è l'angolo planimetrico formato tra la cresta non ancora franta dell'onda ed il percorso seguito dal frangente nel sistema di riferimento assoluto (solidale ad un osservatore fisso) ed è quel parametro che determina la *peel velocity* a parità di celerità d'onda. La somma vettoriale della velocità di *peel* e della celerità d'onda determina la velocità del surfista nel riferimento assoluto, detta anche  $V_s$  o *surfer velocity*:

$$V_{s\ min} = \frac{c}{\sin\alpha} = \frac{\sqrt{gh}}{\sin\alpha} \quad (4)$$

La  $V_s$  così espressa è la minima velocità che il surfista deve mantenere per poter cavalcare l'onda (Scarfe, 2002), nel sistema di riferimento fisso. E' allora chiaro che, da come è stato definito l'angolo di *peel*, valori di  $\alpha$  troppo piccoli non permettono ai surfisti di cavalcare perché la *surfer velocity* diventa molto elevata ed è quindi impossibile per il surfista rimanere in fase con l'onda (Hutt et al., 2001). Pertanto l'angolo  $\alpha$  ottimale è principalmente variabile in funzione dell'abilità del surfista e dell'altezza d'onda in questione (generalmente tra 30° e 60°).

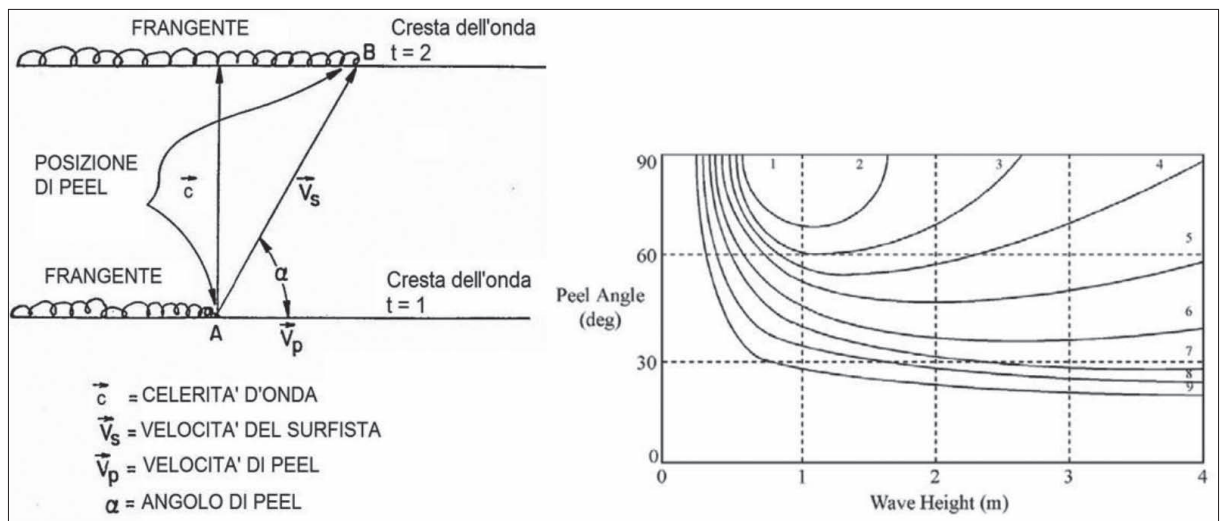


Figura 6 - A sinistra, definizione dell'angolo di peel, della velocità del surfista e della velocità di *peel* (Hutt et al., 2001). A destra, l'angolo di *peel* ideale in funzione dell'altezza d'onda e del grado di abilità del surfista. I livelli da 1 a 9 evolvono da surfista dilettante a surfista più esperto. Più l'atleta prende confidenza con le onde, più il *peel angle* si abbassa (Scarfe et al., 2002).

### Correnti indotte dal frangimento

Le correnti devono avere in generale velocità abbastanza contenute per consentire l'accesso alla zona di partenza del surfista (detta anche zona del *line up*). Quando le correnti attraversano la linea dei frangenti, interferiscono con le onde e le fanno frangere in maniera assai irregolare, del tutto inadatta alla pratica del *surf*. Per contro, le correnti di *rip* possono essere (talora pericolosamente) usate per raggiungere più agilmente le zone di frangimento.

### Criteri progettuali di un artificial surfing

Le caratteristiche geometriche dei *reef* naturali possono essere in larga parte riprese per la progettazione di un

ASR. Mead e Black (2001) identificarono sei zone batimetriche peculiari del *reef* che sono di basilare importanza per la trasformazione ondosa (Fig. 7).

*Wedge* e *focus* (scarpata e punta) costituiscono le parti principali dei *surf breaks* naturali e permettono di ottenere onde di alta qualità (*a-frame*) assieme ad un angolo di *peel* ottimale nella zona del *line up* che consenta al surfista di catturare l'onda in arrivo. I bracci sono disposti simmetricamente rispetto all'asse della struttura e legano la loro orientazione all'angolo di *peel* ottimale che si vuole ottenere. Il *focus* invece è un punto di convergenza dei raggi d'onda ed è la parte che assicura la formazione di un'onda frangente di tipo *a-frame* cioè un'onda che frange simmetricamente rispetto ad un punto centrale (situato proprio sopra *focus*), definendo due zone di *take off* per i surfisti. Il meccanismo di trasformazione ondosa si basa sul fenomeno della rifrazione sopra i bracci, mediante il quale i raggi vengono deviati sul *focus* dove poi l'onda frange. Il *ridge* (crinale) cioè una zona ad incremento improvviso ed istantaneo del gradiente del fondale, provvede a ridurre il valore dell'angolo di *peel* ed aumentare l'intensità del frangente nel caso questi due parametri raggiungano valori rispettivamente troppo alti e troppo bassi. L'onda che avanza lungo il profilo del *focus* aumenta la sua ripidità per *shoaling* e frange in corrispondenza del picco, determinando il frangente prediletto.

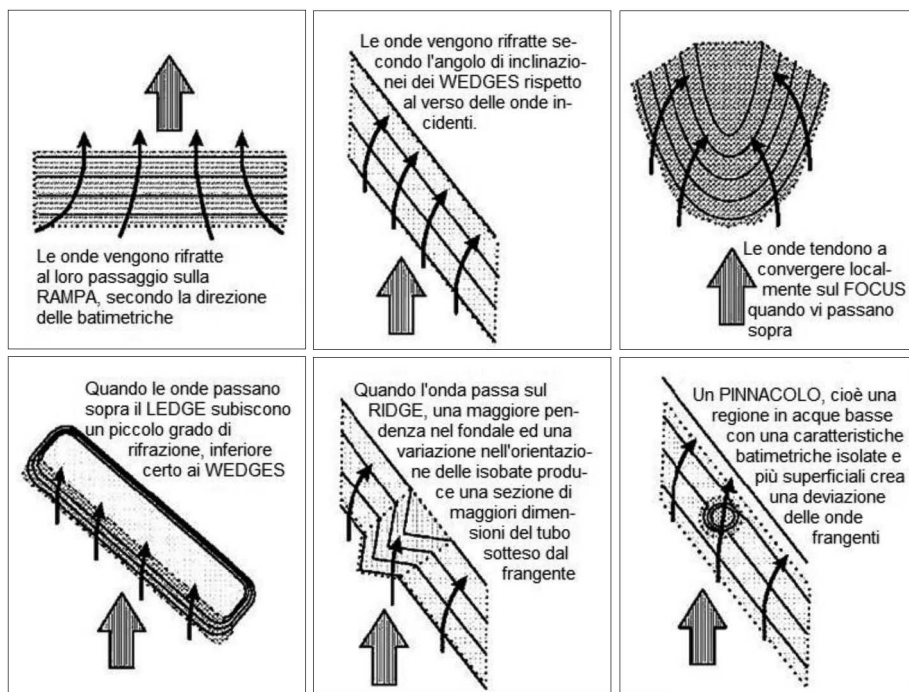


Figura 7 - Meccanismo di trasformazione delle onde sopra un *natural reef* (Mead e Black, 2003).

### Confronto tra *natural reef* e criteri progettuali per un *artificial reef*

Un fenomeno da computare nella trasformazione ondosa su *reef* naturali è il cosiddetto *wave pinching* (letteralmente, pizzicamento dell'onda). Questo fenomeno consiste nella progressiva diminuzione del tubo ideale contenuto all'interno del frangente ed entro il quale il surfista effettua il *tube riding*. Tale fenomeno si presenta con una riduzione, in termini di dimensioni caratteristiche del tubo, verso le estremità del *reef*, durante l'evoluzione del *breakpoint*. Per diminuire il *wave pinching* è necessario incrementare alle estremità dei *bracci* tanto la pendenza delle scarpate quanto l'angolo planimetrico di inclinazione dei bracci stessi (Mead e Black, 2001).

Inoltre, per effetto dello *shoaling* l'onda risente del fondale, sicché l'intensità del frangimento non può mantenersi costante lungo il *reef* (poiché cambia il *vortex ratio*). Per ovviare a ciò è necessario che l'ASR abbia una pendenza delle scarpate variabile, da valori più elevati nei punti a fondali più alti fino a valori più contenuti vicino a riva, ottenendo un profilo ideale di tipo parabolico-convesso (Fig. 8).



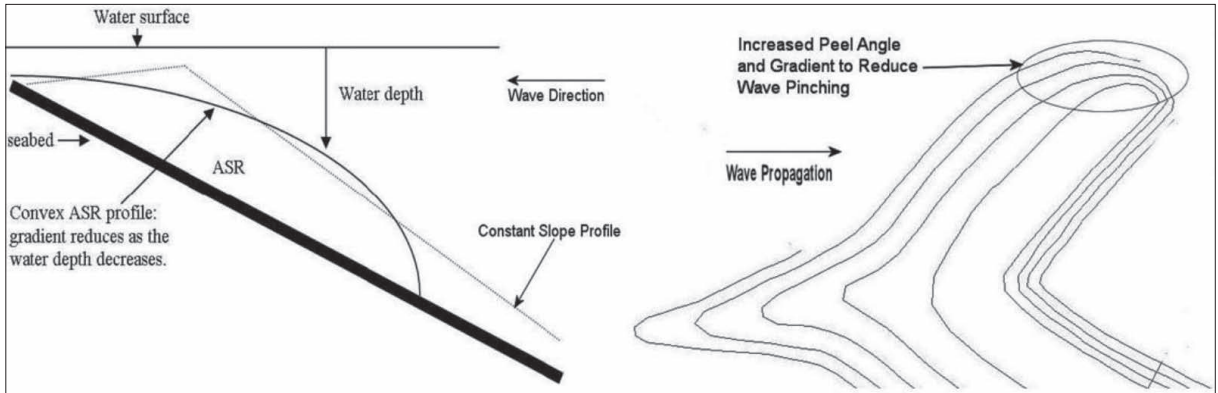


Figura 8 - Accorgimenti progettuali per migliorare la surfabilità del reef: a sinistra il profilo altimetrico viene sagomato in maniera parabolica, mentre a destra si assiste al cosiddetto “bending” che consiste nell’aumentare l’angolo dei bracci nelle zone periferiche, (Mead, 2003).

### Quota della cresta

La sommergenza della cresta è un parametro progettuale importantissimo, al fine di individuare, per un prefissato livello della marea, l’altezza minima che deve possedere un’onda per frangere in corrispondenza della struttura. La sommergenza della cresta è essenziale anche per il livello di sicurezza richiesto dagli sportivi, a seguito di una caduta dalla tavola (*wipe-out*) che potrebbe minacciare la loro incolumità.

### Idrodinamica e correnti attorno al reef

L’altezza d’onda da cavalcare può essere incrementata dai reef artificiali per effetto *shoaling*: Tutto questo, se da una parte aumenta  $H$ , dall’altra distorce l’angolo di *peel* perché le onde più alte tendono a frangere in acque più profonde mentre le  $H$  minori frangono di norma in acque basse ed in maniera non parallela alle isobate del reef.

Il sovrizzo del pelo libero (*wave set-up*) sull’opera, dovuto alla trasformazione di energia cinetica in energia potenziale, è tutt’altro che omogeneo: c’è un piccolo sovrizzo ai lati del reef dovuto al frangimento delle onde più piccole, seguito da un abbattimento del pelo dell’acqua nella zona interessata dalle *rip currents*.

La differenza di livello idrico causa necessariamente un flusso di massa e la creazione di *feeder currents* che scorrono dal centro dell’opera verso le zone periferiche del reef. Le stesse poi interferiscono con le correnti longitudinali, determinando una zona ad elevata turbolenza nelle zone periferiche del reef, dove il surfista sarà impossibilitato ad accedere. In questa zona si assiste alla nascita di forti correnti di ritorno a largo. Le correnti di *rip* sono intrinsecamente legate al fenomeno del *wave set-up* che può essere calcolato mediante la formula di Bellotti (2004):

$$\Delta z_c = \frac{3}{16} \frac{H_{bb}^2 - H_{b0}^2}{b} \quad (5)$$

dove con il pedice  $0$  si indica l’altezza d’onda al piede del reef lato mare e col pedice  $b$  l’altezza al piede lato riva, se si può considerare il reef come una barra posta sul fondale di profondità  $b$ . Il *set-up* sopra la struttura può essere considerato il principale responsabile della formazione delle correnti *alongshore* e, di conseguenza, di quelle di *rip*. Nella zona dove le correnti di *rip* intersecano la linea dei frangenti, l’altezza d’onda aumenta, l’angolo di *peel* si riduce e la linea dei frangenti si sposta al largo (Fig. 9, Van Ettinger, 2005). Se la linea dei frangenti si sposta a largo, induce al frangimento onde più alte, diminuendo (pericolosamente) l’angolo di *peel*, con tutti i riscontri negativi sulla sicurezza del surfista (Mead et al., 2003). E’ quindi necessario tenere conto delle correnti di *rip* in fase di progetto, soprattutto cercando di limitare le interferenze delle stesse con il fenomeno del frangimento nelle zone periferiche del reef. Se il reef viene opportunamente sagomato, in maniera tale che la parte centrale presenti un canale che permetta il ritorno a largo di una quota parte della corrente, allora la distorsione della linea dei frangenti appare meno marcata (Van Ettinger, 2005), con un conseguente beneficio sulla sicurezza dei surfisti.

### Progettazione del canale di *rip*

Si è soliti adottare la configurazione già anticipata sopra nell'intento di limitare gli effetti negativi delle correnti di *rip*. Il canale centrale, che è chiamato anche canale di *rip* (Van Ettinger, 2005; Henriquez, 2004), permette di eliminare le interferenze d'onda nel punto del *take off* dei surfisti, di aiutarli a raggiungere la zona del *take off* tramite una corrente di ritorno a largo di moderata intensità e di diminuire l'intensità della corrente di ritorno. Il posizionamento del canale comporta l'avanzamento verso riva della linea dei frangenti, in quanto le correnti di ritorno, di minore intensità, influiscono meno sull'altezza d'onda ed in particolare si avranno altezze d'onda al frangimento più piccole ma angoli di *peel* più elevati (a favore di sicurezza). Anche il sovrizzo indotto risulta minore.

L'intensità di tali correnti create dalla differenza di *wave set-up* inducono a variare, fino a valori che risultano ottimali, le caratteristiche geometriche del *rip-channel* (Raniers et al., 2004) adottando un modello numerico. La forzante è costituita da attacchi ondosi perpendicolari alla linea di riva (condizione più estrema per il *wave set-up*). Si è evidenziato che più l'angolo interno d'apertura del *rip-channel*  $\delta$  ampio, minore è l'intensità delle correnti, in particolare si registra una sensibile riduzione della velocità delle correnti *alongshore*, da valori prossimi ad 1 m/s fino a valori più miti dell'ordine di 0,8 m/s per angoli prossimi a 60°. Anche la pendenza delle scarpate interne al *rip-channel* incide inevitabilmente sull'intensità: Più il canale ha pendenze elevate, più i pennacchi delle correnti si assottigliano ma si elevano in intensità. Particolare importanza riveste la larghezza del canale come parametro per controllare la velocità. In generale, non è afferabile che allargando il canale si ottengono *rip-currents* di minore intensità, come si evince dalla modellazione matematica condotta su una geometria tipica per un reef dotato di *rip-channel* (Van Ettinger, 2005). In particolare, assumendo un rapporto 1/6 tra ampiezza del reef e larghezza del *rip-channel* si minimizzano le correnti di ritorno. Da ultimo analizziamo il caso in cui l'ASR tagliato non si innesti al fondale in maniera uniforme sul lato riva ma vi sia presente un piccolo salto, cioè ipotizziamo che il reef venga "tagliato". In questo caso, le correnti di *rip* appaiono meno intense rispetto al caso precedente, con effetti benefici sul posizionamento e sulla localizzazione della linea dei frangenti. Il "taglio" del reef lato riva appare senz'altro una scelta oculata.

### Orientazione ed angolo d'apertura del reef

Il tipo più semplice di reef è costituito da un'opera che in prima approssimazione può essere ricondotta ad un triangolo con la punta orientata nel verso delle onde incidenti secondo lo *swell* dominante. Un importante apporto alla determinazione della forma, allo studio della linea dei frangenti, alla definizione dell'angolo di *peel* e delle correnti indotte furono date da Henriquez (2004), combinando la modellazione numerica a quella fisica. Tali esperienze permisero di relazionare la forma del ASR agli effetti voluti per l'angolo di *peel* ed in particolare di definire quelle che sono le caratteristiche di progetto, al riguardo particolarmente della forma e posizione del *focus*.

Come abbiamo visto, valori troppo bassi dell'angolo di *peel* inducono forti *peel* e *surfer velocity* e, di rimando, un'onda cavalcabile solo da surfisti alquanto esperti. Per modulare l'angolo di *peel* si può agire sulla ripidità delle sponde e sull'angolo di inclinazione dei bracci rispetto alla linea di incidenza delle onde: va cioè considerata la rifrazione ondosa sopra il reef per permettere di frangere l'onda in maniera appropriata.

Per calcolare l'orientazione delle scarpate (e quindi l'angolo di apertura del reef) si può in prima approssimazione ricordare la ben nota legge di Snell:

$$\frac{\sin \mathcal{G}_s}{c_s} = \frac{\sin \mathcal{G}_b}{c_b} \quad (6)$$

dove gli angoli di obliquità  $\mathcal{G}_s$  e  $\mathcal{G}_b$  si riferiscono rispettivamente all'attacco del reef col fondale (*seabed*) ed al frangimento e sono definiti rispetto alla normale alle sponde. Ora, ponendo  $\mathcal{G}_b = \alpha$  (angolo di *peel*) e  $c_b = \sqrt{gb}$  si ottiene:

$$\sin \alpha = \frac{\sqrt{gb} \cdot \sin \mathcal{G}_s}{c_s} \quad (7)$$

ovvero, nel problema inverso, noto l'angolo di *peel* che vogliamo ottenere, è possibile ricavare:

$$\mathcal{G}_s = \arcsin \left( c_s \frac{\sin \alpha}{\sqrt{gb}} \right) \quad (8)$$

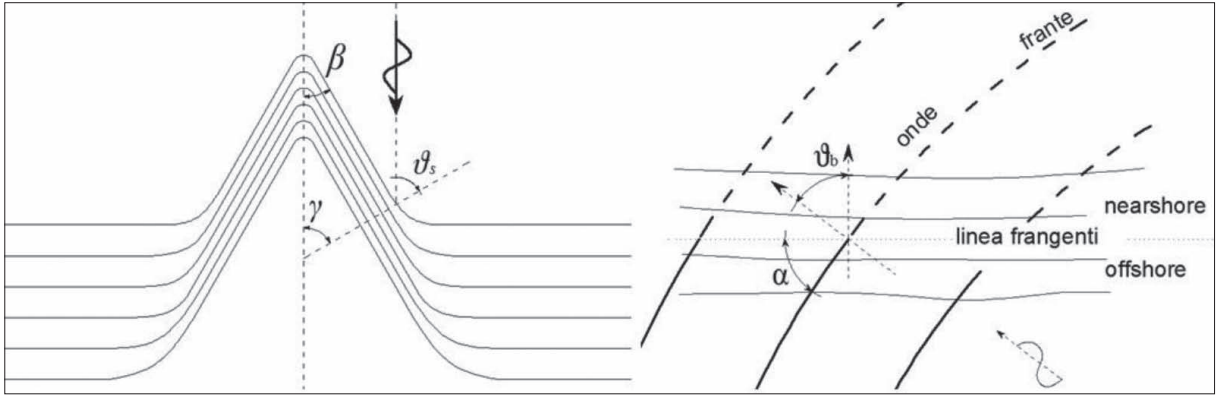
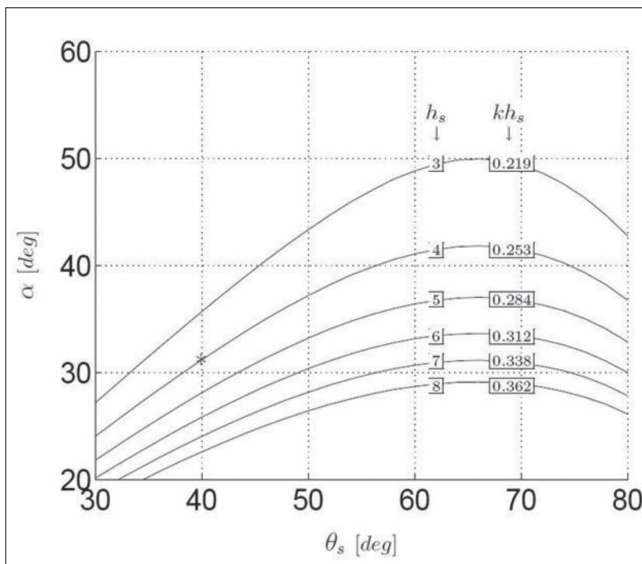


Figura 10 - A sinistra, relazioni geometriche tra l'angolo all'attacco del reef con il fondale  $\vartheta_s$ , l'angolo al centro  $\gamma$  e l'angolo di apertura  $\beta$ . A destra, relazione tra l'angolo di peel e l'obliquità al frangimento  $\vartheta_b$ .

Assumiamo l'orientazione dell'asse di simmetria del reef coincidente con la direzione dello *swell* dominante e facciamo riferimento alla Figura 10. Si vede come l'angolo  $\gamma$  coincida in realtà con  $\vartheta_s$  e pertanto l'angolo di apertura  $2\beta$  (angolo di apertura del reef) sarà dato da:

$$2\beta = \pi - 2 \cdot \vartheta_s \quad (9)$$

E' quindi evidente dalla (7) che l'angolo di peel, almeno in prima approssimazione, è funzione del rapporto tra le celerità al frangimento e al piede delle scarpate, nonché l'angolo con cui le onde incidono sugli stessi ovvero, per diretta conseguenza, l'inclinazione del reef rispetto alla linea di costa.



Alcuni autori (Henriquez, 2005) cercarono di rapportare l'angolo di peel all'obliquità  $\vartheta_s$  che le onde assumono sul *seabed* ed alla profondità dello stesso rispetto al medio mare  $h_s$ . Si evince come l'angolo di peel decresca all'aumentare del fondale (Fig. 11). Una volta dunque nota l'obliquità  $\vartheta_s$  e il fondale locale è immediato determinare l'angolo di peel ovvero, nel caso di progetto del reef, richiedendo un peel angle specifico (non troppo basso per motivi di sicurezza), si entra nel grafico con  $\alpha$  e, a parità di  $h_s$ , si deduce  $\vartheta_s$ .

Figura 11 - Andamento dell'angolo di peel con il fondale e l'angolo davanti al reef, rispettivamente  $h_s$  e  $\vartheta_s$ .

**Effetti sul trasporto solido e sul litorale**

Da ultimo occorre considerare che il posizionamento di un ASR (come tutte le opere a cresta bassa) provoca una locale riduzione della energia ondosa incidente e quindi delle correnti e del trasporto solido. Non ci sono studi specifici che consentano di valutare con precisione l'effetto di un reef sul litorale. Per quanto concerne gli effetti locali di un reef sussistono alcuni criteri empirici mediante i quali è possibile determinare la formazione di un saliente o un tombolo (Black e Andrews, 2001) per effetto del posizionamento rispetto alla linea di riva e delle sue caratteristiche geometriche. Con riferimento alla Figura 12, il saliente può non formarsi se

$$\frac{B}{S} \geq 0.1 \quad (10)$$

dove  $S$  ed  $B$  sono rispettivamente la distanza da riva e la larghezza (intesa parallelamente alla linea di costa) del *reef*. Il tombolo può formarsi se

$$\frac{B}{S} \geq 0,6 \quad (11)$$

La dimensione (approssimativa) del saliente può essere calcolata mediante:

$$\frac{X}{B} = 0,498 \cdot \left(\frac{B}{S}\right)^{-1,268} \quad (12)$$

mentre l'estensione del saliente è deducibile da:

$$\frac{Y_{off}}{D_{tot}} = 0,125 \pm 0,02 \quad (13)$$

dove  $Y$  e  $X$  sono, rispettivamente, l'ampiezza (intesa perpendicolarmente alla linea di costa) del saliente e la distanza di questo dal *reef*, sicché si ha anche  $X+Y=D$ .

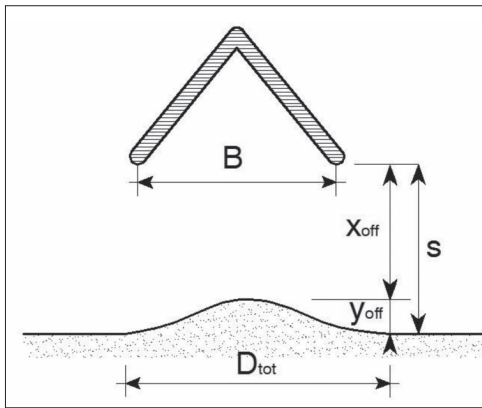


Figura 12 - Schematizzazione del saliente e indicazione delle dimensioni.

## Ipotesi progettuale

### Il sito

Il vivo interesse del “Marasma Surf Club”, associazione sportiva che pratica il *surf* nelle vicinanze del fiume Conca ha motivato l'impiego di un ASR quale struttura marittima multifunzionale per la difesa e l'uso ricreativo della costa.

I luoghi interessati dall'intervento sono le cittadine di Cattolica e Porto Verde (frazione di Misano Adriatico, noto per la darsena turistica) in provincia di Rimini (Figura 13). Nella zona è presente la foce del Fiume Conca dove, sulla sinistra, sorge la darsena turistica di Porto Verde mentre, sulla destra, l'acquario “Le Navi” e la serie di barriere emergenti che sono poste a presidio per la difesa della spiaggia.

Una delle ultime campagne di rilievo *multibeam* del 2006 ha permesso di elaborare una dettagliata batimetria della zona d'intervento: essa appare subito uniforme, con isobate quasi sempre parallele alla linea di costa, eccettuata la zona prospiciente a Porto Verde dove, la presenza del porto turistico, rende necessaria la periodica manutenzione del fondale mediante le consuete operazioni di dragaggio.

Da Porto Verde procedendo lungo il litorale verso Nord, nei pressi di Misano Adriatico, la presenza di pennelli ortogonali alla riva ha modificato fortemente l'andamento delle isobate, creando delle zone di accumulo e delle fosse di erosione localizzate: in alcune zone, laddove il fondale presenta in media la profondità di -2.0 m, sono presenti fosse a quota -3.5 m rispetto al medio mare.

La natura mineralogica dei sedimenti presenti nell'area è per il 50% formata da materiale carbonatico, mentre la rimanente parte è costituita da materiali più resistenti all'azione ciclica dell'onda battente, per lo più feldspati e quarzo (come da campagna di rilevazione geologica e granulometrica risalente al 1982 condotta da IDROSER). Tale composizione è dovuta alla miscelazione di sedimenti trasportati dalle correnti litoranee, dal trasporto solido del Conca e dalle sabbie da ripascimento, le quali hanno un elevato tenore di feldspati e quarzi e sono privi (non oltre il 5%) di materiale organico. Per quanto attiene alla pezzatura dei sedimenti, il  $D_{n50}$  sulla spiaggia oscilla tra 0.2 e 0.3 mm senza forti scostamenti da quelli rilevati sulle coste del litorale romagnolo. La distribuzione dei materiali presenta una progressiva ma continua diminuzione del  $D_{n50}$  dei sedimenti, con una maggiore uniformità dei diametri stessi progredendo verso acque profonde. Fino alla batimetria -2.0 m il  $D_{n50}$  è compreso tra 0.20 e 0.25 mm, con punte anche di 0.30 mm mentre, tra -2.0 m e -5.0 m di profondità, i diametri oscillano tra 0.15 e 0.20 mm. Il  $D_{n50}$  si stabilizza attorno al valore 0.10 mm attorno alle isobate -8.0 m o -10.0 m. Tuttavia, pur avendo diametri maggiori alla media probabilmente dovuti all'erosione della falesia al promontorio del S. Bartolo nonché alla vicinanza della foce

del Conca, è pur sempre rispettato il consueto rapporto di 2 a 1 tra i diametri medi passando dalla battigia a fondali ben più profondi.

Conducendo una serie di prove penetrometriche dinamiche SPT nell'ambito dei lavori per l'ampliamento del vicino porto di Cattolica, è stato possibile poi ricostruire la stratigrafia del terreno. Fino ad 1.50 m dal piano campagna (coincidente con il fondale locale) prevale terreno sabbioso con sfasciume conchigliare e piccola presenza di materiale organico. Da 1.50 a 5.40 di profondità è presente uno strato di limo argilloso, da 5.4 a 9.0 m ghiaia fortemente eterometrica con presenza di limo. Gli strati più profondi (a circa 10 m dal piano campagna) sono caratterizzati da un materasso di sabbia mista a ghiaia. Inoltre, attraverso la medesima prova, è stato possibile determinare la liquefacibilità del terreno, intesa come verifica del coefficiente di sicurezza (che deve sempre essere maggiore almeno ad 1,3):

$$F_s = \frac{CRR}{CSR} \quad (14)$$

dove per *CRR* si intende la *Cyclic Resistance Ratio* (resistenza a taglio ciclico del terreno) e per *CSR* la *Cyclic Stress Ratio* (intesa come massima sollecitazione di taglio ciclico indotta sulla struttura) secondo il metodo *CNR – GNDT* (Monaco, 2008), assumendo un grado di sismicità pari a 9, una percentuale del 10% a tutte le profondità per il materiale fine (passante al vaglio 200 ASTM), confrontando tale assunzione con i riscontri granulometrici del sito.

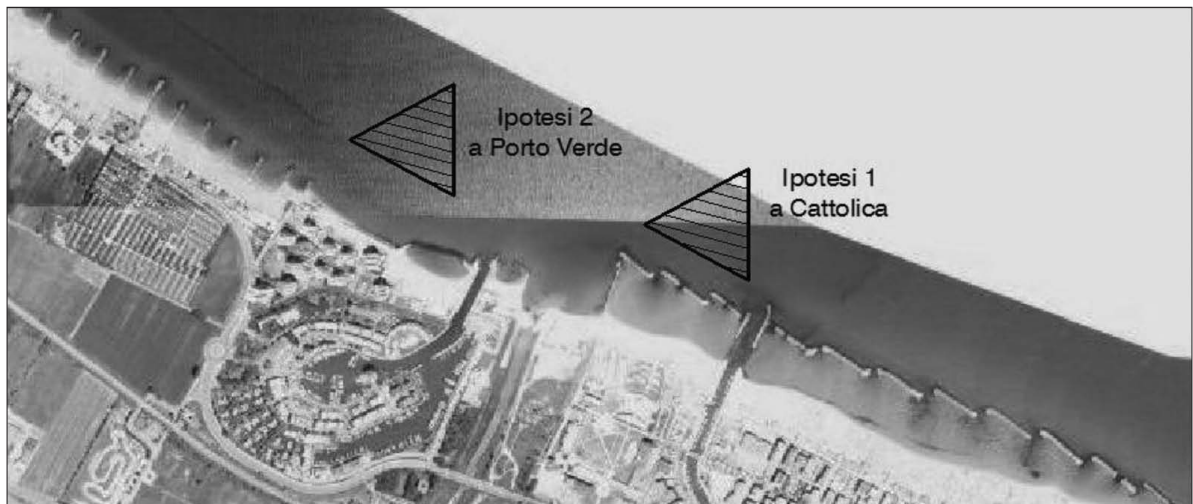


Figura 13 - Zona d'intervento, alla foce del fiume Conca, dove vengono evidenziate le possibile zone di collocazione di un ASR.

### **Ricostruzione del regime ondoso a largo di Rimini**

Il clima meteomarinò è stato ricostruito analizzando una serie storica lunga nove anni (1993-2002) contenente i dati ondometrici, anemometrici e meteorologici provenienti dalla boa di acquisizione dati montata sulla piattaforma Azalea a largo di Rimini (coordinate geografiche latitudine 44°10'020"N, longitudine 12°43'180" E) su fondali di -19 m, supponendo di trovarci in acque profonde e quindi di non considerare gli effetti di *shoaling* e rifrazione. Il clima meteomarinò è pertanto stato ricostruito in termini di tabelle di frequenza relativa d'accadimento. Per quanto attiene alle direzioni d'onda ricavate a largo, è opportuno sintetizzarle e raggrupparle in un intervallo di direzioni che tenga conto dell'orientazione della spiaggia rispetto al Nord (109°) e dell'effetto del vicino promontorio del S. Bartolo, il quale scherma le onde provenienti da settori con un'obliquità maggiore a 90°N. Pertanto in Tabella 2 non verrà riportata la totalità dei casi  $H_s - Dir$  (cui compete una frequenza relativa del 100%), bensì quelli relativi ad un intervallo 300°N – 90° N (frequenza relativa del 42.42%).

Quello che la Tabella 2 vuole evidenziare è inoltre il fatto che dal settore compreso tra 45° e 75° Nord provengono onde più alte rispetto alle altre direzioni. La Tabella 3 mostra invece la distribuzione  $H_s - T_s$  tenuto conto

Tabella 2 - Frequenza relativa d'accadimento  $H_s$  - Dir per  $300^\circ\text{N} < \text{DIR} < 90^\circ\text{N}$ .

$H_s$ [m] \ Diagonale $Dir$ [ $^\circ\text{N}$ ]	300-315	315-330	330-345	345-360	0-15	15-30	30-45	45-60	60-75	75-90	%
0.00-0.50	6.83	4.81	2.65	1.99	1.63	1.36	1.32	1.39	1.59	2.02	25.59
0.50-1.00	3.41	1.89	0.75	0.47	0.44	0.38	0.44	0.52	0.69	0.80	9.80
1.00-1.50	0.76	0.39	0.15	0.12	0.11	0.18	0.28	0.53	0.58	0.47	3.57
1.50-2.00	0.08	0.07	0.04	0.04	0.06	0.08	0.21	0.43	0.47	0.24	1.73
2.00-2.50	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.06	0.14	0.30	0.29	0.13	1.00
2.50-3.00					0.01	0.02	0.08	0.17	0.14	0.04	0.46
3.00-3.50							0.03	0.09	0.05	0.01	0.18
3.50-4.00							0.01	0.04	0.02		0.07
>4.00								0.01	0.01		0.02
%	11.09	7.18	3.60	2.63	2.27	2.07	2.52	3.49	3.84	3.72	42.42

Tabella 3 - Frequenza relativa d'accadimento  $H_s$  -  $T_s$ .

$H_s$ [m] \ Diagonale $T_s$ [s]	< 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	%
0.00-0.50	56.01	8.46	1.62	0.25	0.03		66.37
0.50-1.00	7.06	10.76	3.58	1.14	0.14	0.01	22.67
1.00-1.50	0.05	2.19	3.14	0.87	0.31	0.01	6.58
1.50-2.00		0.07	1.64	0.55	0.14	0.01	2.41
2.00-2.50			0.22	0.89	0.03		1.14
2.50-3.00			0.01	0.43	0.07		0.52
3.00-3.50				0.08	0.12		0.20
3.50-4.00					0.07		0.07
>4.00					0.02		0.02
%	63.12	21.47	10.22	4.20	0.94	0.03	100.00

vati dell'ordine di 6 secondi, il numero dei giorni cui l'opera risulterebbe fruibile si riduce ulteriormente. Se ad esempio si considerassero periodi superiori a 5 secondi, si avrebbero 2.44% durante l'estate (2.2 giorni) e 9.99% durante l'inverno (27 giorni), per 30 giorni annui complessivi circa. La condizione si restringe ulteriormente se consideriamo periodi superiori ai 6 secondi: 0.43% durante l'estate (praticamente neanche un giorno) e 4.15% durante l'inverno: in sostanza, solo 11 giorni annui.

## Progetto di massima del reef

### Luogo d'intervento

Le zone deputate ad accogliere il reef possono essere essenzialmente due. La prima ipotesi di progetto è a Cattolica, davanti all'acquario "Le Navi". La seconda è innanzi alla spiaggia di Porto Verde. La fattibilità di una piuttosto che l'altra ipotesi si basa su considerazioni inerenti al costo, alla sicurezza dei bagnanti ed alle conseguenze dell'intervento sul litorale.

che si considerano surfabili onde aventi  $H_s > 0.5$  m e  $T_s > 4$  s (per surfisti di elevata abilità i periodi si dilatano, mentre per i principianti sono accettabili anche periodi di 4 - 5 s).

La surfabilità dello spot risulta relativamente bassa e concentrata nei mesi non estivi, cioè quelli per i quali le mareggiate sono più frequenti. Se consideriamo l'opera aperta per lo più ad esordienti di tale pratica, con onde di basso periodo, si ottiene una frequenza congiunta di  $T_s$  e  $H_s$  pari a 5.86% per l'estate e 14.02% per l'inverno, che corrispondono rispettivamente a 5 e 38 giorni, per una totalità di 43 giorni all'anno. Se invece l'opera fosse rivolta a surfisti più abili, i quali apprezzerebbero periodi d'onda più ele-

**Quota della cresta**

La definizione della quota del reef è passata per una serie di considerazioni sulla percentuale di onde frangenti, in relazione al fondale su cui esse sono state valutate. Conoscendo l'altezza d'onda a largo  $H_o$  è stato possibile, implementando la relazione di dispersione, ricavare i valori di altezza d'onda a riva  $H_i$  per diverse quote del fondale  $h$  a cui si è ipotizzato di collocare la cresta del reef. Tale procedura si è ripetuta per diversi valori del periodo  $T_s$ . Per ognuno dei valori di  $H_i$  è stato poi calcolato il *breaker index*  $g_b$ , e, mediante il confronto con le tabelle del clima offshore, è stata dedotta la frequenza di frangimento, intesa come percentuale in cui, per quel valore di  $H_i$ , per un dato periodo  $T_s$  e per un dato fondale  $h$ , si è registrato un  $g_b$  maggiore a 0.5. Se, in effetti,  $g_b$  è maggiore a 0.5 l'onda è ritenuta potenzialmente frangente (Sayce et al., 1999). La procedura messa in atto ha allora evidenziato che per fondali prossimi a 2.00 m rispetto al medio mare, la percentuale di onde caratterizzate da  $g_b$  maggiore a 0.5 (cioè ritenute frangenti) è massima (26% di frequenza relativa) con una  $H_b$  minima di 1.25 m circa. Sulla base di questo risultato, la cresta del reef può essere posta a -2.00 m, in maniera tale da massimizzare il frangimento per le onde tipiche di quel paraggio. Il problema dell'affioramento dell'opera in bassa marea viene così superato dal momento che, sempre sulla base dell'analisi del clima meteomarinico ricostruito, le basse maree estreme si attestano su valori contenuti entro -0.70 m rispetto al medio mare. In condizioni di bassa marea e cavo d'onda (cioè in condizioni di livello idrico minimo) il reef è comunque provvisto di un conveniente battente idrico al di sopra della propria cresta.

**Angolo di apertura del reef**

Per poter definire l'angolo di apertura del reef  $2\beta$  e quindi l'orientazione planimetrica delle scarpate da cui dipende l'angolo di peel è necessario partire dal ragionamento inverso. In altri termini si definisce dapprima l'angolo di peel in funzione del grado di abilità del surfista, ipotizzando che tale opera sia fruibile da surfisti di media abilità, che vengono rappresentati da un livello 3 nella scala delineata da Hutt (2001) e per i quali l'angolo di peel minimo da assicurare è  $60^\circ$  (Hutt et al., 2001). Mediante la (8) e la (9) è stato possibile desumere la seguente tabella, che prende in esame diversi periodi d'onda. Se, consideriamo surfabili le onde aventi valori di periodo  $T_s > 5.5$  s, l'angolo d'apertura oscilla tra  $60^\circ < 2\beta < 70^\circ$ . Si sceglie quindi di adottare in prima approssimazione un angolo intermedio pari a  $65^\circ$ .

**Pendenza delle scarpate**

La pendenza delle scarpate è di fondamentale importanza per stabilire la tipologia di frangente che verrà a ricrearsi sopra la struttura. Se vogliamo ottenere frangenti tipicamente *plunging* ( $0.5 \leq \xi \leq 3.3$ ) è allora necessario adottare una pendenza delle scarpate moderatamente acclivi, pari ad 1:3, come mostra la Tabella 5.

**Geometria del canale di ritorno**

Il canale di rip (chiamato anche *paddling* o *rip channel*) è caratterizzato da una certa larghezza  $b$ , da una pendenza interna delle sponde e dall'angolo di apertura al centro  $\delta$ . Al fine di minimizzare l'intensità delle correnti di ritorno, si adottano (Van Ettinger, 2005)  $\alpha$  pari a  $60^\circ$ , pendenze delle sponde interne pari a 1/3 e una larghezza  $b$  commisurata al rapporto

$$\frac{b}{B} \cong \frac{1}{6} \tag{15}$$

dove  $B$  è la larghezza del triangolo com'è schematizzato in Figura 14.

**Tabella 4 - Variazione dell'angolo d'apertura del reef con il periodo:  $c_s$  e  $\mathcal{G}_s$  sono rispettivamente la celerità e l'obliquità al fondale davanti al reef; mentre  $2\beta$  rappresenta l'angolo di apertura del reef.**

$T_s$ [s]	$c_s$ [m/s]	$\mathcal{G}_s$ [°]	$2\beta$ [°]
2.5	3.86	33.9	112.0
3.5	4.91	45.5	89.4
4.5	5.43	51.8	76.3
5.5	5.71	55.7	68.6
6.5	5.87	58.2	63.8
7.5	5.97	59.7	60.6

**Tabella 5 - Parametro di Iribarren e Battjes a riva per pendenze delle sponde 1:3.**

$T_s, S$ $H_s, m$	5	6	7
1.5 m	1.44	1.61	1.75
2.5 m	1.11	1.24	1.36
3.5 m	0.94	1.05	1.15

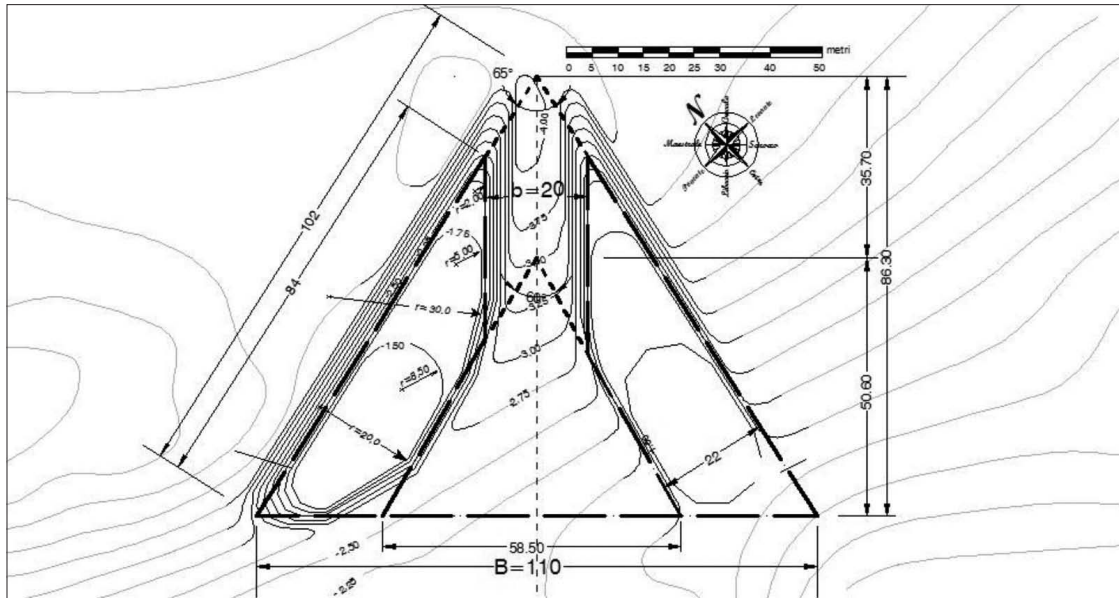


Figura 14 - Geometria del reef in entrambi le ipotesi progettuali.

### Dimensioni

Le dimensioni del reef vanno relazionate alla necessità di contenere i volumi (e quindi i costi) ed alla disponibilità di spazio davanti alla spiaggia (e quindi alla zona dove verrà collocata). La decisione principale è quella di adottare la stessa geometria sia per quanto attiene alla spiaggia di Cattolica, sia per la spiaggia di Porto Verde (rispettivamente prima e seconda ipotesi). Il reef può essere assimilato ad un triangolo isoscele, con angolo al *focus*  $2\beta=65^\circ$  e con angoli alla base pari a  $57.5^\circ$ , con dimensioni pari a 110 m circa di base per 86.30 m di altezza.

Le dimensioni così considerate fanno riferimento ad un triangolo equivalente del reef inteso ad una profondità di 2.00 m rispetto al medio mare. Naturalmente le dimensioni si allargano mano a mano che il fondale aumenta. Anche il *rip-channel* che, in corrispondenza dell'isobata 2.00 m è largo 20 m, si riduce progressivamente fino ad assumere una larghezza sul fondo pari a 9.50 m all'isobata 3.75 m. Angoli interni  $\delta$  più elevati permettono di risparmiare sul volume del reef e quindi sul materiale di costruzione. Tuttavia non occorre esagerare, evitando di far mal funzionare il reef nel suo obiettivo principale di far frangere le onde incidenti sopra la propria cresta (che per  $\delta$  eccessivamente elevati si troverebbe ad essere quasi inesistente). Un buon compromesso si può avere adottando  $\delta = 60^\circ$  con centro d'apertura ad una distanza di circa 50 m dalla base.

### Posizionamento davanti a Cattolica

La zona in oggetto è immediatamente prospiciente ad una serie di barriere emerse orientate per proteggere la spiaggia dalle mareggiate da Bora. La serie è composta da cinque barriere in massi divise da varchi di ampiezza variabile da 7 a 15 m. Le barriere distano circa 80 m dalla riva e sono innestate a Ovest con un piccolo molo situato vicino alla foce del Conca e ad Est con un pennello in massi che presidia l'entrata al Porto Canale Turistico di Cattolica, sorto alla foce del torrente Ventena. L'ampiezza della spiaggia emersa in sabbia è circa 50 - 60 m ed è attualmente usata come stabilimento balneare.

Da una prima disamina della batimetria della spiaggia sommersa ed emersa possiamo notare che il tratto in questione ha una lunghezza complessiva (da molo a pennello) pari a 280 m circa: entro tale zona si dovrà contenere l'ASR, tenendo conto che vi sono due vincoli principali: il requisito di navigabilità per le imbarcazioni che entrano od escono dal porto canale e la necessità di non incrementare oltremodo i volumi (e di conseguenza i costi) dell'opera visto che ci troviamo già in corrispondenza di fondali elevati.

Il primo requisito non desta particolari preoccupazioni, poiché l'accesso al porto canale da parte delle



imbarcazioni è comunque agevole dal punto di vista del governo delle barche. La batimetria, dalle barriere procedendo verso largo, presenta isobate che s'infittiscono molto velocemente, determinando un gradiente del fondale assai elevato e portandosi rapidamente attorno a valori variabili da - 4.00 a - 4.50 m. La pendenza della spiaggia emersa è in media pari al 3 - 4%, mentre nella spiaggia sommersa (fino a fondali di 2.00 m) intorno al 2.5% ed infine, se andiamo a largo delle barriere, la pendenza si abbassa ulteriormente con valori fino a 0.5 - 1%. E' in quest'ultima zona che si andrà a posizionare il *reef*, praticamente su di una distesa di sabbia poco acclive ma molto profonda.

Ciò detto, prima di partire col progetto vero e proprio è opportuno soffermarci sul fatto che la barriere esistenti possono causare un pericolo non piccolo per l'incolumità del surfista. Una messa in sicurezza dello *spot* potrebbe consistere nell'abbassare (di un masso) le cinque barriere.

Considerata la necessità di mantenere un adeguato livello di protezione della spiaggia, si sono elaborate due ipotesi: l'abbassamento o la rimozione della barriera centrale che si trova allineata con il *canale di rip* dell'ASR (vedi Fig. 15).

Nella prima ipotesi la cresta di tale barriera deve essere abbassata alla quota corrispondente ad un battente idrico adeguato ad attraversare il varco a nuoto per raggiungere la zona del *line-up* dalla spiaggia emersa. Per questo si porta la cresta da +1.50 m di emersione ad una sommersa pari a -1.50 m rispetto al medio mare.

Nella seconda ipotesi, la rimozione della barriera renderebbe disponibile una maggiore quantità di materiale da recuperare per la costruzione del *reef* stesso, circa 1200 m<sup>3</sup> rispetto a 850 m<sup>3</sup> nel caso di abbassamento di soli due massi.

Si valuta il coefficiente di trasmissione  $K_t$  globale a tergo delle opere mediante una media pesata sulle lunghezze dei varchi ( $K_t=100\%$ ) e delle barriere (ove  $K_t$  è calcolato adoperando la formula di D'Agremond et al., 1996), si veda Tabella 6. La rimozione della barriera può accrescere il livello di sicurezza per i surfisti e tuttavia aumenta di un 10% l'agitazione ondosa media rispetto allo scapitozzamento della barriera stessa.

**Tabella 6 –  $K_t$  per varie opzioni progettuali.**

	$K_t$ %
Stato attuale	2 %
Con abbassamento barriera centrale	21%
Con rimozione barriera centrale	30%

### **Posizionamento davanti a Porto Verde**

In questo caso il tratto entro cui collocare il *reef* si trova tra i pennelli prospicienti alla darsena di Porto Verde e più precisamente nella zona subito ad Ovest di una micro-baia creata da pennelli già esistenti. La batimetria non appare molto uniforme, specie per la presenza di alcune fosse (da - 2.25 m a -4.75 m di profondità localizzate da 20 m a 100 m circa dalla battigia), spostate sul lato più occidentale del tratto in questione, mentre nella zona centrale il fondale appare più uniforme, con pendenza media di circa 3.5%. Il reef allora dovrà essere costruito in tale zona, evitando così di interessare le suddette fosse e quindi risparmiando sul materiale da costruzione dell'opera stessa. Il tratto in questione ha un'estensione complessiva di circa 350 m. Sono presenti tre pennelli: il primo, più a Ovest è lungo circa 30 m, con Dn50  $\approx$  1.20 m, larghezza in cresta pari a 4 m e pendenza delle sponde 1/2. I due pennelli rimanenti formano una micro-baia il cui sbocco a mare è presidiato da una piccola opera soffolta. I pennelli hanno un Dn50  $\approx$  1.20 -1.50 m, larghezza in cresta 4.0 – 5.0 m e pendenza delle sponde 1/2.

La linea di battigia dista circa 30 m dal complesso residenziale di Porto Verde, di cui 15 m di spiaggia in sabbia e 15 m di spiaggia in ghiaia e ciottoli, con pendenza in media pari al 12%.

Vengono contemplate due diverse ipotesi di progetto, che verranno di seguito spiegate. Fatto salvo il posizionamento che rimane il medesimo e le dimensioni che restano inalterate per entrambi i casi, nella seconda ipotesi si è deciso di collegare il reef a riva mediante pennelli sommersi e pennelli, uno dei quali già esistenti. Quest'alternativa rende tuttavia necessaria la costruzione di un pennello lungo 18 m in cresta e largo 4 m (nella Figura 16, quello più ad Ovest), con pendenza delle sponde 1/2 e costruito in massi naturali, la cui stabilità va ovviamente verificata.

Il pennello viene progressivamente allargato fino ad una larghezza in testa di 5.50 m. Dal pennello si innesta il connettore sommerso con tracciato ad arco che si collega al braccio Ovest del *reef*, ad una profondità di 1.50 m. Il connettore ha anch'esso una larghezza di 4 m in cresta ed una pendenza delle sponde pari a

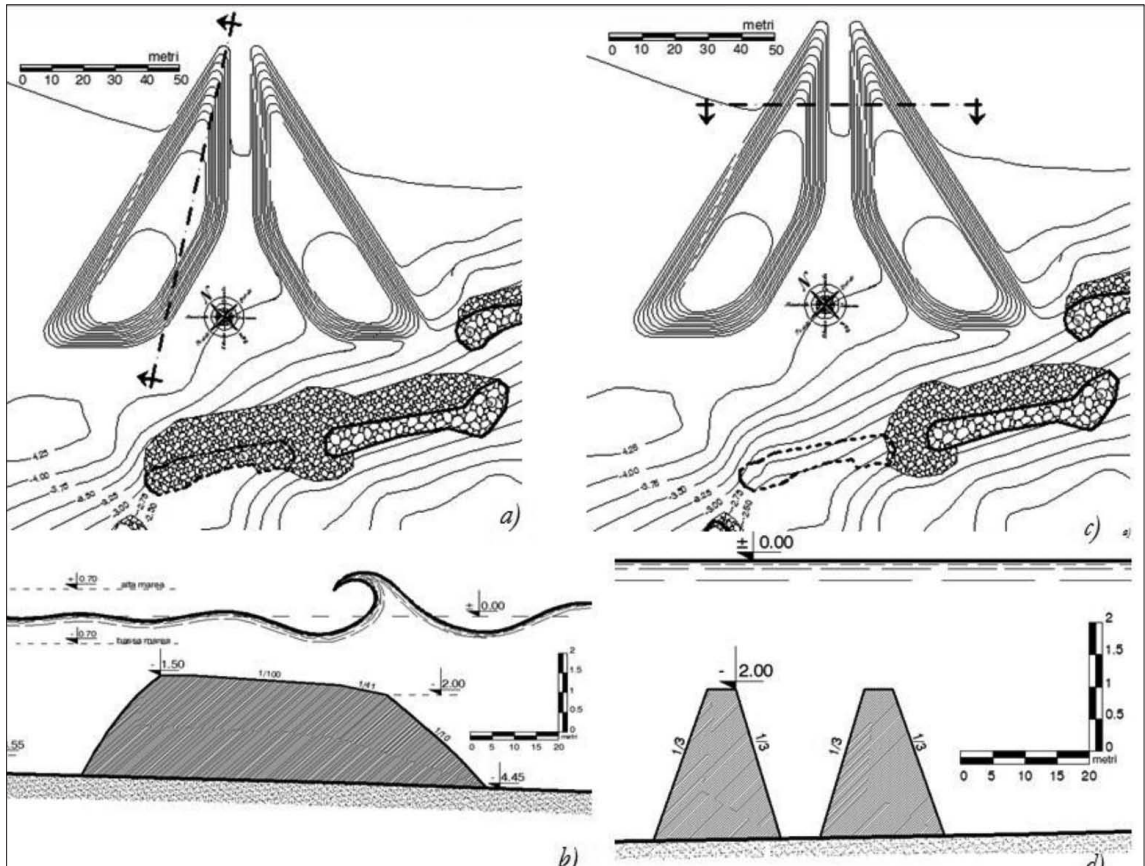


Figura 15 - Planimetrie e profili altimetrici della prima ipotesi a) e b) e della seconda ipotesi c) e d).

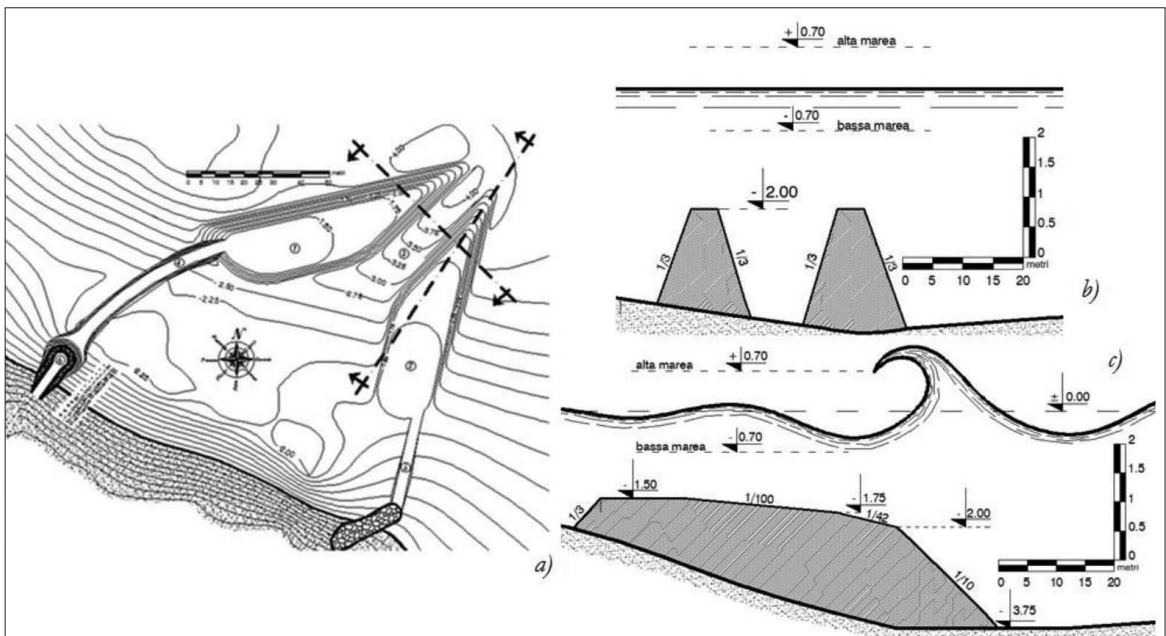


Figura 16 - Planimetria a) e profili altimetrici b) e c) della seconda ipotesi di progetto del reef davanti a Porto Verde.

1/2 . Anche il braccio Est viene collegato al pennello già esistente mediante un connettore parzialmente sommerso. Nella fattispecie, è possibile ridurre la lunghezza di tale pennello recuperando parte dei massi per costruire il secondo connettore, di larghezza in cresta sempre pari a 4 m e con una pendenza alla testa di 1/9 partendo da una quota di +1.00 m e terminando a -1.50 m rispetto al medio mare. Tale connettore può essere costruito impiegando il pietrame recuperato dalla demolizione della parte terminale del pennello esistente e cui s'innesta.

**Effetti sul litorale**

Esplicitando nelle (10)-(13) i termini reali è stato possibile ricavare informazioni circa la formazione del saliente e le dimensioni effettive dello stesso in entrambi le ipotesi summenzionate.

Come si vede in Tabella 7, a parità di larghezza dell'ASR il posizionamento a Cattolica dà luogo ad un saliente i cui elementi principali della geometria sono di dimensioni doppie rispetto al caso del posizionamento a Porto Verde.

Sempre al riguardo della tabella precedente, occorre però precisare che la natura granulometrica del fondale davanti a Porto Verde è diversa da quella davanti a Cattolica. Nella fattispecie, il diametro dei sedimenti è molto maggiore: si parla di ghiaia e ciottoli, piuttosto che sabbia. Questo fattore riduce notevolmente la mobilità del materiale e quindi la capacità di produrre forme geomorfologiche quali, ad esempio, il saliente. Alla luce di tale considerazione, i risultati delle (10)-(13) riportati nella Tabella 7 devono quindi essere modificati in relazione alla granulometria del sedime, magari implementando un codice di calcolo che contempli lo studio dell'evoluzione geomorfologica del litorale a seguito del posizionamento di un'opera stessa.

**Tabella 7 - Effetti indotti sulla costa.**

	<b>B</b> [m]	<b>S</b> [m]	<b>B/S</b> [-]	<b>X<sub>off</sub></b> [m]	<b>Y<sub>off</sub></b> [m]	<b>D<sub>off</sub></b> [m]
Porto Verde	110	50	2.2	20	30	245
Cattolica	110	125	0.88	64	61	500

**Volumetria d'intervento**

Il volume è stato calcolato, per entrambi i siti presi in esame, mediante la formula di Torricelli la quale è impiegata per il calcolo di un prismaide avente due facce piane e parallele F1 e F2 distanti tra di loro d ed aventi una sezione mediana Fm posta a d/2 sia da F<sub>1</sub> che da F<sub>2</sub>:

$$V = \frac{d}{6} + (F_1 + F_2 + 4F_m) \tag{16}$$

Il reef è essere assimilato ad un solido che può essere idealmente tagliato a fette in corrispondenza delle isobate con dei piani orizzontali: l'intersezione dei piani passanti per le isobate con il solido delineano facce piane e parallele, ciascuna delle quali è distante 0.25 m dall'altra (equidistanza delle linee di livello), considerando un'area mediana Fm pari alla media tra le aree estreme F1 e F2. I risultati riportati in Tabella 8 mostrano come i volumi di costruzione necessari per la costruzione del reef a Cattolica siano nel complesso più che doppi rispetto a quelli necessari a Porto Verde. I risultati in Tabella 8 non tengono conto del materiale recuperabile dalla barriera centrale.

**Tabella 8 - Volumi impiegati per costruire il reef. Tali valori cambiano notevolmente da un'alternativa all'altra.**

Sito	Volumi [m <sup>3</sup> ]		
	Braccio Est	Braccio Ovest	Totale
Porto Verde	1400	2800	4200
	<b>Pennello e Connettore Est</b>	<b>Pennello e Connettore Ovest</b>	<b>Totale</b>
	0	500	500
Cattolica	4600	4100	8700
	<b>Demolizione parziale</b>	<b>Demolizione totale</b>	
	850	1200	

### Costi dell'intervento

Si sono considerate due alternative costruttive riguardanti il materiale. La prima ipotesi consiste nell'impiegare una gettata di massi come vuole la più comune pratica marittima per opere a cresta bassa. La seconda ipotesi invece prende in esame la possibilità di costruire il reef in *geocontainers* (Matteotti et al., 2006). Si sono stimati i costi sulla base del Bollettino Ufficiale Regionale del 29 giugno 2009, estratto in Tabella 9. I costi a lavori conclusi, comprendenti ogni onere e spesa per il trasporto e la posa in opera sono riportati in Tabella 10.

**Tabella 9 - Voci di costo considerate, come da Bollettino Ufficiale Regionale del 29 giugno 2009.**

1	Pietrame 1° categoria 500-1000 kg	60.00	€/m <sup>3</sup>
2	Demolizione scogliere	29.30	€/m <sup>3</sup>
3	Geotessuto di fondazione	4.95	€/m <sup>3</sup>
4	<i>Geocontainers</i>	70.00	€/m <sup>3</sup>

**Tabella 10 - Tabella riassuntiva dei costi dell'intervento per le varie ipotesi e nei vari scenari di posizionamento del reef.**

Sito	Alternativa progettuale	Materiale	Costo
Porto Verde	Senza pennelli/connettori in pietrame	<i>Pietrame</i>	267.000 €
		<i>Geotubi</i>	290.000 €
	Con pennelli/connettori in pietrame	<i>Pietrame</i>	302.000 €
		<i>Geotubi</i>	325.000 €
Cattolica	Con riduzione della quota della cresta a -1.50 m	<i>Pietrame</i>	568.000 €
		<i>Geotubi</i>	620.000 €
	Con rimozione della barriera centrale	<i>Pietrame</i>	578.000 €
		<i>Geotubi</i>	630.000 €

### Considerazioni di fattibilità

Dall'analisi della Tabella 8 si evidenzia un notevole sbilancio di volume che propende maggiormente verso il caso in cui l'opera venga realizzata davanti a Cattolica piuttosto che davanti a Porto Verde. Questo sbilancio si ripercuote, com'era lecito aspettarsi, anche sui costi, Tabella 10. Questo aspetto è senz'altro un deterrente a costruire il reef davanti a Cattolica e purtroppo non è semplice ridurre il volume richiesto da progetto, perché il fondale locale in quella parte della spiaggia è pressoché uniforme e posto ad una profondità importante. A questo inconveniente occorre aggiungere la presenza di barriere emerse a cresta medio-alta davanti al reef, le quali non permettono l'esercizio del surf in tutta sicurezza poiché sussiste sempre per il surfista il rischio di caduta nei pressi delle scogliere. E' pur vero che anche la spiaggia davanti a Porto Verde è costituita da ciottoli e da una gettata di massi retrostante che protegge i vicini edifici dal rischio allagamento, ma la distanza dell'opera rende del tutto nullo il rischio di collisione del surfista contro tali scogli. Tuttavia il reef inserito nel contesto di Cattolica avrebbe come coronamento una vasta spiaggia in sabbia fine nonché l'acquario "Le Navi" e ciò concorrerebbe sicuramente ad apportare nuovi traffici turistici. Certamente questo vantaggio si avrebbe anche nel caso di un posizionamento del reef nell'altra località designata vista la relativa vicinanza (anche se in maniera meno marcata). In definitiva perciò appare più vantaggiosa la collocazione del reef davanti a Porto Verde. In tal caso sono presenti due alternative progettuali e constano nella costruzione o meno di una baia con pennelli e connettori attorno al reef. Guardando sempre alla Tabella n.10 tutto farebbe propendere alla scelta della prima alternativa (quella cioè in cui il reef si trova sprovvisto di pennelli e connettori) poiché la più economica delle due. Il divario comunque ammonta a circa 35.000 € ed occorre rapportare questa somma ai benefici che si avrebbero confinando l'opera all'interno di una baia di pennelli e connettori: di sicuro si otterrebbero correnti lungo riva di minor intensità perché fermate o comunque ostacolate nel loro percorso dalla presenza di opere soffolte. Queste opere provocano senz'altro una minor erosione del fondale nella zona attigua al reef. Vi è da chiedersi allora se risparmiare qualche decina di migliaia di euro all'attualità sia conveniente o piuttosto convenga provvedere con pennelli e connettori, spendendo certamente di più, ma limitando l'erosione del litorale. Pensando ai costi necessari per ripascere

una spiaggia (in media da 10 a 20 € a metro cubo di sabbia) e pensando al volume necessario per effettuare un ripascimento su questo tratto di costa potrebbe certamente essere più conveniente la seconda ipotesi, benché più dispendiosa all'attualità. Scegliamo dunque di prendere in esame l'ipotesi numero 2 davanti a Porto Verde. Il costo delle due alternative relative al materiale da costa appartiene ad una forbice non troppo ampia e le due ipotesi sono altamente competitive. Tuttavia costruire in *Geotextile Sand Containers* (GSC) è senz'altro una scelta più indicata, anche a fronte di un maggiore spesa iniziale, e questo perché viene offerta maggior sicurezza ai surfisti e perché può essere facilmente colonizzato dalla flora e dalla fauna acquatica. Il giudizio di chi scrive pertanto porterebbe a scegliere l'alternativa in cui *l'Artificial Surfing Reefs* venga costruito in geosacchi, materiale morbido e poco impattante dal punto di vista ambientale. Stando a queste scelte, il costo dell'opera potrebbe essere, da una sommaria stima, pari a 325.000 €.

## Simulazione dell'idrodinamica indotta con il modello numerico MIKE21

### *Predisposizione della simulazione numerica*

Il codice di calcolo bidimensionale utilizzato è il MIKE 21 versione Flexible Mesh, Release 2009, in particolare il modulo SW, che simula il trasferimento delle onde da largo verso riva e la propagazione sottocosta tenendo conto dei fenomeni di rifrazione, diffrazione e *shoaling*, e il modulo HD, che risolve le equazioni del moto alle differenze finite utilizzando uno schema implicito ADI (Alternating Direction Implicit) con una precisione del secondo ordine (Abbot et al., 1973).

La batimetria del fondale è stata ricostruita grazie ad un rilievo di tipo *multibeam* dell'area d'interesse risalente al 2006. Si è quindi introdotta la geometria della configurazione prescelta, ossia l'ipotesi progettuale a Porto Verde, si veda Figura 17. Al fine di determinare gli effetti indotti dall'ASR, è importante eseguire la simulazione andando a considerare una fascia costiera che sia la più ampia possibile (compatibilmente con le dimensioni dell'intervento stesso). La zona di interesse si estende in direzione largo fino ad una distanza di circa 1.4 km dalla linea di riva (fino alla batimetrica 5m ove giungono i rilievi disponibili) e per 3 km circa parallelamente alla riva (da 1 km a Nord a 1.7 km a Sud dalla spiaggia di Portoverde).

I dati sedimentologici, utili alla stima della scabrezza del fondale e quindi alla corretta riproduzione dell'attenuazione dell'onda e delle correnti, sono derivati dalla campagna di rilevazione geologica e granulometrica condotta da IDROSER (1982). La rappresentazione semplificata dei sedimenti considera cinque diversi diametri medi  $D_{n50}$  al variare della quota del fondale: sulla spiaggia emersa,  $h > 0$ , si è assunto  $D_{n50} = 0.30$  mm; da 0 a - 2.0 m di profondità si è assunto  $D_{n50} = 0.25$  mm; da - 2.0 a - 5.0 m invece si è optato per una dimensione dei granuli pari a 0.20 mm e così via procedendo da - 5.0 a - 8.0 con un diametro di 0.15 mm fino a mantenere, per isobate inferiori a - 8,00 m, una dimensione caratteristica pari a 0.10 m.

La scabrezza secondo Nikuradse  $n$  viene ricondotta alla mappatura dei  $D_{n50}$  del fondale

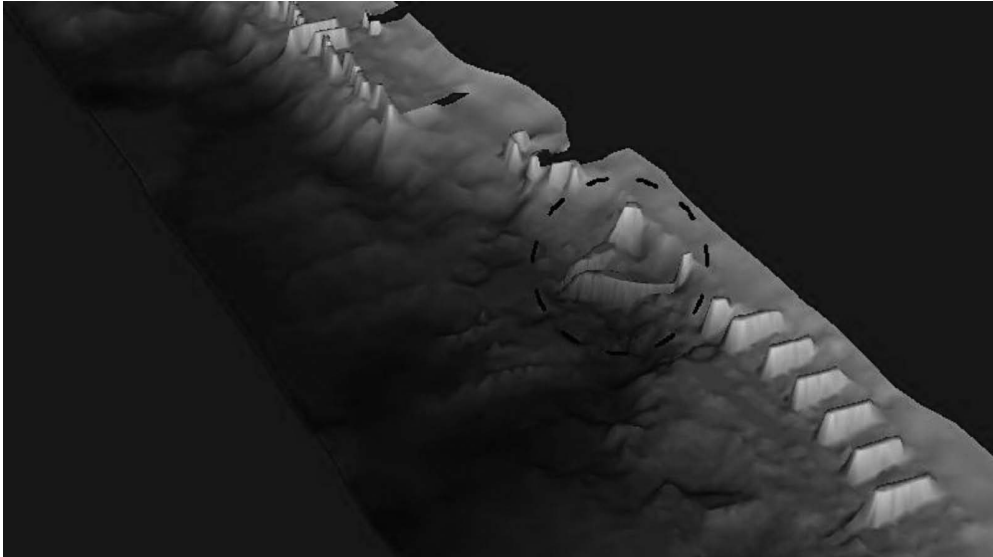
$$n = 2 \cdot D_{n50} \quad (17)$$

ed i corrispondenti coefficienti di Manning sono riferiti alla scabrezza  $n$ :

$$m = 26 \cdot \left( \frac{1}{n} \right)^{1/6} \quad (18)$$

Sul contorno di largo del modulo SW si impongono una serie di condizioni ondose irregolari e direzionali di uno spettro Jonswap. Questa impostazione consente di determinare in maniera realistica il campo di *radiation stress*, il *wave set-up*, e le condizioni al contorno da impostare nel modello di circolazione idraulica. Le condizioni scelte, riportate in Tabella 11, sono state desunte dalla precedente analisi del clima meteomarinario, selezionando due altezze d'onda rappresentative, il periodo tipico che possa conciliarsi con l'attività del surf e una serie di direzioni sufficiente alla verifica del comportamento dell'ASR. In questa simulazione sono trascurati gli effetti delle maree le quali escursioni sono solitamente contenute entro  $\pm 0.4$  m, mentre in Figure 15 e 16 si sono evidenziati i livelli estremi,  $\pm 0.7$  m. La Tabella 10 include le condizioni al largo, che sono state trasferite da largo (-15 m) a riva su una batimetria più ampia sempre col modulo SW, e le condizioni estratte da tali simulazioni ed imposte sul contorno al largo della zona di interesse (-5.0 m, Fig. 17).

I parametri di frangimento assunti nel modulo SW sono i valori suggeriti:  $\gamma_I = 1.0$  (controlla il frangimento



**Figura 17 - Modello batimetrico implementato all'interno del codice MIKE21. Si può notare il reef coi due bracci all'interno del cerchio tratteggiato.**

per ripidità dell'onda),  $\gamma_2=1.0$  (controlla il frangimento per profondità del fondale) and  $\beta=0.8$  (indica la dissipazione per frangimento).

Nel modulo HD si impone al contorno lato mare la condizione di livello costante.

### **Risultati della simulazione**

Si riportano alcuni risultati principali della simulazione, in termini di coefficiente di trasmissione  $K_t$  nell'area protetta (Tab. 11) e mappe di intensità e direzione delle onde e delle correnti (Figg. 18 ÷ 23).

L'ASR dimostra un'efficacia nella riduzione delle onde incidenti paragonabile a quella delle tipiche barriere a cresta bassa (Van der Meer et al., 2005) con valore medio del  $K_t$  pari al 47%, con punte massime del 59% in corrispondenza di onde di 1.25 m a largo con obliquità di 60° N.

**Tabella 11 - Condizioni ondose simulate. Si riportano i dati a largo ( $H_0, \beta_0, T_0$ ) e i dati incidenti in prossimità della riva ( $H_i, \beta_i, T_i$ ). Inoltre è riportato anche il coefficiente di trasmissione ( $K_t$ ).**

	$H_0$ (m)	$\beta_0$ (°N)	$T_0$ (s)	$H_i$ (m)	$\beta_i$ (°N)	$H_t$ (m)	$K_t$
1	1.25	0°	6	1.18	2°	0.50	42%
2	1.25	30°	6	1.15	28°	0.65	56%
3	1.25	60°	6	1.10	55°	0.65	59%
4	1.25	90°	6	1.00	80°	0.55	55%
5	1.25	330°	6	1.14	338°	0.55	48%
6	2.25	0°	6	1.90	2°	0.85	45%
7	2.25	30°	6	1.90	28°	0.85	45%
8	2.25	60°	6	1.70	55°	0.70	41%
9	2.25	90°	6	1.60	79°	0.65	40%
10	2.25	330°	6	1.80	338°	0.75	42%

L'andamento e la distribuzione dell'altezza d'onda sopra il reef risulta quanto mai simmetrica e questo ben si combina con la necessità di avere onde abbastanza regolari che possono essere frante al loro passaggio sopra la struttura. Possiamo seguire in Figura 18 il decadimento dell'onda per la condizione ondosa n°2 di Tabella 11

(mareggiata di modesta intensità da Bora): l'altezza d'onda decade da largo ad 1.10-1.20 m circa a 500 m dal reef, frange sulla scarpata del reef e si mantiene quindi per una fascia di circa 50 m dietro il reef, contraddistinta da una generale zona di calma.

Per una mareggiata più intensa sempre da Bora relativa alla condizione ondosa n°7 (Fig. 19), a largo l'altezza d'onda è superiore a 1.80 m, frange parzialmente portandosi a 1.30 m nella parte antistante il reef e infine completa sul reef il frangimento. Anche in questo caso la distribuzione dell'altezza d'onda è per lo più simmetrica rispetto all'asse di orientazione della struttura e lascia un'ampia zona a tergo del reef dove l'agitazione ondosa residua è modesta ( $H_s$  tra 0.6 e 0.8 m).

La Figura 20 mostra gli effetti dovuti ad una condizione ondosa come quella n° 10 in Tab. 11, caratterizzata da un'obliquità molto diversa ( $\beta_o = 330^\circ N$ ). Si ha un decadimento dell'altezza d'onda del tutto simile al caso precedente, mentre si evidenzia molto bene la rifrazione ondosa in prossimità della micro-baia creata dal reef e dal sistema di pennelli e connettori sommersi.

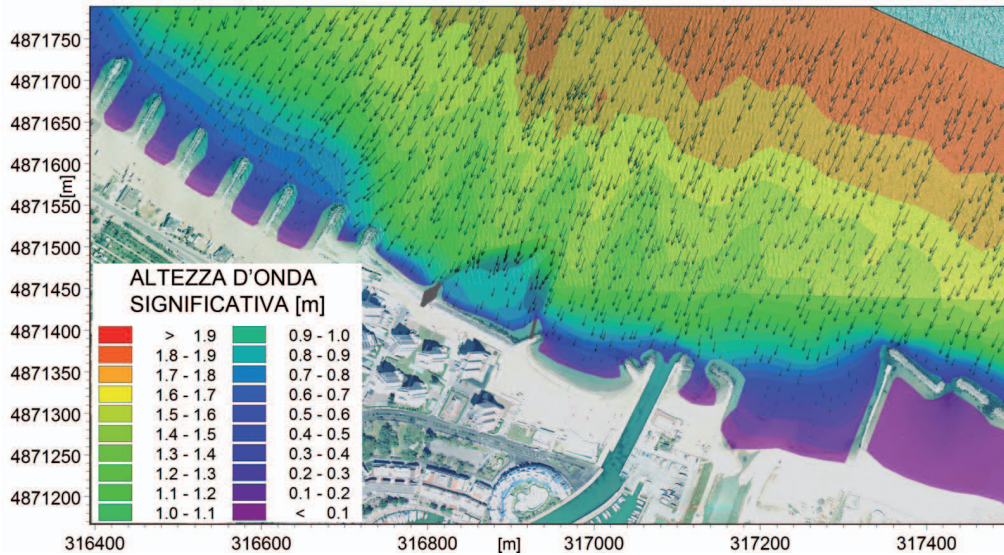


Figura 19 - Mappatura dell'onda significativa la condizione ondosa n°7 ( $\beta_o = 30^\circ N$ ,  $H_o = 2.25$  m).

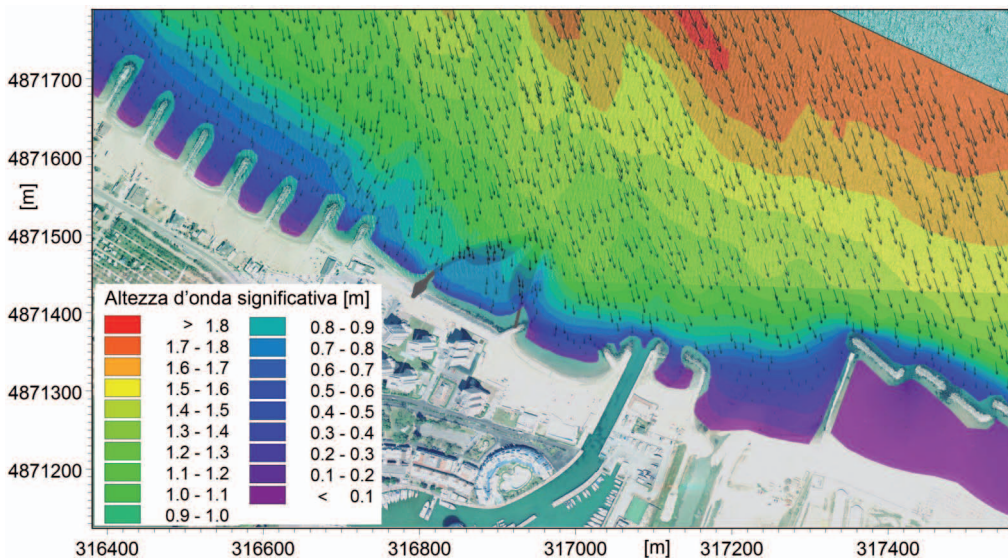


Figura 20 - Mappatura dell'onda significativa per la condizione ondosa n° 10 ( $\beta_o = 330^\circ N$ ,  $H_o = 2.25$  m).

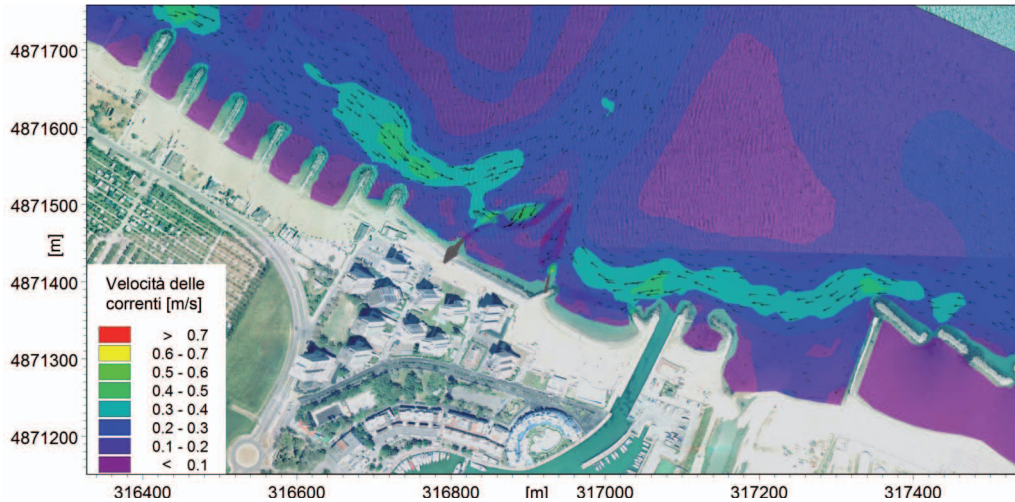


Figura 21 - Mappatura della circolazione idrodinamica mareggiata per la condizione ondosa n°2 ( $\beta_o = 30^\circ$  N,  $H_o = 1.25$  m).

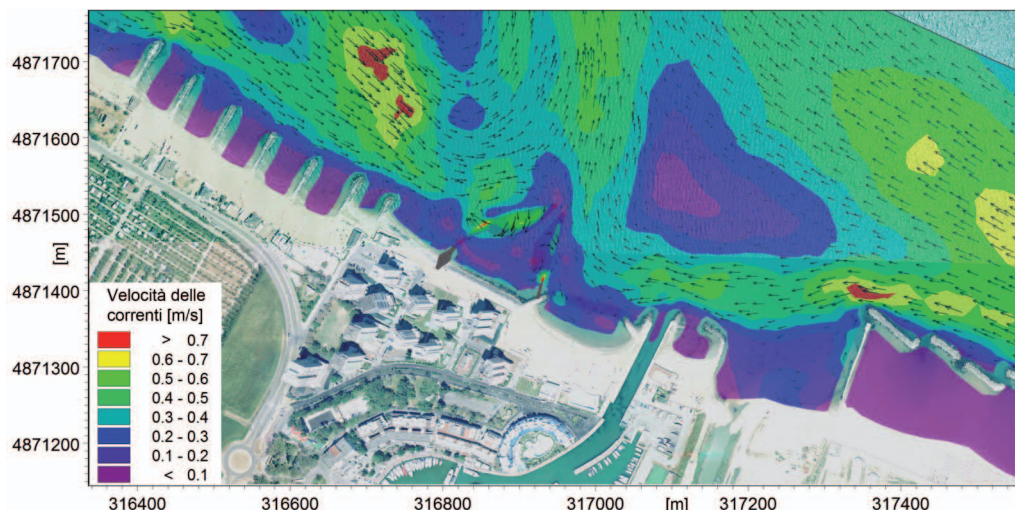


Figura 22 - Mappatura della circolazione idrodinamica per la condizione ondosa n°7 ( $\beta_o = 30^\circ$  N,  $H_o = 2.25$  m).

Per quanto riguarda la circolazione idrodinamica possiamo attenerci alle Figure 21+23. Per la condizione ondosa n° 2 in Tabella 11, la Figura 21 mostra una moderata corrente di ritorno (tra 0.2 e 0.3 m/s) avente la medesima direzione del canale di *rip* e dell'asse di orientazione della struttura. A tergo dell'opera si crea una zona di calma con velocità molto basse (tra 0 e 0.2 m/s), contornata da correnti lungo riva di intensità più sostenuta (tra 0.4 e 0.5 m/s) che tuttavia non destano particolare preoccupazione ai fini della sicurezza per i bagnanti.

La velocità di tali correnti si acuisce in prossimità del connettore Est (0.5 m/s), dove si forma anche qui una modesta corrente di ritorno. La *rip-current* in questione potrebbe creare non pochi problemi al connettore sommerso ed al pennello in pietra, dovuti ad un'eccessiva azione erosiva. Inoltre, in corrispondenza del braccio Ovest appare un vortice di ampiezza di circa 100 m che può indurre a turbolenza locale, contraddistinto da un aumento della velocità delle correnti fino a 0.6 m/s. Se aumentiamo l'altezza d'onda a largo e quindi consideriamo la condizione ondosa n° 7 in Tabella 11, il vortice aumenta la sua ampiezza e si sposta verso largo, a circa 300-350 m dal reef in una zona tuttavia non direttamente accessibile dai surfisti e dai bagnanti. I valori di velocità della corrente di ritorno sopra il reef rimangono tuttavia confinati tra 0.2 e 0.5 m/s ed aumentano mano a mano che ci spostiamo su fondali maggiori.



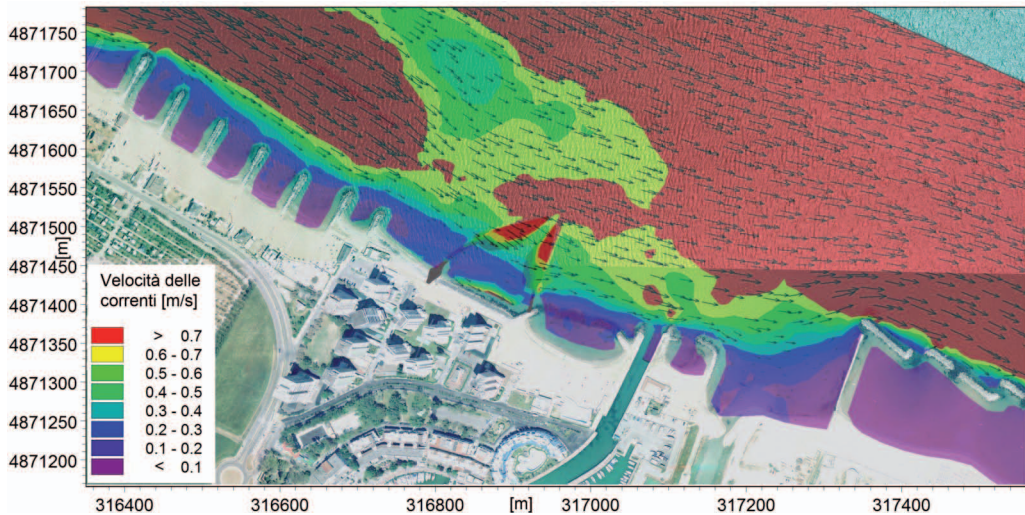


Figura 23 - Mappatura della circolazione idrodinamica per la condizione ondosa n° 10 ( $\beta_o = 330^\circ$  N,  $H_o = 2.25$  m).

Per quanto riguarda la circolazione idrodinamica possiamo attenerci alle Figure 21+23. Per la condizione ondosa n° 2 in Tabella 11, la Figura 21 mostra una moderata corrente di ritorno (tra 0.2 e 0.3 m/s) avente la medesima direzione del canale di *rip* e dell'asse di orientazione della struttura. A tergo dell'opera si crea una zona di calma con velocità molto basse (tra 0 e 0.2 m/s), contornata da correnti lungo riva di intensità più sostenuta (tra 0.4 e 0.5 m/s) che tuttavia non destano particolare preoccupazione ai fini della sicurezza per i bagnanti.

La velocità di tali correnti si acuisce in prossimità del connettore Est (0.5 m/s), dove si forma anche qui una modesta corrente di ritorno. La *rip-current* in questione potrebbe creare non pochi problemi al connettore sommerso ed al pennello in pietra, dovuti ad un'eccessiva azione erosiva. Inoltre, in corrispondenza del braccio Ovest appare un vortice di ampiezza di circa 100 m che può indurre a turbolenza locale, contraddistinto da un aumento della velocità delle correnti fino a 0.6 m/s. Se aumentiamo l'altezza d'onda a largo e quindi consideriamo la condizione ondosa n° 7 in Tabella 11, il vortice aumenta la sua ampiezza e si sposta verso largo, a circa 300-350 m dal reef in una zona tuttavia non direttamente accessibile dai surfisti e dai bagnanti. I valori di velocità della corrente di ritorno sopra il reef rimangono tuttavia confinati tra 0.2 e 0.5 m/s ed aumentano mano a mano che ci spostiamo su fondali maggiori.

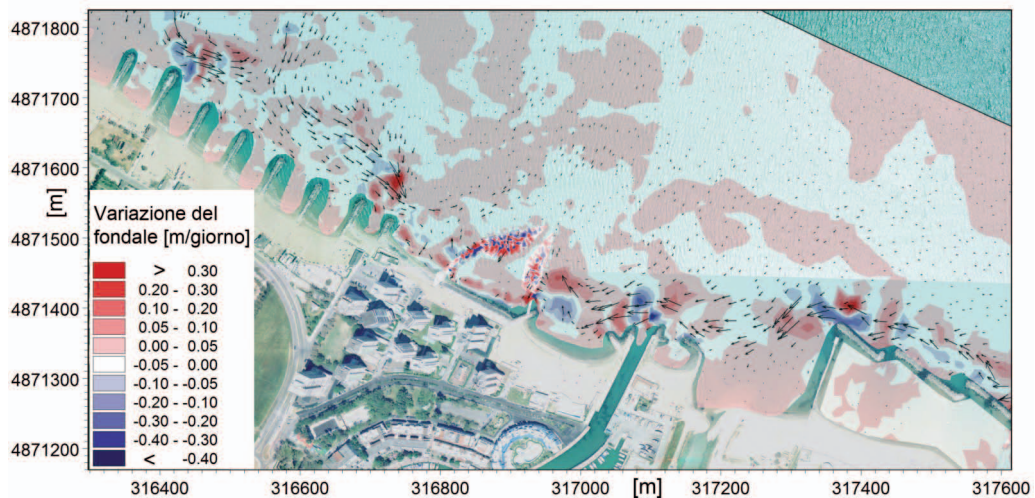


Figura 24 - Mappatura della variazione del fondale per la condizione ondosa n° 2 ( $\beta_o = 30^\circ$  N,  $H_o = 1.25$  m).

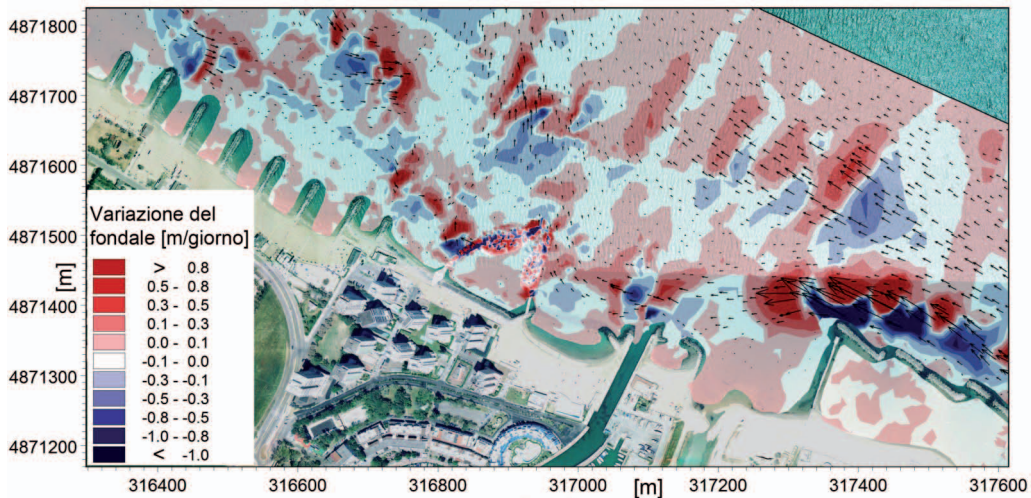


Figura 25 - Mappatura della variazione del fondale per la condizione ondosa n° 7 ( $\beta_o = 30^\circ \text{ N}$ ,  $H_o = 2.25 \text{ m}$ ).

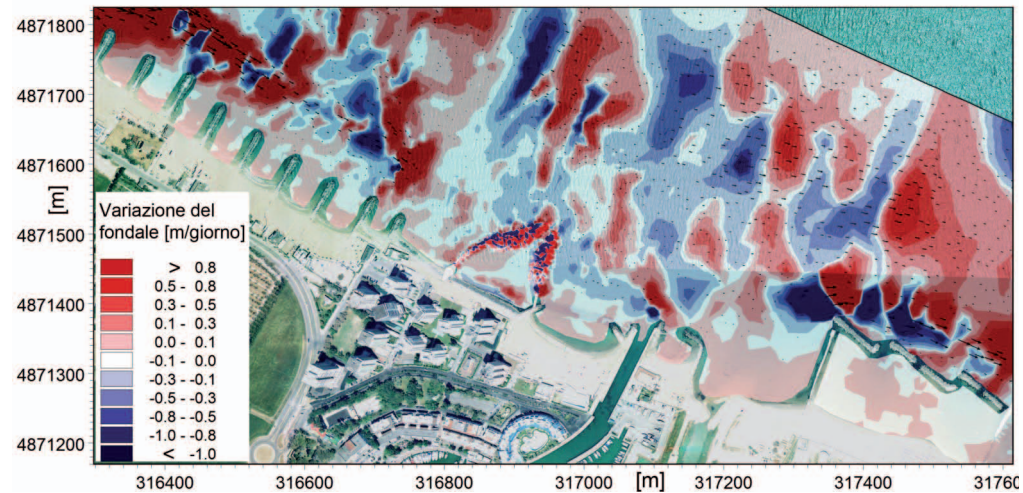


Figura 26 - Mappatura della variazione del fondale per la condizione ondosa n° 10 ( $\beta_o = 330^\circ \text{ N}$ ,  $H_o = 2.25 \text{ m}$ ).

In Figura 23, la quale si riferisce alla condizione ondosa n° 10 in Tabella 11, si può osservare la formazione di una corrente di verso parallelo alla linea di costa con punte di velocità anche attorno a 0.8 m/s, in una zona a largo del *reef* dove, presumibilmente, i surfisti possono collocarsi per catturare l'onda da cavalcare. Questa corrente può rappresentare una limitazione non piccola all'esercizio del *surf*.

### *Effetti morfodinamici delle opere*

Si sono infine predisposte simulazioni numeriche morfodinamiche accoppiando i moduli SW e HD con il modulo ST-Q3. Il modulo di trasporto solido MIKE 21 ST-Q3 calcola il tasso di trasporto solido di materiali non coesivi ed il valore istantaneo iniziale di modificazione del fondo per effetto dell'azione combinata di onde e correnti. Implementa un algoritmo di calcolo deterministico basato sul modello di Engelund e Fredsoe (1976) e valuta separatamente il contributo dei sedimenti trascinati sul fondo e di quelli movimentati in sospensione. La tabella necessaria al calcolo del trasporto solido è stata predisposta sulla base della teoria empirica di Doering e Bowen (1995) che si applica a onde sia frangenti sia non frangenti. Si è considerato l'ASR non erodibile su di un fondale a sedimentologia costante ( $D_{n50} = 0.15 \text{ mm}$ ).

Essendo fuori dallo scopo del presente lavoro una valutazione precisa degli effetti indotti sul trasporto solido

rispetto al clima meteo marino annuale, si è analizzato il funzionamento delle opere per le condizioni di progetto (condizioni n° 2, 7 e 10 in Tab. 11). La durata della simulazione è stata fissata a 12 ore al fine di registrare la sola tendenza evolutiva del fondale per sistema di onde e correnti a regime.

Si riportano nelle Figure n. 24+26 le mappe delle variazioni del fondale indotte dalla presenza dell'ASR rispettivamente per le onde n. 2, 7, e 10 in Tabella 11. In tutte e tre le condizioni si ha un modesto accumulo di materiale a riva del reef e nelle zone adiacenti. Si evidenzia la formazione di fosse laterali nelle zone periferiche del reef, a ridosso dei pennelli sommersi, laddove lo scontro tra *feeder currents* e correnti lungo riva determina un alto grado di turbolenza. E' opportuno pertanto prevedere la posa di una protezione al piede per evitare problemi di instabilità dei pennelli stessi.

Occorre infine esaminare gli effetti che il reef provoca sul fondale all'ingresso della darsena turistica di Porto Verde. Nel caso della condizione ondosa n°10 di Tabella 11, si nota la tendenza alla formazione di una barra da Sud-Est a Nord-Ovest (Fig. 26) su fondale compreso tra -4.5 e -5.0 m. La formazione della barra non desta particolare preoccupazione sia per i modesti pescaggi delle barche che usufruiscono del porto in escursioni mareali estremamente limitate sia per l'ostacolo parziale all'ingresso al porto per le barche che provengono da Nord-Est.

Per le condizioni di progetto si registra quindi una generale tendenza all'accumulo di sedimenti a riva dell'ASR, che sembra capace di stabilizzare il profilo di spiaggia anche durante mareggiate intense, e la formazione di fosse erosive al piede dei pennelli sommersi, i cui effetti vanno contenuti con una adeguata protezione del fondale adiacente.

## Conclusioni

La realizzazione di un ASR passa necessariamente per la definizione di una serie di variabili progettuali molto complicate da definire in funzione della sua duplice funzionalità di difesa costiera e di promozione del surf. L'approccio al problema della progettazione di un ASR che viene adottato in questo articolo passa attraverso:

- una attenta analisi delle grandezze e delle variabili progettuali;
- una progettazione di massima, basati su criteri empirici e risultati pregressi ottenuti con modellazione numerica e fisica;
- formulazione di più alternative progettuali;
- scelta dell'alternativa più confacente, basandosi anche su criteri di costo e di fattibilità;
- verifica dell'alternativa scelta, mediante modellazione numerica con codice MIKE 21.

Per iniziare, nella progettazione di un reef artificiale non si può prescindere dal confronto con i reef naturali, di cui sono note le componenti batimetriche principali. Anzitutto occorre definire quand'è che l'onda è "surfabile", vale a dire quand'è che essa possiede determinate caratteristiche al frangimento. L'onda deve frangere simmetricamente, deve possedere una altezza ed una forma del frangente convenienti alla categoria del surf che si vuole eseguire. Questi requisiti sono soddisfatti adottando una appropriata quota in cresta del reef nonché un adeguato profilo dei bracci, in maniera tale da regolare gli effetti rifrazione e *shoaling* (su bracci e *focus*) che si generano col passaggio dell'onda sulla struttura. Inoltre deve sussistere un legame adeguato tra celerità d'onda e velocità del surfista mediante l'angolo di *peel*, cui è legata l'abilità che il surfista può dimostrare e quindi il livello di sicurezza da assumere per lo stesso. Tale legame può essere regolato dall'orientazione del reef e dall'angolo di apertura dello stesso e cioè, intrinsecamente, dall'orientazione dei bracci rispetto alla direzione ondosa incidente. Infine, la circolazione idrodinamica sopra il reef influenza non poco il processo di frangimento: un fenomeno fisico importantissimo da tenere in considerazione è la nascita delle correnti di ritorno, che possono spingere verso largo la linea dei frangenti, inducendo al frangimento onde di altezza maggiore su fondali maggiori, diminuendo così pericolosamente l'angolo di *peel*. Allo stesso tempo però, le correnti di ritorno, generate dallo scontro tra quelle che nascono lungo il reef e quelle lungo riva, se di modesta intensità, possono essere sfruttate dai surfisti per raggiungere più agevolmente la zona di partenza. Nella modulazione dell'intensità delle correnti è necessario introdurre nel reef un canale centrale la cui larghezza, inclinazione delle sponde ed angolo di apertura interna sono legati alla velocità della corrente di ritorno che lo attraversa. Infine occorre considerare, nel processo di interazione tra l'opera ed il litorale, gli effetti geomorfologici indotti sulla costa, la cui entità è prevedibile con formule empiriche almeno per alcuni casi particolari ed in una prima fase di progetto.

Esaminate tutte le variabili progettuali in gioco, si è passati al lato pratico ipotizzando una possibile realiz-

zazione sul litorale romagnolo, alla foce del fiume Conca. La definizione della geometria di progetto (quota della cresta, pendenza delle sponde, angolo di apertura del *reef*, canale centrale) è subordinata:

- al rilievo batimetrico della spiaggia sommersa (rilievo *multibeam* del 2006);
- alla conoscenza della natura e della consistenza granulometrica del litorale, che ha evidenziato un  $D_{n50}$  abbastanza grossolano ed una composizione mineralogica della sabbia in carbonati, quarzo e feldspati.
- alla verifica a liquefazione, quale fenomeno importante da tenere in considerazione ed altresì da scongiurare. La verifica, eseguita mediante il metodo *CNR-GNDT*, ha restituito esito positivo per quanto attiene al coefficiente di sicurezza, sempre ampiamente maggiore a quello limite;
- alla ricostruzione del clima meteomarinario a largo, in termini di frequenza relativa di accadimento, tramite l'analisi delle registrazioni ondametrische ed anemometriche;
- all'analisi critica del clima ricostruito, determinando l'effettiva fattibilità dell'opera in base alle caratteristiche fondanti dell'onda ( $H_s$ ,  $T_s$ ,  $\xi$ , direzione).

Una volta definita la geometria del *reef*, che rimane la medesima per entrambe le ipotesi di collocazione, i siti dove realizzare l'opera sono essenzialmente due:

davanti all'acquario "Le Navi" di Cattolica. Per l'inserimento del *reef* in questo contesto è necessario modificare l'attuale assetto di barriere emerse davanti alla spiaggia e, nella fattispecie, vengono prese in considerazione due alternative:

- con abbassamento di due massi della barriera allineata con il canale di rip e riduzione della cresta da +1.5 m a -1.5 m rispetto al medio mare;
- con rimozione totale della medesima barriera.

La scelta di una piuttosto che l'altra alternativa si basa sia su considerazioni circa la sicurezza del surfista ma anche sull'esigenza di proteggere la costa dagli attacchi ondosi. Si è visto come, rimuovendo totalmente la barriera centrale, il coefficiente di trasmissione aumenti ( $K_t=30\%$ ) rispetto alla riduzione della quota in cresta ( $K_t=21\%$ ) ed ancor più marcatamente rispetto alla condizione attuale ( $K_t=21\%$ )

In entrambe le alternative considerate tuttavia la volumetria appare piuttosto consistente, portando a maggiori costi di realizzazione.

Davanti all'abitato di Porto Verde (Misano Adriatico), in una zona caratterizzata da una spiaggia in ciottoli e da una retrostante difesa radente, certamente meno appetibile dal punto di vista dei bagnanti. Anche in questo caso si sono pensate a due alternative:

- il solo posizionamento del *reef* davanti alla difesa radente;
- la creazione di una micro-baia con pennelli e connettori sommersi (alcuni dei quali già esistenti) per contenere gli effetti del diverso *wave set up* indotto sulla costa.

La volumetria, in forza dei fondali meno profondi rispetto a Cattolica, appare meno elevata e quindi minori costi di realizzazione.

La bontà delle due ipotesi di collocazione e delle alternative progettuali da contemplare si deve fondare su ragionamenti di costo e di salvaguardia del litorale. Si è visto come il volume dell'ASR realizzato davanti a Cattolica sia più del doppio rispetto a quello davanti a Porto Verde e ciò ha portato a escludere già in partenza questa ipotesi, prediligendo quella relativa a Porto Verde. Di questa, ricordando la sua funzione di barriera a cresta bassa per la protezione della costa, è senz'altro più indicata la seconda alternativa, quella che contempla la costruzione di una micro-baia con pennelli e connettori sommersi, al fine di contenere gli effetti del diverso *wave set-up* in una zona circoscritta alla sola area *interessata* dal *reef*. Infine, la scelta del materiale. Costruire in *geocontainers* rispetto all'impiego di massi, è senz'altro più dispendioso inizialmente ma non per questo meno vantaggioso dal punto di vista dei surfisti (per via della loro incolumità in caso di impatto con la barriera), del disturbo arrecato al fondale marino e della capacità delle specie acquatiche colonizzare il *reef*.

Il funzionamento del *reef* come da progettazione di massima viene quindi verificato mediante simulazione numerica, com'è stato effettuato implementando il codice bidimensionale MIKE21 attraverso i suoi moduli SW e HD (per la trasformazione delle onde da largo a riva e per la risoluzione alle differenze finite delle equazioni del moto). I risultati sono stati ottenuti simulando alcune mareggiate, dove sono state variate l'altezza d'onda e l'obliquità della stessa rispetto a riva. L'esame delle onde trasmesse a tergo dell'opera riporta un buon funzionamento del *reef* nella sua funzione di protezione costiera ( $K_t=47\%$  in media), ipotesi avvalorata anche dall'analisi morfodinamica condotta con le medesime

condizioni ondose di progetto attraverso l'accoppiamento dei moduli HD e SW con ST-Q3. Per la sua funzione prettamente ricreativa, i risultati riportati in quest'articolo evidenziano sostanzialmente alcuni punti:

- la distribuzione dell'altezza d'onda sopra il *reef* è quasi sempre simmetrica, sia per quanto attiene alle mareggiate provenienti dalla direzione cui il *reef* è orientato, sia per obliquità molto diverse (come, ad esempio, da Maestrale). In quest'ultimo caso si registra un forte effetto di rifrazione da largo a riva che tende ad orientare i raggi d'onda secondo l'orientazione del *reef*;
- a tergo dell'ASR si registra una sostanziale zona di calma, con altezze d'onda abbastanza contenute;
- si creano correnti di ritorno che si sviluppano attraverso il canale centrale e nelle zone periferiche. Le velocità delle correnti non sono tali da poter destare preoccupazioni e quindi possono essere impiegate dai surfisti per raggiungere la zona dei frangenti;
- in taluni casi possono crearsi dei macro-vortici. La velocità della corrente e la distanza da riva è tale da non preoccupare dal punto di vista della sicurezza dei bagnanti e dei surfisti;
- le correnti parallele alla costa non sono particolarmente intense, fatto salvo il caso in cui l'attacco ondoso proviene da Maestrale (che rimane comunque una situazione estrema, in cui l'obliquità rispetto a riva è massima), in corrispondenza del quale si formano turbolenze localizzate alle teste dei pennelli e correnti a tergo del *reef* con velocità anche maggiori a 0.7 m/s.

Per quanto riguarda la sua funzione di difesa costiera, i risultati delle simulazioni condotte con mareggiate da Bora, mostrano che vi è una tendenza all'accumulo di materiale a tergo del *reef* e nelle zone adiacenti, contemporaneamente alla formazione di fosse erosive a ridosso dei pennelli sommersi che suggeriscono l'impiego di una adeguata protezione al piede per evitare lo spiaggiamento delle opere stesse. I dati riguardanti la mareggiata da Maestrale mostrano una tendenza all'accumulo per la spiaggia dietro il *reef* e ad una erosione per il fondale lato mare nelle immediate vicinanze dell'opera. Tali effetti sono comunque di lieve entità se confrontati alle fosse ed alle barre che vengono a formarsi più a largo, in una zona però a fondali ben più maggiori. Inoltre, gli effetti dell'ASR davanti all'ingresso del porto turistico non ostacolano le manovre di accesso alla darsena da parte delle imbarcazioni. Tutto ciò considerato, si può dire che l'opera, così progettata e verificata in sede di simulazione numerica, risponde bene al clima tipico del sito, può fornire un notevole contributo alla salvaguardia della costa e permette di aumentare le condizioni di surfabilità del paraggio, all'attualità peraltro abbastanza scarse.

## Glossario

*Line up*: la zona in cui, ci si predispone a catturare l'onda e coincide con l'inizio del processo di frangimento dell'onda, rendendo la parete ripida e surfabile.

*Spot*: viene indicato il luogo ove le condizioni ondose permettono di praticare il surf. Esiste una classificazione per gli spot, basata sulle caratteristiche dei fondali: *beach break* (fondale sabbioso), *rocky break* o *point break* (fondale roccioso), *reef break* (barriera corallina) e infine *artificial break*, ossia punto di rottura dovuto a barriere costruite artificialmente.

*Swell*: indica una mareggiata, cioè un aumento dell'altezza e della frequenza delle onde dovuto, in genere, ad una tempesta più o meno vicina alla terraferma.

*Surf break*: è una ostruzione permanente, quale una barriera corallina o una scogliera sommersa, che induce l'onda a frangere con frangente plunging e la possibilità di effettuare un tube riding.

*Take off*: manovra eseguita dai surfisti nella zona del line-up. Consiste nell'alzarsi in piedi sulla tavola quando le condizioni dell'onda lo permettono.

*Tube riding*: consiste nel transitare con la tavola tra il labbro superiore dell'onda e la parete della stessa, mentre essa collassa su se stessa per effetto del frangimento. La condizione necessaria perché si crei il tubo è che l'onda si chiuda velocemente.

*Wipe out*: indica la caduta della tavola a seguito di una manovra erronea o alla forza dell'onda.

## Ringraziamenti

Si ringrazia l'Ing. Emanuele Lancioni per aver contribuito a fornire i risultati delle elaborazioni al MIKE21 del modello dell'ASR a Cattolica.

## Bibliografia

- Abbott M.B., Damsgaard A. e G.S. Rodenhuis (1973) - *System 21, "Jupiter", a design system for modelling two-dimensional nearly horizontal flows*. Journal of Hydraulic Res., Vol. 1.
- Bancroft S. (1999) - *Performance Monitoring of the Cable Station Artificial Surfing Reef*. Tesi di laurea presso la Facoltà di ingegneria ambientale "The University of western Australia", scaricabile da <http://www2.sese.uwa.edu.au/~pattiar/surfreef/pattiaratchi.pdf>
- Battjes J. A. (1974) - *Surf Similarity*. Proceedings 14th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp: 466-480.
- Bellotti G. (2004) - *A simplified model of rip currents systems around discontinuous submerged barriers*. Coastal engineering, 51: 323-335.
- Black K. P. (1999) - *Designing the shape of the Gold Coast Reef: sediment dynamics*. Coasts e Ports '99: Challenges and Directions for the New Century; Proceedings of the 14th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 7th Australasian Port and Harbour Conference. Barton, A.C.T.: National Committee on Coastal and Ocean Engineering, Institution of Engineers, Australia, pp. 45-50.
- Black K. P. (2001) - *Artificial surfing reefs for erosion control and amenity: Theory and application*. Challenges for the 21st Century in Coastal Sciences, Engineering and Environment, Journal of Coastal Research Special Issue, 34: pp. 1-14, (ICS 2000 New Zealand).
- Black K. P. (2003) - *Numerical prediction of salient formation in the lee of offshore reefs*. Proceedings for the 3rd International Artificial Surfing Reef Conference, Raglan, New Zealand, June 23-25.
- Black K. P., Andrews C., (2001a) - *Sandy Shoreline Response to Offshore Obstacles, Part 1: Salient and Tombolo Geometry and Shape*. Journal of Coastal Research, Special Issue 29: 82-93.
- Black K.P., Andrews C., (2001b) - *Sandy Shoreline Response to Offshore Obstacles, Part 2: Discussion of Formative Mechanisms*. Journal of Coastal Research, Special Issue 29: 94-101.
- Black K. P., Mead S. T. (2001) - *Design of the Gold Coast Reef for Surfing, Public Amenity and Coastal Protection: Surfing Aspects*. Journal of Coastal Research, Special Surfing Issue, Special Issue No. 29.
- Black K. P., Hutt J. A., Mead S. T. (1998) - *Narrowneck Reef, Report 2: Surfing Aspects*. Report prepared for GCCC by Centre of Excellence in Coastal Oceanography and Marine Geology, University of Waikato and NIWA.
- Borrero J.C., Nelson C., (2003) - *Results of a comprehensive monitoring program at Pratte's Reef*. Proceedings of the 3rd International Surfing Reef Symposium, Raglan, New Zealand, June 22-25, pp 83-98.
- D'Agremond K., Van Der Meer J.W., De Jion R.J. (1996) - *Wave transmission at Low-crested structures*. Proc. 25th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 2418-2426.
- Doering J.C., Bowen A.J. (1995) - *Parametrization of orbital velocity asymmetries of shoaling and breaking waves using bispectral analysis*. Coastal Engineering, 26: 15-33.
- Engelund F, Fredsoe J. (1976) - *A sediment transport model for straight alluvial channels*. Nordic Hydrology, 7: 293-306.
- Franco L., Bellotti G. (2007) - *Design of an artificial surfing reef at S.Marinella, Rome (Italy)*. Coastal Structures 2007, Venice, pp. 389-399.
- Frost G. (2003) - *The Lessons of Pratte's Reef*. The Aesthetic Retrieved, scaricabile da [ww.theaesthetic.com/NewFiles/prattes.html](http://ww.theaesthetic.com/NewFiles/prattes.html)
- Griffith Centre for Coastal Management - GCCM (2003) - *Narrowneck reef summary of monitoring*. Baseline Data Assessment for the Northern Gold Coast Beach Protection Strategy Environmental Monitoring Program Volume 3.
- Henriquez M. (2004) - *Artificial Surfing Reef*. Thesis, Faculty of Civil Engineering of Delft University of Technology, pp. 1-20.
- Heerten G., Jackson A., Restall S., Saathoff F. (2009) - *New Geotextile Developments with Mechanically-Bonded*. 27th international Conference on Coastal Engineering, Sydney, Australia, 16-21 July 2009, pp. 2342-2355.
- Hutt J. A., Black K. P., Mead S. T. (2001) - *Classification of Surf Breaks in relation to Surfing Skill*. Special Issue of the Journal of Coastal Research on Surfing, pp. 66-81.
- Hutt J., Black K., Mead S. (1998) - *Classification of the Degree of Surfing Difficulty for Artificial Reef Design*. 2nd Annual International Artificial Surfing Reef Symposium, San Diego, April 1998.
- Jackson L, Corbett B., Tomlinson R., McGrath J., Stuart G. (2007) - *Narrowneck Reef: Review of Seven Years*

- of Monitoring*. Shore & Beach Vol. 75, No. 4, pp. 1-13.
- Lancioni E. (2010) - *Modellazione numerica bidimensionale del comportamento di un artificial surfing reef per la difesa ecosostenibile della costa a Cattolica (RN)*. Tesi di laurea Università di Bologna, Cap. 3 e 4.
- Longuet-Higgins M. S. (1982) - *Parametric Solutions For Breaking Waves*. Journal of Fluid Mechanics, 121: pp. 403-424.
- Matteotti G., Roul P. (2006) - *L'impiego dei geosintetici nelle opere di ingegneria marittima e costiera*.
- Mead S. T., Black K. P. (2001) - *Field Studies Leading to the Bathymetric Classification of World-Class Surfing Breaks*. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 29, pp. 115-130.
- Mead S.T., Black K.P. and P.J. McComb, (2001) - *Lyall Bay surfing reef feasibility study: Volume 2 - Figures*. Prepared for the Lyall Bay Reef Charitable Trust. by ASR Ltd January, 2001. 49 pp.
- Mead S. T., Black K. P., Scarfe B. E., Frazerhurst J. (2003b) - *The effect of wave focusing on surfing site selection and design at scales of intercontinental shelf to sub-tidal reef*. Proceedings for the 3rd International Artificial Surfing Reef Conference, Raglan, New Zealand, June 23-25.
- Mead S. T. (2003) - *Surfzone currents and influence on surfability*. Proceedings for the 3rd International Artificial Surfing Reef Conference, Raglan, New Zealand, June 23-25.
- Monaco S. (2008) - *Liquefazione dei terreni in condizioni sismiche*. EPC-Libri, Cap. 5.
- Pattiaratchi, C. (1997) - *Design studies for an artificial surfing reef at Cable Station, Western Australia*. Proceedings for the 1st International Surfing Reef Symposium, (Sidney, Australia), pp. 87-90.
- Pattiaratchi C. (2000) - *Design studies and performance monitoring of an artificial surfing reef: Cable Station, Western Australia*. Proc. 27th International Conference on Coastal Engineering (Sydney, Australia, ASCE).
- Pattiaratchi C., Masselink G. e Hurst P. (1999) - *Surfability of the Perth Metropolitan Coastline: An Assessment*. Proceedings of the 14th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 7th Australasian Port and Harbour Conference (Coasts and Ports '99), Perth, Western Australia, pp. 490-495.
- Pilarczyk K.W. (2003) - *Design of low-crested (submerged) structures – an overview*. Proceedings of the 6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (Colombo, Sri Lanka), pp. 1-18.
- Sayce A. (1997) - *Transformation of surfing waves on steep and complex reefs*. Hamilton, New Zeland: Department of Earth Science, The University of Waikato. Master's thesis .
- Sayce A., Black K. P., Gorman R. (1999) - *Breaking Wave Shape on Surfing Reefs*. Proceedings Coasts & Ports' 99, Vol. 2, pp. 596-603.
- Scarfe B. E. (2002) - *Categorising Surfing Manoeuvres Using Wave and Reef Characteristics*. Unpublished MSc Thesis, University of Waikato, Hamilton, New Zealand, Capp. 1 e 2.
- Scarfe B. E., de Lange W. P., Black K. P., Mead S. T. (2002) - *The influence of surfing wave parameters on manoeuvre type from field investigations at Raglan, New Zealand*. Proceedings for the Second Surfing Arts, Science and Issues Conference (SASIC 2, Ventura, California, USA), 9 November, The Groundswell Society, pp. 74-89.
- Van Ettinger H.D. (2005) - *Artificial surf reef design*. Delft University of Technology, Capp. 1, 2 e 3.
- Zanuttigh B. (2006) - *Idraulica Marittima*. edito da ALMA-DL Alma Mater Università di Bologna e depositato presso la BNCF, Cap. 4.

**Ricevuto il 15/4/2010, accettato il 20/7/2010.**