

Interazione fra onde, correnti e fondali marini: il contributo della ricerca sperimentale di laboratorio

Enrico Foti

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale
Università degli Studi di Catania
V.le A. Doria, 6 - 95125 Catania
Email: efoti@dica.unict.it

Riassunto

Il presente lavoro illustra i principali strumenti e le metodologie più innovative della ricerca sperimentale di laboratorio orientata allo studio della interazione tra onde, correnti e fondali marini.

Insieme al tentativo di presentare uno stato dell'arte esaustivo, con particolare riguardo alle conoscenze sullo strato limite al fondo di onde di mare, vengono anche evidenziati i limiti e le potenzialità di detta ricerca di laboratorio.

La memoria si conclude con alcune considerazioni di carattere generale su quelle che sono le questioni ancora aperte ad ulteriori approfondimenti tramite la ricerca sperimentale di laboratorio.

Parole chiave: interazione onde-correnti, strato limite, trasporto solido, forme di fondo, sperimentazione di laboratorio.

Abstract

This research explains the main tools and most innovative methodologies of laboratory experimental research aimed at studying the interaction of waves, currents and sea bottom.

Along with an attempt to present exhaustive literature review, with particular regard to bottom boundary layer induced by sea waves, limits and potentialities of this laboratory research are also pointed out.

The article ends with general remarks on issues that remain open to further laboratory experimental research.

Keywords: *wave-current interaction, boundary layer, sediment transport, bottom sediment formation, laboratory experimentation.*

Introduzione

Tra i numerosi moti di fluidi che si verificano in natura in prossimità di superfici di contorno, spesso identificati come moti di strati limite geofisici, una importante categoria è certamente rappresentata da quelli che si manifestano sulla piattaforma continentale, ossia su quella fascia perimetrale di ciascun continente interessata da mari relativamente poco profondi.

In tale zona il moto dell'acqua è il risultato di numerose forzanti, quali il vento, le maree, le variazioni di densità o di temperatura, i gradienti di pressione, etc. Tuttavia, se è vero che dette forzanti si combinano tra loro dando luogo a campi di velocità piuttosto complessi, è altrettanto vero che l'importanza relativa di ciascuna

di esse cambia in funzione della particolare regione della piattaforma continentale su cui si vuole focalizzare l'attenzione. Nella laguna di Venezia, per esempio, i moti mareali sono certamente dominanti e pertanto uno studio in tale zona non può prescindere dalla particolare struttura del campo di moto da essi fortemente condizionata. Nella maggior parte dei casi, tuttavia, la forzante principale è il vento che, spirando sulla superficie del mare, genera sia correnti che onde. Queste ultime, a loro volta, innescano campi di velocità e di pressione che, penetrando la colonna d'acqua, interagiscono non solo tra loro ma anche con il fondo, dando luogo a dinamiche non lineari molto complesse e talvolta, in acque basse e in presenza di fondali erodibili, anche alla formazione di strutture sedimentarie di varia scala (Grant e Madsen, 1986).

Dal quadro sopra schematicamente delineato, si intuisce la complessità del fenomeno dell'interazione tra onde, correnti e fondali marini, che può quindi essere studiato solo attraverso l'adozione di schemi drasticamente semplificativi che consentano l'identificazione dei meccanismi di base attraverso i quali interpretare successivamente anche le dinamiche più complesse.

Tra le diverse semplificazioni possibili, usualmente si parte da quella che si adotta nello studio della interazione di una onda di gravità progressiva con i fondali marini, per pervenire solo successivamente a quella che si utilizza per la descrizione di situazioni idrodinamicamente più complesse, come quelle dovute alla contemporanea presenza di onde e di correnti.

In presenza di un'onda progressiva di piccola ampiezza, come è noto, il moto si può approssimare come irrotazionale. In particolare, in acque profonde il moto orbitale delle particelle può essere assimilato ad un moto circolare il cui raggio decresce rapidamente fino ad annullarsi senza interagire con il fondo. In acque basse, invece, il moto orbitale delle particelle d'acqua è ellittico e tende a degenerare in prossimità del fondo in un moto oscillante parallelo al fondo stesso. In questo ultimo caso si può individuare, in aderenza al fondale, una regione in cui gli effetti viscosi sono rilevanti e la vorticità è elevata. Detta zona è denominata strato limite al fondo di un'onda di mare¹.

La regione della piattaforma continentale interessata dallo strato limite è particolarmente estesa. Basti pensare infatti che un'onda avente un periodo di 10 s fa risentire i propri effetti sul fondo fino a profondità di circa 80 m, mentre un'onda caratterizzata da un periodo di 6 s fa risentire i propri effetti sul fondo fino alla profondità di 28 m. Da ciò si evince che, soprattutto nel caso di spiagge sommerse caratterizzate da modeste pendenze, lo strato limite interessa estensioni notevoli.

Lo studio dello strato limite viene usualmente condotto introducendo drastiche semplificazioni, spesso basate sull'ipotesi che detta regione possa essere assunta di limitato spessore rispetto alle altre grandezze geometriche in gioco e, soprattutto, molto più piccola della lunghezza d'onda L . Nella realtà, tuttavia, le cose sono piuttosto complicate e gli schemi semplificati risultano non sempre adeguati. Al riguardo basti pensare che, in natura, la velocità U_b al fondo può variare in un intervallo che va da zero ad un metro al secondo e l'oscillazione delle particelle fluide a può raggiungere anche i 10 m. Inoltre, dal punto di vista geometrico, i fondali possono essere riguardati come lisci, come nel caso di fondali argillosi o fangosi recentemente depositati in prossimità degli estuari, oppure più o meno scabri, come quelli costituiti da sabbie, eventualmente anche interessate da strutture sedimentarie di piccola scala (*ripples*), o da pietrame di dimensioni anche considerevoli, come nel caso di blocchi provenienti da lavori di protezione costiera. In dipendenza dei valori delle grandezze idrodinamiche e geometriche sopra menzionate, all'interno dello strato limite si possono realizzare diversi regimi di moto. E precisamente: il regime di moto laminare, più frequente alle elevate profondità, il regime di moto turbolento di transizione e il regime di moto assolutamente turbolento. Il quadro può essere ulteriormente complicato dal fatto che, nella maggior parte dei casi di interesse applicativo, le forzanti idrodinamiche non sono solamente dovute al moto ondoso, ma anche alla contemporanea presenza di correnti di varia natura (correnti mareali, litoranee, di temperatura, di densità, etc.).

¹ Il concetto di strato limite si deve a L. Prandtl, che per primo lo introdusse nel 1904, "Über Flüssigkeitsbewegungen bei sehr kleiner Reibung" (Sui moti di fluidi caratterizzati da modestissimo attrito), Verhandlungen des III. Internationalen Mathematiker Kongresses (Heidelberg, 1904) Leipzig, 1905.

Appare dunque evidente come lo studio dello strato limite al fondo di un'onda di mare rappresenti una sfida affascinante non solo dal punto di vista scientifico, ma anche dal punto di vista applicativo.

Gli aspetti di maggior interesse si possono così riassumere:

- nello strato limite si concentra la maggior parte delle dissipazioni dell'energia posseduta da un'onda poiché in esso si concentrano elevate vorticità e turbolenza;
- nello studio della circolazione costiera è assodata l'importanza delle resistenze al fondo, ma la quantificazione e caratterizzazione di dette resistenze non possono certo dirsi effettuate;
- lo strato limite è il luogo dove avviene lo scambio di sedimenti tra i fondali e la colonna d'acqua soprastante, determinando le modalità del trasporto solido e della conseguente evoluzione morfologica dei litorali che occupano un ruolo determinante in molti problemi di ingegneria costiera ed anche nella caratterizzazione del trasporto di inquinanti;
- dal punto di vista strettamente biologico, è noto che la maggior parte della produttività primaria ha luogo nella piattaforma continentale che pertanto risulta fortemente influenzata dal campo di velocità e dai processi di mescolamento che ivi si realizzano;
- risulta importante nei bilanci di quantità di moto;
- la distribuzione delle comunità bentoniche è fortemente influenzata dai meccanismi di alimentazione di vari tipi di biota e, quindi, è per essi importante il ruolo dei moti che si realizzano in prossimità del fondo e dei processi di mescolamento.

Per individuare l'approccio sperimentale più adatto bisogna anzitutto ricordare che gli studi sulle aree costiere vanno ovviamente affrontati in base alla domanda alla quale si vuole dare risposta. Ad esempio, dal punto di vista geomorfologico, un possibile modo di inquadrare le questioni è quello di considerare un tratto di costa come soggetto ad un insieme di fenomeni organizzati in funzione delle diverse scale temporali e spaziali che li caratterizzano. In Figura 1 è riportata la gerarchia proposta da Cowell e Thom (1994), dalla quale si evince che la scala maggiore è quella geologica, in cui gli studi condotti sulla costa sono per lo più di tipo descrittivo. Il livello subito inferiore copre invece diversi decenni ed è definito di interesse ingegneristico poiché si presuppone che in tale intervallo di tempo la costa risulti interessata da interventi dell'uomo volti a permetterne un uso connesso alle esigenze antropiche.

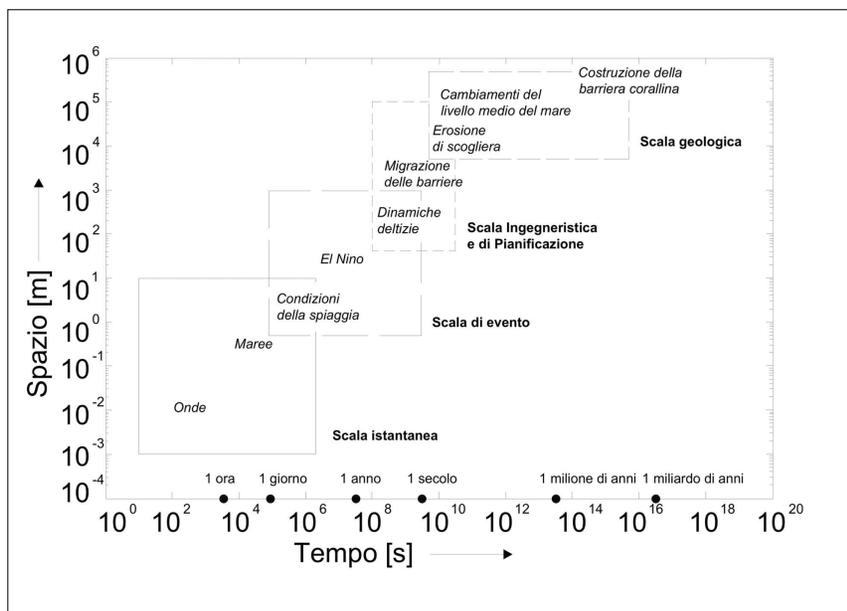


Figura 1 - Classificazione dei processi morfodinamici costieri in funzione delle scale spaziali e temporali.

Scendendo ancora si giunge alla scala di evento (per esempio, una mareggiata), che riguarda per lo più la risposta morfodinamica di una costa all'azione di un evento anche eccezionale. Infine, si perviene alla scala più piccola, ossia a quella istantanea, cui si applicano i principi della meccanica dei fluidi. Tipici studi condotti a questa scala sono quelli riguardanti il trasporto solido. Tali studi, sebbene sviluppati anche in campo con qualche successo, sono usualmente condotti in laboratorio. Infatti la precisione usualmente richiesta per rilevare, ad esempio, i fenomeni turbolenti connessi al trasporto in sospensione mal si attaglia alle difficoltà imposte dalle condizioni di campo e alla impossibilità di controllare le condizioni al contorno. Pertanto studi accurati possono essere condotti solo in laboratorio, ossia laddove le condizioni al contorno sono controllabili con accuratezza. Di contro, tuttavia, nei riguardi degli studi di laboratorio possono sollevarsi altre obiezioni relative alla rappresentatività delle situazioni di campo. Basti pensare infatti che perfino sui criteri di similitudine adottati per lo studio del trasporto solido costiero esistono ancora opinioni molto diverse all'interno della comunità scientifica internazionale. Malgrado ciò, in quanto segue l'attenzione è posta principalmente sui risultati delle ricerche condotte in laboratorio. E ciò non solo per la specifica esperienza di chi scrive, ma anche perché si ritiene che, nonostante i citati limiti, la certezza della ripetibilità dei risultati sperimentali acquisiti in laboratorio sia un presupposto essenziale per comprendere meccanismi ancora poco noti come quelli riguardanti l'idrodinamica costiera. L'obiettivo specifico del presente lavoro è quello di presentare una rassegna della ricerca di laboratorio sull'interazione dell'idrodinamica generata da onde e correnti con i fondali marini.

Detta ricerca è oggi particolarmente finalizzata: a comprendere la dinamica dello strato limite; a studiare l'interazione con fondali non coesivi (analisi del trasporto solido e della morfodinamica dei fondali); a ottenere dati per la validazione di modelli numerici; a realizzare diagrammi che consentano di determinare facilmente i coefficienti di scabrezza f_w (la cui importanza, anche a fini applicativi, emergerà più chiaramente nel prosieguo), ossia diagrammi del tipo riportato in Figura 2.

Il presente lavoro è quindi organizzato come segue: nel paragrafo seguente si descrivono i principali strumenti e metodi di laboratorio utilizzati per lo studio dello strato limite, quindi si descrivono alcuni aspetti peculiari dell'idrodinamica sotto onde di mare e precisamente: i regimi di moto che si possono realizzare e la transizione alla turbolenza; lo strato limite turbolento completamente sviluppato e lo strato limite turbolento di parete scabra. Successivamente si passa alla descrizione dell'interazione tra onde e correnti codirezionali e all'interazione tra onde e correnti ortogonali. Il contributo si conclude con alcune considerazioni di carattere generale sulle questioni ancora aperte che meritano ulteriori approfondimenti.

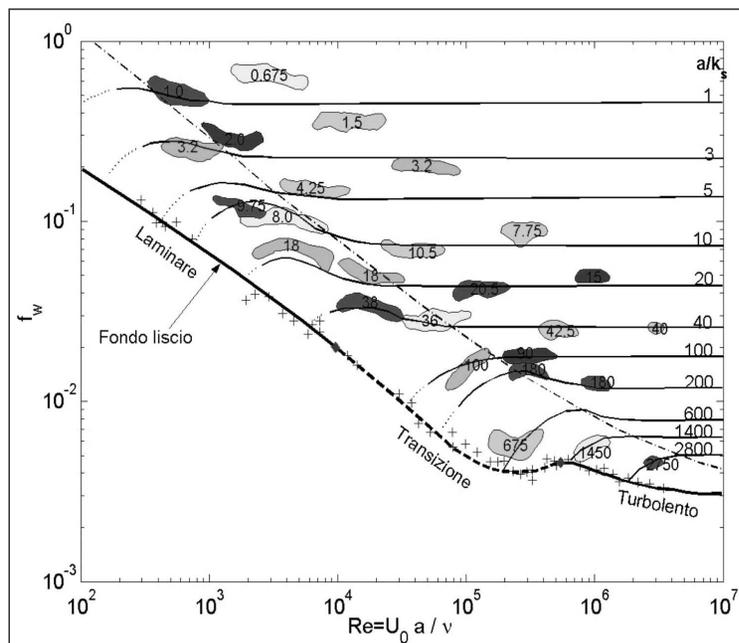


Figura 2 - Esempio di rappresentazione della dipendenza del coefficiente di attrito in funzione del numero di Reynolds Re e della scabrezza relativa a/k_s (dopo Kamphuis, 1975). Il numero di Reynolds è costruito assumendo come velocità scala U_0 e come lunghezza scala a . Il rapporto a/k_s indica la scabrezza relativa.

Strumenti e metodi di laboratorio

Il problema di simulare in laboratorio l'interazione tra campo di moto generato da onde con un fondale marino può essere affrontato attraverso l'uso di diversi apparati sperimentali. Ovviamente la tipologia di installazione che si può utilizzare è quella in grado di riprodurre un'onda di gravità e, di conseguenza, l'interazione del campo di moto da essa generato con il fondale. A seconda che il moto ondoso generato sia bidimensionale o tridimensionale si parla di canalette o di bacini dotati di ondogeno.

Oggi esistono installazioni di questo tipo di notevoli dimensioni che consentono studi accurati. Ad esempio, in Figura 3 si riporta una immagine del bacino in dotazione al Laboratorio di Ricerca e Sperimentazione per la Difesa delle Coste del Politecnico di Bari, certamente tra i più grandi in Italia. Tuttavia, per quanto concerne l'interazione con il fondale, tali installazioni pongono seri limiti, per lo più legati alla possibilità di riprodurre casi caratterizzati solo da bassi valori del numero di Reynolds.



Figura 3 - Bacino con ondogeno in dotazione al Laboratorio di Ricerca e Sperimentazione per la Difesa delle Coste del Politecnico di Bari (lungo 90 m, largo 50 m e profondo 1.2 m) in cui è possibile riprodurre fronti d'onda anche di 30 m.

Per ovviare a questi problemi, sono stati introdotti altri sistemi volti non tanto a simulare il moto ondoso, quanto piuttosto a rappresentarne solo gli effetti sul fondale, sebbene opportunamente semplificati.

Negli studi teorici, le ipotesi semplificative usualmente adottate sono quelle di onda monocromatica di piccola ampiezza che si propaga su di un fondale caratterizzato da una profondità costante.

Adottando quindi il sistema di riferimento introdotto nella Figura 4, in cui il fondo marino è descritto dalla retta $y=0$, in prossimità del fondo, dalla teoria di Stokes al primo ordine di approssimazione, si ricava per la velocità orizzontale una legge del tipo:

$$u = U_o \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

in cui $k = 2\pi/L$ è detto numero d'onda e $\omega = 2\pi/T$ è detto frequenza angolare, con T periodo dell'onda. In altre parole, la (1) esprime analiticamente il fatto che il fluido in prossimità del fondo oscilla armonicamente lungo la direzione x come rappresentato nella citata Figura 4. Poiché, usualmente, in laboratorio l'attenzione viene rivolta a fenomeni la cui scala geometrica risulta essere piccola rispetto alla lunghezza d'onda delle onde di gravità considerate (invero dell'ordine di parecchie decine di metri), ne consegue che in tali condizioni il prodotto kx risulta molto piccolo ($\ll 1$) e pertanto appare ragionevole introdurre la seguente ulteriore semplificazione:

$$u = U_o \cos(kx - \omega t) = U_o [\cos(kx)\cos(\omega t) - \sin(kx)\sin(\omega t)] \approx U_o \cos(\omega t) \quad (2)$$

ossia una invarianza delle caratteristiche del moto lungo la direzione x .

E' opportuno ricordare che la soluzione di Stokes assume il fluido in moto irrotazionale e che pertanto essa non è in grado di soddisfare la condizione di aderenza al fondo. Tale condizione di aderenza pone quindi l'esistenza di uno strato limite il cui spessore, nel caso di fondo piano, può essere agevolmente ottenuto valutando gli ordini di grandezza dei vari termini delle equazioni di Navier-Stokes ed imponendo che il termine di inerzia locale abbia lo stesso ordine di grandezza dei termini diffusivi. Imponendo quindi detto bilancio, si ricava uno spessore per lo strato limite proporzionale a:

$$\delta \propto \sqrt{\frac{\nu}{\omega}} \tag{3}$$

in cui ν è la viscosità cinematica del fluido e ω la frequenza angolare dell'onda. Lo spessore dello strato limite dovuto alle sole onde di mare, tuttavia, sebbene venga assunto $\delta \ll L$, può raggiungere nella realtà anche diverse decine di cm (20÷30 cm). Ciò si verifica nel caso di strato limite turbolento per cui lo spessore può essere ricavato ponendo nella (3) $\nu = \nu_t$, essendo ν_t la viscosità turbolenta.

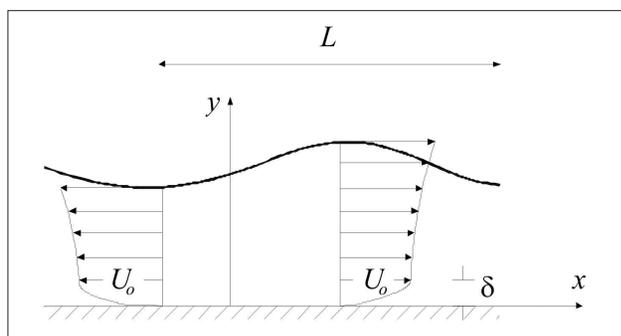


Figura 4 - Rappresentazione schematica dello strato limite al fondo di un'onda di mare progressiva (L è la lunghezza d'onda, U_0 è la velocità massima in prossimità del fondo indotta dal passaggio dell'onda, δ è lo spessore dello strato limite).

Da tutto quanto sopra brevemente richiamato, si evince che, in laboratorio, l'interazione tra campo di moto generato da onde di gravità e fondali marini viene riprodotta focalizzandosi sullo studio del campo di moto nello strato limite in aderenza al fondo forzato da un moto puramente oscillante. I primi studi sperimentali basati su tali approssimazioni furono condotti da Bagnold (1946) allo scopo di studiare la formazione delle forme di fondo di piccola scala e di analizzare le dissipazioni di energia. Lo schema dell'apparato sperimentale impiegato da Bagnold (1946) tratto dalla pubblicazione originale è riportato nella Figura 5.

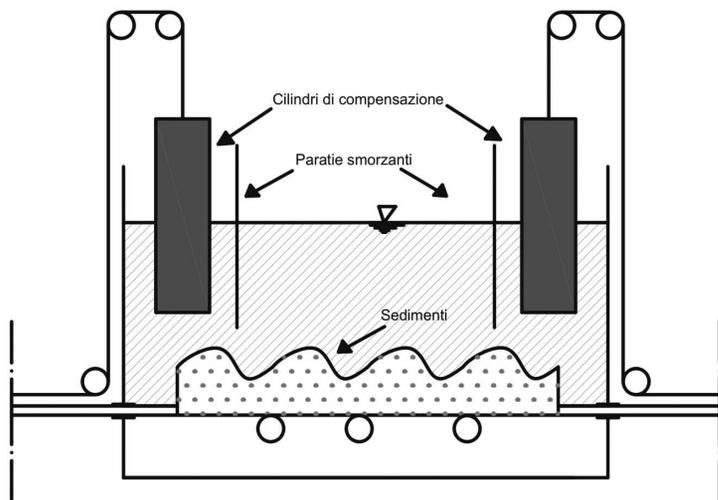


Figura 5 - Schema di funzionamento di un vassoio oscillante (desunto da Vittori, 1990) in un fluido in quiete.

Per ovviare ad alcuni inconvenienti dei vassoi oscillanti, per lo più dovuti al fatto che essi non consentivano di simulare numeri di Reynolds sufficientemente elevati, sono stati proposti i tunnel oscillanti o i tubi ad "U", ormai largamente impiegati (Conley e Inman, 1994; Kamphuis, 1975; Dedow, 1966; Sleath, 1987; Murray et al., 1993; Ribberink e Al Salem, 1994; Foti e Blondeaux, (a) e (b), 1995).

Il concetto informatore che sta alla base di tali installazioni è il medesimo di quello dei vassoi oscillanti; si cerca infatti di riprodurre un moto puramente oscillante su di un fondo orizzontale. Ovviamente molti effetti legati alla superficie libera sono del tutto trascurati (per esempio, gli effetti del secondo ordine come gli *steady streaming* non possono essere riprodotti).

La differenza tra tubi ad "U" e tunnel oscillanti è marginale e consiste solamente nel fatto che mentre il tubo ad "U" oscilla solo su frequenza propria, nei tunnel oscillanti, come quello rappresentato in Figura 6, è possibile imporre pressoché qualunque oscillazione risulti compatibile con la risposta in frequenza dell'apparecchiatura stessa. Varianti sul tema sono state proposte, tra gli altri, da Hino et al. (1976), che hanno realizzato una galleria del vento bidirezionale allo scopo di ottenere numeri di Reynolds elevatissimi, simili a quelli di pieno campo.

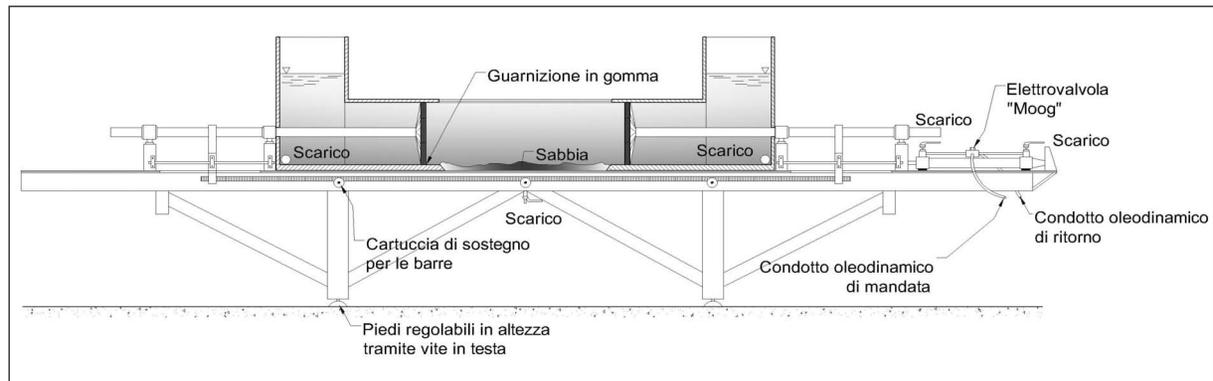


Figura 6 -Tunnel oscillante in dotazione al laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Ambientale dell'Università di Genova (da Foti, 1994).

Recentemente è stata introdotta una nuova tipologia di installazione sperimentale detta *annular cell* (Stegner e Wesfreid, 1999; Scherer et al., 1999; Rousseax, 2003; Foti e Faraci, 2005), con l'obiettivo di ridurre le complicazioni dei tunnel oscillanti e dei tubi ad "U". Sostanzialmente si tratta di due cilindri coassiali che ruotano attorno al proprio asse e al cui interno viene posta l'acqua (vedere la Figura 7, che riporta l'*annular cell* in dotazione al Laboratorio di Idraulica dell'Università di Catania). Tali installazioni, essendo molto piccole e anche facili da controllare, risultano particolarmente adatte quando si vogliono realizzare esperimenti in cui la ripetibilità rappresenta un elemento importante. Ovviamente esse introducono altri effetti scala, ossia altri inconvenienti, tra cui il fatto di poter riprodurre ancora una volta numeri di Reynolds modesti.

Lo studio sperimentale di laboratorio dell'interazione tra moto ondoso e fondali marini può quindi essere effettuato ricorrendo a diversi dispositivi, ciascuno dei quali presenta non solo vantaggi ma anche importanti limiti dovuti ai cosiddetti effetti di scala, eliminabili solo in pieno campo (sebbene in tal caso si presenterebbe l'impossibilità di controllare il fenomeno in studio). Se ne evince pertanto che solo una sufficiente e preventiva conoscenza del fenomeno in studio può suggerire l'adozione dell'apparecchiatura più adatta agli scopi che si vogliono perseguire.

Per quanto riguarda gli strumenti di misura più comunemente adottati, essi possono essere classificati in:

1. strumenti per la visualizzazione del campo di moto:
 - inchiostro, latte o altri liquidi (Li, 1954);
 - particelle di plastica (o comunque di materiali più leggeri dell'acqua come, per esempio, il legno) rilasciate in sospensione;

- bioluminescenza (Rohr et al., 1997; Stokes et al., 2004; Foti, 2005);
 - fumo (nel caso di tunnel ad aria);
2. strumenti per la misura delle velocità:
 - micromulinelli (Jonsson e Carlsen, 1976);
 - filo caldo (Becchi e Scarsi, 1974);
 - Acoustic Doppler Velocimeter o ADV (Musumeci et al., 2006);
 - Laser Doppler Velocimeter, o LDA (Petti e Longo, 2001);
 - Partile Imaging Velocimeter, o PIV (Lara et al., 2002);
 3. strumenti per la misura delle tensioni tangenziali:
 - *shear plate* (Kamphuis, 1975, Kemp e Simons, 1982);
 - film caldo (Sumer et al., 1993) o Micro Electronical Mechanical Systems o MEMS (Larcen, 2006);
 - bioluminescenza (Stokes et al., 2004; Foti, 2005).

Entrando un po' nel dettaglio relativamente agli strumenti di misura delle velocità e delle tensioni tangenziali, che più di altri servono nelle sperimentazioni in oggetto, si può sinteticamente ricordare quanto di seguito riportato (il lettore interessato ad approfondimenti sulle misure idrauliche è comunque rimandato al libro di Petti e Longo, 2005).

Per quanto riguarda i micromulinelli, essi sono caratterizzati da un volume di controllo più o meno sferico dal

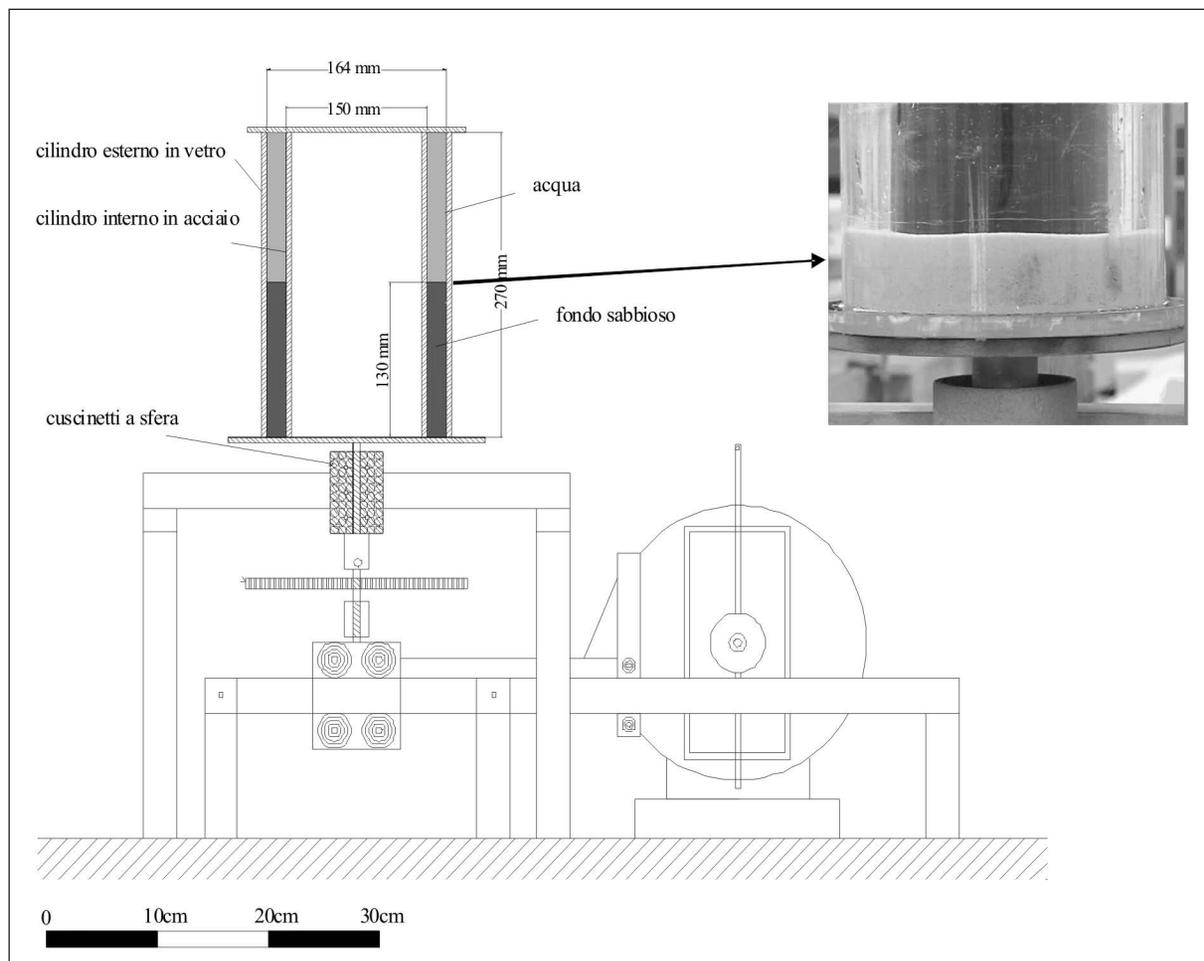


Figura 7 - *Annular cell* in dotazione al laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Catania (da Foti, 2005).

diametro dell'ordine di grandezza di $O(0.5 \text{ cm})$, che risulta adeguato per analisi relative al moto medio, ma certamente non può dirsi adatto allo studio della turbolenza. La frequenza di campionamento è limitata solo dal sistema di acquisizione. In generale, quindi, il micromulinello non pone problemi circa la risoluzione nel tempo, quanto piuttosto in quella nello spazio.

Altra tecnica è l'anemometro a filo caldo, o tecnica anemometrica a scambio termico con sonde cilindriche a fibra, caratterizzate da una risoluzione spaziale che dipende dalla sezione della fibra ($\sim 75 \mu\text{m}$). Pur non avendo grossi limiti circa la frequenza di campionamento, che ne ha consentito applicazioni con notevole profitto (Becchi et al., 1974a, 1974b), questa tecnica presenta difficoltà di taratura.

Per quanto attiene all'ADV, esso risulta caratterizzato da un volume di controllo $O(1 \text{ cm}) \times O(0.3 \text{ cm}) \times O(0.3 \text{ cm})$ e da una frequenza di campionamento molto elevata e pertanto certamente adatta a rilevare qualunque fenomeno idrodinamico di interesse ingegneristico. Il volume di controllo risulta spesso troppo grande per misure all'interno dello strato limite al fondo di un'onda di gravità riprodotta in laboratorio.

Per quanto concerne il LDA, si ha un volume di controllo: $O(0.1 \text{ mm}) \times O(0.1 \text{ mm}) \times O(0.2 \text{ mm})$ e una frequenza di campionamento elevatissima. Tale strumento di misura si presta dunque per lo studio della turbolenza (vedere, per esempio, Petti e Longo, 2001).

La PIV ha una risoluzione spaziale: $O(0.6 \text{ mm})$ e una risoluzione nel tempo: $O(0.1 \text{ s})$ (vedere Lara et al., 2002). In effetti, è da notare come per elevati numeri di Reynolds $O(5 \times 10^6)$ in un tubo a "U", per una risoluzione di $\Delta y^+ = 4$, la risoluzione PIV necessaria sarebbe di $O(0.1 \text{ mm})$ anziché di $O(0.6 \text{ mm})$ come quella degli esperimenti citati di Lara et al. (2002); anche la risoluzione nel tempo $O(0.1 \text{ s})$ sembrerebbe non sufficientemente piccola. In altre parole, le risoluzioni spaziali e temporali non sembrano ancora adatte a studiare il campo di moto nello strato limite al fondo di un'onda di mare nel caso di moto turbolento pienamente sviluppato, sebbene sembrerebbe che alcuni nuovi prodotti siano invece più adeguati (Sumer, 2006; comunicazione personale).

Per quanto riguarda la misura di tensioni tangenziali, non si hanno molti dispositivi e peraltro quelli disponibili funzionano solo su una parete. Il film caldo, ad esempio, consente l'acquisizione di misure di tensioni tangenziali su parete liscia anche in regime di moto turbolento. Esso infatti presenta una superficie di misura $O(0.2 \text{ mm}) \times O(0.8 \text{ mm})$ e sostanzialmente non presenta limiti di campionamento nel tempo.

Altra possibilità è rappresentata dal cosiddetto *shear plate*, che fornisce una misura di tensione tangenziale "integrata" su di un'area non piccola $O(25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm})$, ossia sufficientemente ampia da rilevare le forze tangenziali. Ciò implica che lo strumento risulta efficace per la acquisizione delle tensioni tangenziali medie, mentre la sua risoluzione spaziale appare del tutto inadatta per l'analisi delle tensioni turbolente.

Infine, per quanto concerne l'uso della bioluminescenza come misura delle tensioni tangenziali, proprio perché ancora in fase sperimentale, si ritiene di doverne qui approfondire alcuni aspetti peculiari, allo scopo di evidenziarne potenzialità e limiti. Al riguardo è opportuno preliminarmente ricordare che le tecniche adoperate per caratterizzare il campo di moto di un fluido, sopra brevemente richiamate, sono essenzialmente indirizzate verso una sempre più precisa e rigorosa descrizione del campo di velocità, non essendosi ancora affermata alcuna metodologia di misura diretta degli sforzi all'interno del fluido in moto (come anzi accennato, infatti, sia gli *shear plate* che il film caldo consentono misure di tensioni tangenziali solo alla parete). La filosofia propria di questo tipo di approccio al problema è quella di valutare le caratteristiche del campo di tensioni per via indiretta, cioè per mezzo delle note relazioni che legano la dinamica e la cinematica del moto. Se da un lato l'aver impostato e mantenuto questa metodologia di ricerca ha permesso di raffinare l'analisi cinematica del moto dei fluidi, dall'altro ha limitato lo sviluppo di mezzi e procedure sperimentali che permettano di operare misurazioni dirette delle tensioni, se non nei casi molto particolari di sforzi viscosi su parete liscia.

In questo contesto appare auspicabile l'idea di poter fare affidamento su mezzi di indagine diretta del campo di tensioni, ossia che permettano una stima di essi prescindendo dalla conoscenza delle velocità.

Con tali premesse, lo studio del comportamento di organismi luminescenti, capaci cioè di emettere radiazioni luminose se sottoposti a stress fisico, può rappresentare un mezzo per superare gli ostacoli presenti a tutt'oggi, qualora fosse possibile misurare con opportuna precisione l'intensità della risposta luminosa e fosse nota la relazione che lega quest'ultima al valore dello stress.

Sebbene quello della bioluminescenza sia un fenomeno piuttosto comune in natura sia tra gli organismi terrestri che tra quelli acquatici² lo sfruttamento delle capacità bioluminescenti di tali organismi per indagini scientifiche, con particolare riferimento alla meccanica dei fluidi, è molto recente e poco sviluppato.

Di seguito sarà sinteticamente illustrato lo stato dell'arte per la tipologia di indagine indicata, insieme ad alcuni risultati preliminari ottenuti nell'ambito di una tesi di laurea (Foti, 2005) di cui chi scrive è stato relatore. Detti risultati sono stati acquisiti attraverso specifiche indagini di laboratorio condotte con l'ausilio dell'*annular cell* e relative all'analisi del campo di moto su forme di fondo di piccola scala. Le indagini sono state effettuate con colture a media concentrazione (20 cellule/ml) di *Alexandrium tamarense*, un dinoflagellato di dimensione tipica 30 μm coltivato in soluzione salina arricchita (medium *f/2*) alla temperatura di 18 °C e capace di emettere lampi luminosi della durata di circa 0.1 s nella fase notturna del suo ciclo biologico. Tale peculiarità implica la conduzione in notturna delle analisi di laboratorio, data anche la notevole sensibilità delle colture ad alterazioni del ciclo vitale.

Le fasi di sperimentazione all'interno dell'*annular cell* sono state precedute da alcune indagini preliminari allo scopo di individuare le peculiarità del fenomeno ed indirizzare adeguatamente le prove di laboratorio. Tra queste analisi si segnalano quelle di stima della lunghezza d'onda della radiazione emessa (510÷520 nm), quelle di taratura della strumentazione di rilevazione del segnale luminoso emesso, che hanno sancito l'inapplicabilità di strumenti di rilevazione e misura di tipo tradizionale, ossia non dotati di dispositivi ad intensificazione di luminosità, e la verifica dell'insensibilità di tali microrganismi a stati tensionali di tipo isotropo. Questa ultima analisi, in particolare, è stata condotta sottoponendo una coltura a concentrazione di circa 50 cellule/ml a variazioni di pressione idrostatica con l'ausilio di un pistone. L'esito negativo della prova, ovvero la mancanza di risposta luminosa nel range di pressioni esplorato, compreso fra 0.5÷10 Pa, ha portato all'importante conclusione che la parte sferica del tensore di tensione è ininfluente ai fini della risposta, che risulta interamente dovuta a variazioni di stress da taglio.

Altre importanti ipotesi a suffragio della validità di tale tipo di approccio sperimentale volto alla determinazione diretta delle tensioni tangenziali in seno a fluidi in moto sono la conoscenza della legge che lega l'intensità di emissione e lo stress applicato, nonché il valore dell'intervallo temporale che intercorre fra stimolazione ed emissione luminosa. Studi precedenti (Latz e Rohr, 1999) hanno dimostrato come l'andamento della curva che lega l'intensità di emissione al valore dello stress sia di tipo esponenziale all'interno di un intervallo compreso fra la soglia di innesco, giudicata pari a 0.3 Pa e la soglia di saturazione, posta intorno a 1÷2 Pa, come illustrato in Figura 8, mentre il tempo di ritardo fra stimolo e risposta è ritenuto dell'ordine dei 20 ms, dunque abbastanza piccolo da potere ritenere la risposta immediata senza commettere errori grossolani, almeno per lo studio condotto. Alla luce di tali considerazioni preliminari sono stati pianificati ed effettuati gli esperimenti di laboratorio per i quali ci si è avvalsi di una strumentazione ottica composta da un dispositivo ad intensificazione di immagini dotato di sensore CMOS-APS capace di raggiungere livelli di guadagno compresi fra 10^4 e 5×10^7 ed una videocamera intensificata con guadagno fisso pari a 10^5 . I suddetti dispositivi hanno permesso di rilevare la luce prodotta dai dinoflagellati rispettivamente in modalità *frame grabber* (con tempo di posa pari a 13 ms) e televisiva a 13 frames/s.

Le indagini di laboratorio sono state coadiuvate da simulazione numerica, condotta per mezzo di un modello di moto laminare su parete ondulata appositamente predisposto. L'adozione del modello ha permesso da un lato un'appropriata progettazione a priori delle prove di laboratorio, dall'altro la verifica ed il confronto dei risultati ottenuti numericamente con quelli ricavati per mezzo della sperimentazione diretta sui campioni.

In Figura 9 si riportano alcuni dei risultati ottenuti con tale approccio. Tali risultati fanno riferimento alle condizioni di moto create all'interno dell'*annular cell* ed imposte contestualmente al modello numerico riassunte in Tabella 1.

² "... Il mare appariva come illuminato da sotto la superficie dell'acqua, ma non era un semplice fenomeno di fosforescenza: su questo non ci si poteva sbagliare [...] - può essere un agglomerato di piccoli animali marini fosforescenti - osservò un ufficiale ..." (da J. Verne, 2000 *Leghe sotto i mari*).

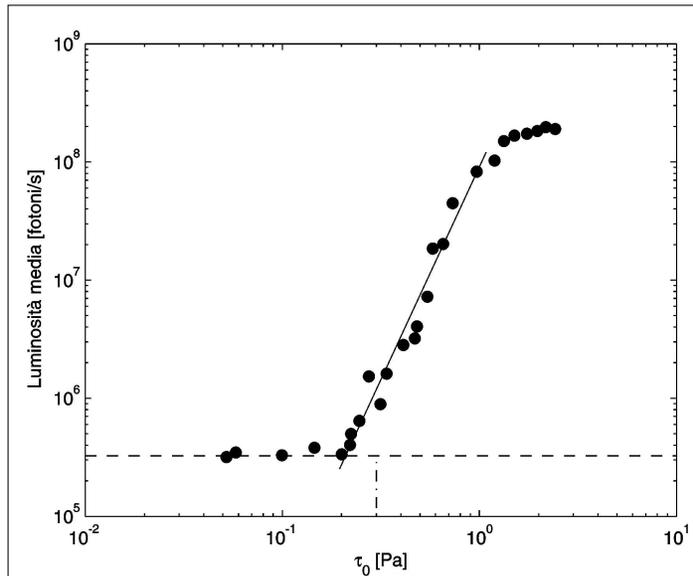


Figura 8 - Esempio di andamento della intensità media della risposta luminosa in funzione dello stress alla parete nel caso di moto laminare per un campione di 15 cellule/ml (Latz e Rohr, 1999). Da notare il valore della soglia inferiore (0.3 Pa) e di quella di saturazione (1÷2 Pa).

Tabella 1 - Condizioni di moto imposte al modello numerico e all'annular cell per la caratterizzazione dello stato tensionale tramite visualizzazione della bioluminescenza.

Altezza del <i>ripple</i> [mm]	Lunghezza del <i>ripple</i> [mm]	Ampiezza di oscillazione [mm]	Periodo di oscillazione [s]	Velocità massima [mm/s]	Re [-]
10	53	40	5	50	2009

Una rapida disamina della citata Figura 9 dimostra come la bioluminescenza osservata sembra individuare una struttura coerente compatibile con quanto rilevato numericamente, dunque con addensamenti luminosi in prossimità del fondo ondulato ove le tensioni sono maggiori.

Un dato significativo emerso dal confronto con quanto ricavato dalla simulazione numerica riguarda la soglia di innesco della risposta luminosa. Il modello, infatti, prevede tensioni tangenziali massime di 0.05 Pa in prossimità del fondo, dunque ben inferiori al valore di soglia riportato in letteratura (0.3 Pa); ciononostante tali stress si sono rivelati sufficienti a provocare la risposta dei dinoflagellati.

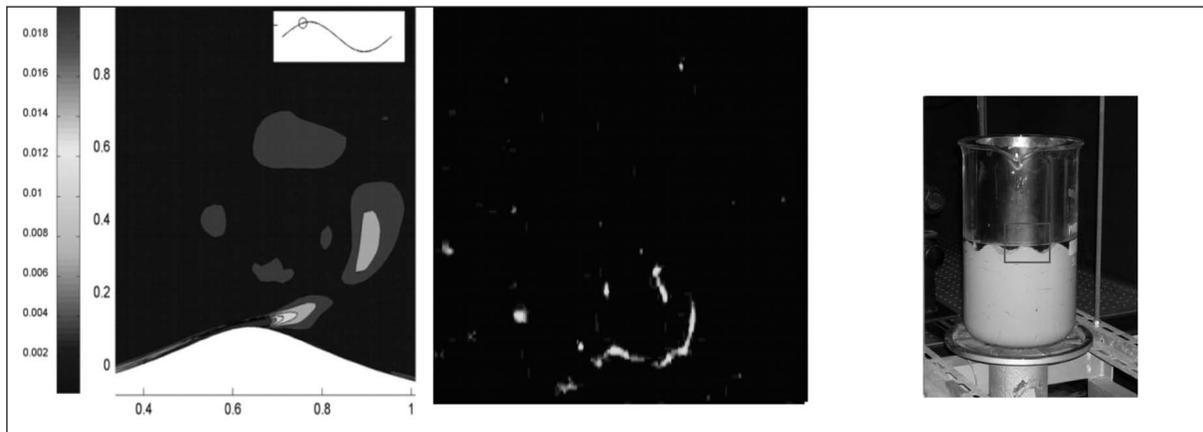


Figura 9 - Confronto fra la mappa di stress ricavata con il modello numerico e relativa all'istante con fase 72,5° del X ciclo di simulazione ed uno dei fotogrammi della bioluminescenza rilevata all'interno dell'annular cell (con riguardo alla finestra visiva 5 cm x 5 cm delineata in figura) dalla videocamera ad intensificazione di immagini impostata su un guadagno di 10⁵.

In conclusione, l'approccio descritto appare una valida metodologia di valutazione diretta di tensioni tangenziali in seno a fluidi in moto e, sebbene presenti ancora delle limitazioni piuttosto rilevanti, può rappresentare il primo passo per lo sviluppo di micro o nano tecnologie bio-ispirate che, allo stesso modo dei dinoflagellati, siano in grado di reagire alle sollecitazioni tangenziali presenti nel fluido in cui si trovano immersi.

Regimi di moto e transizione alla turbolenza su parete liscia

Per descrivere i regimi di moto si può fare riferimento alle tensioni tangenziali alla parete e al loro andamento nel tempo. Si osservi la Figura 10 che riporta i risultati degli esperimenti condotti da Jensen et al. (1989), in cui nel pannello superiore è riportato il moto irrotazionale esterno allo strato limite, ossia le velocità U_o , per tre diversi valori del numero di Reynolds, mentre nel pannello inferiore è riportata la tensione tangenziale alla parete τ_o diviso la densità del fluido ρ .

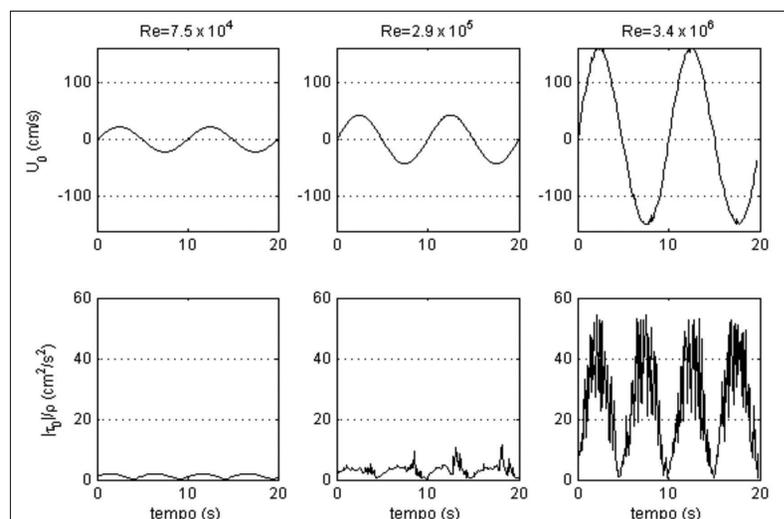


Figura 10 - Andamento nel tempo delle velocità (pannello superiore) e delle tensioni tangenziali alla parete (pannello inferiore) per diversi valori del numero di Reynolds (dati desunti da Jensen et al., 1989).

Si può notare che:

- quando $Re = 7.5 \times 10^4$ si è in regime laminare;
- quando $Re = 2.9 \times 10^5$ si manifesta la turbolenza (nella forma di *spikes* o *bursts*, che si presentano nella fase di decelerazione);
- per ulteriori aumenti del numero di Reynolds, la turbolenza si manifesta anche nella fase di accelerazione fino a interessare tutto il semiciclo per $Re \approx O(10^6 \div 10^7)$.

Dall'osservazione degli esperimenti sopra richiamati sorge spontanea la domanda: quale è, nei moti oscillanti su parete liscia, il valore critico del numero di Reynolds per cui si osserva la transizione alla turbolenza? A tale quesito si è cercato di dare una risposta attraverso diversi approcci metodologici.

Le analisi sperimentali suggeriscono $Re_{cr} \approx 1.5 \times 10^5$. Tale valore è infatti indicato sia da Li (1954), che ha condotto esperimenti con un vassoio oscillante osservando la dispersione di inchiostro, sia da Jensen et al. (1989), nonché da Akhavan et al. (1991). Altri ricercatori come, ad esempio, Becchi et al. (1974), che propongono $Re_{cr} \approx 6 \times 10^3 \div 1.2 \times 10^4$, oppure come Hino et al., (1976), o anche come Ohmi et al. (1982), introducono valori diversi, verosimilmente legati all'apparato sperimentale utilizzato (vedere Blondeaux e Vittori, 1999; per un'ampia rassegna sull'argomento) o agli strumenti di misura adottati.

Le analisi numeriche di Spalart e Baldwin (1987) suggeriscono, attraverso una simulazione numerica diretta tridimensionale (DNS), che anche al di sotto del valore di $Re = 1.8 \times 10^5$ il moto manifesta una transizione alla turbolenza (anzi, essi parlano di una transizione a uno stato di pre-turbolenza per valori inferiori al citato numero di Reynolds), sebbene non vengano forniti molti dettagli al riguardo; Vittori e Verzicco (1998), anch'essi

tramite DNS, studiando lo strato limite su un letto leggermente perturbato, hanno ricavato come valore critico di transizione alla turbolenza $Re_{cr} \approx 1.5 \times 10^5$; infatti al di sopra di questo valore le velocità in prossimità del fondo manifestavano fluttuazioni esplosive.

Da quanto sopra esposto se ne evince pertanto che il numero di Reynolds critico per la transizione alla turbolenza è $Re_{cr} \approx 1.5 \times 10^5$. Ovviamente questi risultati riguardano il caso di moto oscillante forzato da un'unica componente armonica, mentre in campo si hanno diverse armoniche e componenti stazionarie.

Noto con un certo grado di approssimazione il valore critico del numero di Reynolds per la transizione alla turbolenza, resta da comprendere il comportamento del moto all'interno dello strato limite, una volta che viene superato tale valore critico. Ovviamente non si osserverà turbolenza per tutta la durata del ciclo ma si avranno fasi del ciclo in cui il moto sarà laminare. Tale fenomeno può essere compreso attraverso l'analisi della Figura 11 (Jensen et al., 1989), che riporta la tensione tangenziale alla parete alle diverse fasi del ciclo f_w^* , opportunamente adimensionalizzata, per diversi valori del numero di Reynolds. Più precisamente, in ascisse è riportato il numero di Reynolds mentre in ordinate figura:

$$f_w^* = \frac{\tau_o^*}{0.5\rho U_o^2} \frac{1}{\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)} \quad (4)$$

Da notare che l'aver diviso per $\sin(\omega t + \pi/4)$ implica un andamento della soluzione laminare descritta da una retta data dall'espressione :

$$f_w^* = \frac{2}{\sqrt{Re}} \quad (5)$$

Pertanto, tutto ciò che finisce per "collassare" su tale retta rappresenta un moto laminare D.

all'osservazione della figura citata si ricava che per un dato valore di fase ωt , dopo che il numero di Reynolds eccede un primo valore critico, la variazione delle tensioni tangenziali al fondo subisce due cambiamenti: prima subisce una variazione di transizione e poi subisce una seconda variazione differente dalla prima. La prima variazione viene detta turbolenza transizionale e la seconda turbolenza completamente sviluppata.

Per esempio, per $Re=10^6$, la tensione tangenziale al fondo si comporterà: come in regime laminare per $0^\circ < \omega t < 20 \div 25^\circ$; come in regime di transizione per $20 \div 25^\circ < \omega t < 60^\circ$; come nel regime di moto turbolento pienamente sviluppato per $60^\circ < \omega t < 130^\circ$.

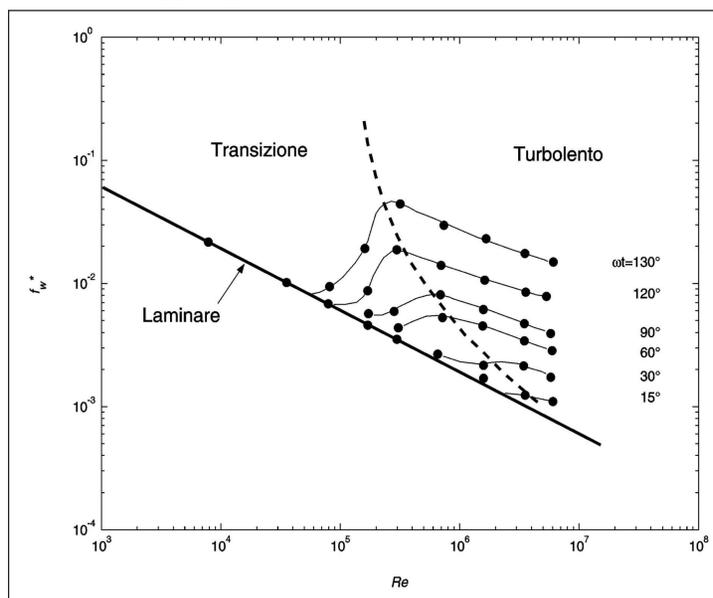


Figura 11 - Andamento delle tensioni tangenziali adimensionalizzate alla parete alle diverse fasi del ciclo, in funzione del numero di Reynolds. Dati desunti da Jensen et al. (1989).

E' opportuno segnalare come tale risultato non sia ancora stato confermato numericamente, per esempio tramite DNS, poiché i numeri di Reynolds in gioco sono troppo alti.

Passando adesso a discutere lo strato limite turbolento completamente sviluppato, brevemente ci si soffermerà su due aspetti: il moto medio e le resistenze.

Per quanto riguarda il moto medio si può fare riferimento alla Figura 12, che mostra l'andamento della velocità media \bar{u}^+ in un ciclo insieme alla legge logaritmica (linea tratteggiata) e alla distribuzione di velocità di van Driest (1956). L'asse verticale indica la distanza dal fondo in forma adimensionalizzata (ossia $y^+ = yU_f/\nu$, in cui U_f è la velocità di attrito alle diverse fasi).

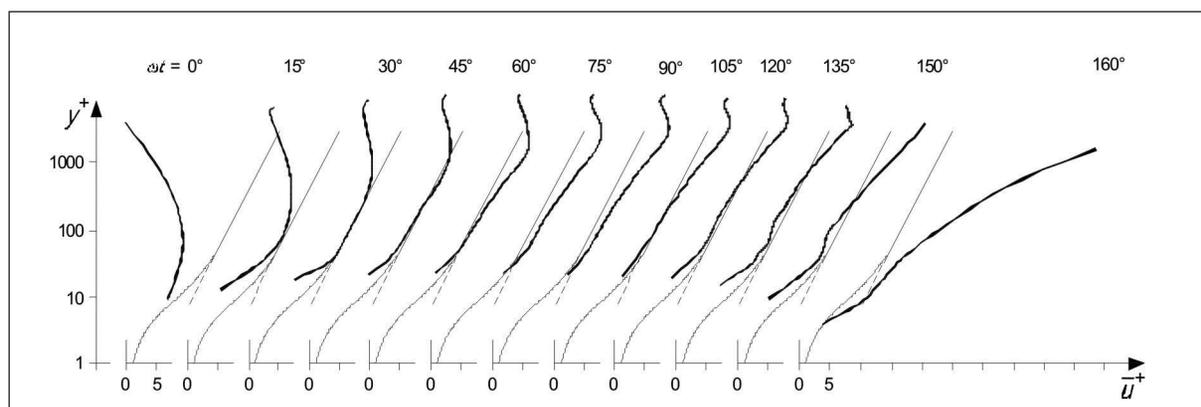


Figura 12 - Andamento qualitativo dei profili di velocità media alle diverse fasi del ciclo ($Re=6 \times 10^6$). Dati desunti da Jensen et al. (1989).

Si possono segnalare perlomeno tre cose degne di nota:

- lo strato logaritmico (ossia la porzione rettilinea del profilo di velocità) è individuabile a partire da $\omega t = 15^\circ$ e cresce mano a mano che il moto progredisce;
- detto strato logaritmico si mantiene fino a quasi $\omega t = 150^\circ$;
- i profili di velocità nelle prime fasi di accelerazione somigliano moltissimo a quelli rilevabili in strati limiti permanenti con gradienti di pressione favorevoli. Nella fase di decelerazione somigliano invece a quelli di moto permanente caratterizzati da un gradiente di pressione sfavorevole.

Per quanto concerne le resistenze offerte al moto, con riferimento alla Figura 13, nel pannello superiore è riportato il coefficiente di scabrezza f_w , espresso in termini di tensione tangenziale massima al fondo (adimensionale), in funzione del numero di Reynolds. Nel pannello inferiore è invece riportata la differenza in fase tra la tensione tangenziale massima e la massima velocità esterna allo strato limite. Le soluzioni teoriche rappresentate sono quella relativa al moto laminare, quella di Spalart e Baldwin (1987) ottenuta tramite simulazione numerica diretta (DNS) e quella di Fredsøe (1984) ricavata attraverso l'applicazione dell'equazione globale dell'equilibrio dinamico.

Con riferimento al pannello superiore si può notare che:

- la transizione alla turbolenza avviene per $Re = 1.5 \times 10^5$. E ciò conferma quanto affermato in precedenza;
- i dati relativi sia al coefficiente d'attrito che alla differenza in fase concordano molto bene con i risultati teorici relativi al moto laminare (la differenza in fase è pari a 45 gradi);
- la differenza in fase decresce con la transizione, fino a tendere a zero per valori di Reynolds molto elevati;
- individuare con esattezza il valore di Reynolds critico non è possibile.

Strato limite turbolento di parete scabra

Passando al caso di parete scabra, bisogna anzitutto evidenziarne le notevolissime implicazioni pratiche, anche dimostrate dai numerosi progetti di ricerca finanziati negli ultimi anni dalla UE (tra gli altri: CO-AST3D, 1997-2001, orientato all'acquisizione di dati di campo relativi all'interazione fra onde, correnti e fondali marini, nonché alla morfodinamica di piccola scala; SEDMOC, 1998-2001, finalizzato al miglioramento delle conoscenze attinenti al trasporto solido costiero; SANDPIT, 2002-2005, finalizzato all'avanzamento delle conoscenze della morfodinamica di cave sottomarine e alla loro influenza sui litorali e sui fondali circostanti; HYDRALAB III, 2006-2010, finalizzato alla messa a punto di protocolli sperimentali di laboratorio anche utili allo studio dell'interazione fra onde, correnti e fondali marini).

Data la complessità dell'argomento, le informazioni disponibili sull'interazione onde-fondali marini sono prevalentemente di tipo sperimentale. Al riguardo, il primo lavoro risale agli anni '40 ed è quello già citato di Bagnold (1946), che condusse uno studio sulle forme di fondo di piccola scala diventato ormai una pietra miliare. Successivamente, Sleath (1970) effettuò misure di velocità al fondo di un'onda di gravità in regime di moto laminare, sia su parete liscia che su parete scabra (parete coperta di sabbia), osservando in questo ultimo caso un aumento dello spessore dello strato limite rispetto al caso di parete liscia, verosimilmente dovuto all'emissione di vortici dai granuli di sabbia. Successivamente, Kamphuis (1975) condusse esperimenti su cinque diversi tipi di scabrezza (dalla sabbia ai ciottoli incollati su di un fondo piano) volti a determinare i coefficienti di attrito mediante uno *shear plate*. Jonsson e Carlsen (1976) condussero esperimenti ottenendo risultati di una certa rilevanza e per questo meritano qualche approfondimento di seguito riportato.

Keiller e Sleath (1976) condussero un numero limitato di esperimenti

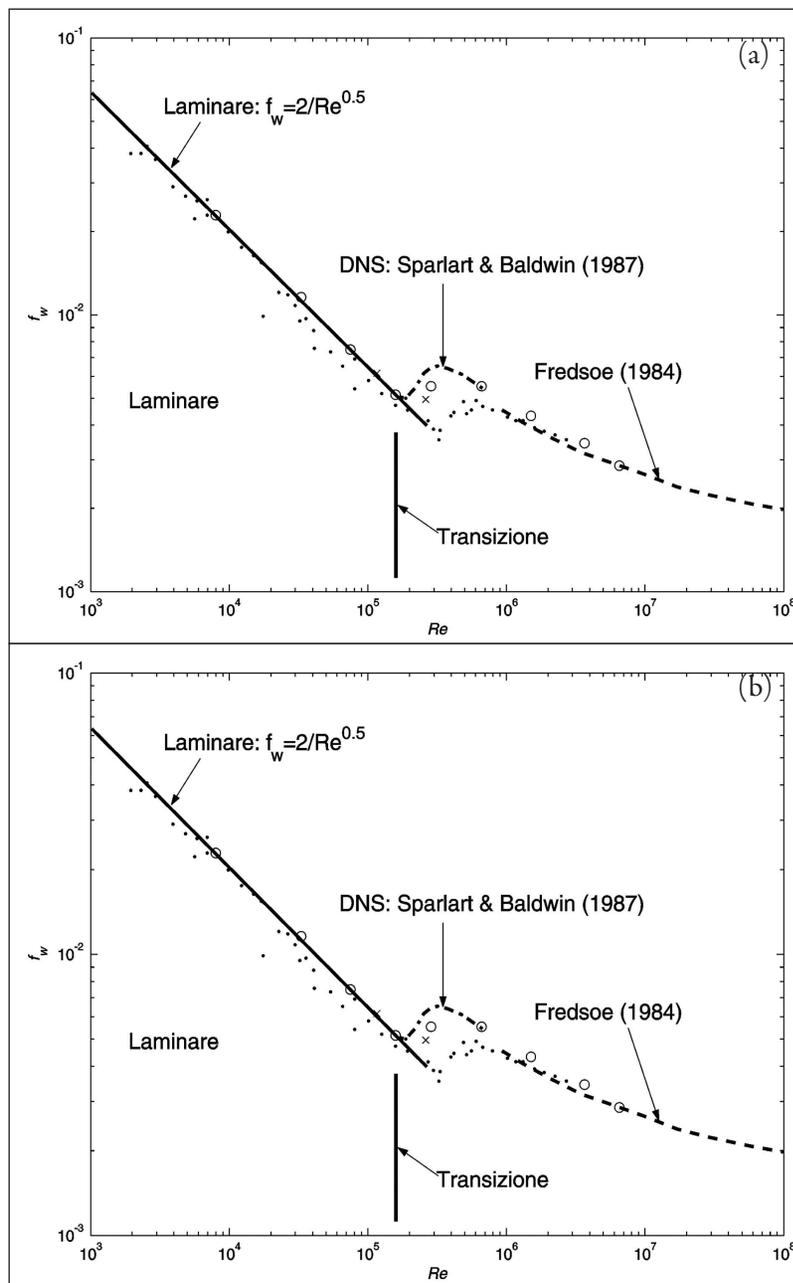


Figura 13 - Andamento del coefficiente di attrito in funzione del numero di Reynolds su parete liscia a); andamento dello sfasamento tra velocità e tensioni tangenziali alla parete b); (punti: Kamphuis, 1975; triangolo: Hino et al., 1983; croci: Sleath, 1987; cerchi: Jensen et al., 1989).

di misure di velocità su di un fondo piano (su cui erano incollati elementi sferici), che veniva fatto oscillare armonicamente in aria. Le misure furono effettuate con un filo caldo che non consentiva particolare accuratezza, soprattutto in prossimità del fondo. Tuttavia, per la prima volta, vennero osservati nei profili di velocità due massimi ogni mezzo ciclo, il primo in fase con il massimo della forzante, mentre il secondo in prossimità dell'inversione del moto. La generazione del massimo secondario è stata giustificata con l'emissione di getti di fluido associati al rilascio di vortici dagli elementi della scabrezza. Questa ipotesi, avvalorata dalle visualizzazioni effettuate nel caso di elementi di scabrezza cubici da Krstic e Fernando (2001), che hanno mostrato la formazione di un dipolo di vorticità che si allontana dal fondo sugli elementi di scabrezza nella fase di inversione del fluido, è stata confermata numericamente (tramite DNS) solo recentemente da Fornarelli e Vittori (2006).

Jensen et al. (1989) hanno effettuato esperimenti in un tunnel ad "U" di sezione rettangolare sia su fondo liscio (per elevati numeri di Reynolds, fino a $Re=6 \times 10^6$) che su fondo scabro (per diversi valori di $a/k_s=400 \div 3700$). Per la prima volta, tramite misure condotte con LDA ad una e a due dimensioni, il moto viene rilevato e discusso in grande dettaglio, con particolare riguardo alle caratteristiche della turbolenza.

Più recentemente l'attenzione si è focalizzata non tanto sul campo di moto, quanto piuttosto sulla generazione di forme di fondo di piccola scala e sulla loro influenza sulle resistenze rilevate dal moto ondoso. In particolare, chi scrive ha studiato la formazione e l'evoluzione di *ripple* soggetti ad onde regolari (Faraci e Foti, 2001) e ad onde irregolari (Faraci e Foti, 2002).

Infine, si segnala una interessante campagna sperimentale su sedimenti molto grossolani recentemente condotta da Hatipoglu et al. (2004), con la finalità di stabilire il coefficiente di resistenza f_w .

Ritorniamo ora sugli studi sperimentali di Jonsson e Carlsen (1976), condotti in un tubo ad "U" utilizzando un micromulinello. Nonostante i limiti posti dagli strumenti di misura adottati, invero oggi considerati obsoleti, gli autori hanno misurato in grande dettaglio i profili di velocità alle diverse fasi del ciclo su di un fondo molto scabro costituito da elementi triangolari (vedere Figura 14 in cui è riportata una rappresentazione del fondo, mentre nella Figura 15 sono rappresentati i profili di velocità alle diverse fasi del ciclo relativi al test n. 1, ossia quello per cui si aveva un numero di Reynolds pari a $Re=6 \times 10^6$ e una scabrezza relativa $a/k_s=124$).

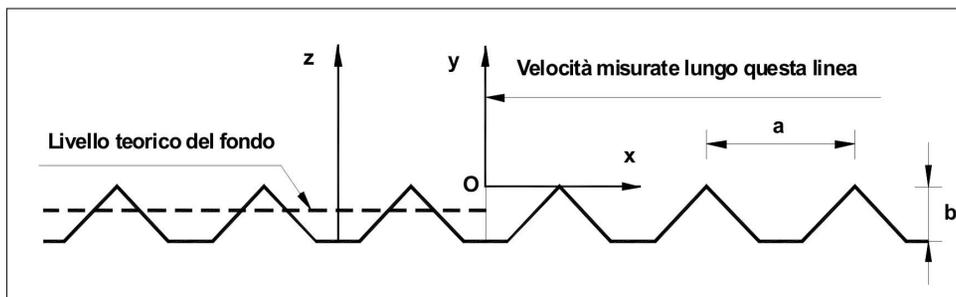


Figura 14 - Schema del fondo bidimensionale adottato da Jonsson e Carlsen (1976) per simulare una macroscabrezza.

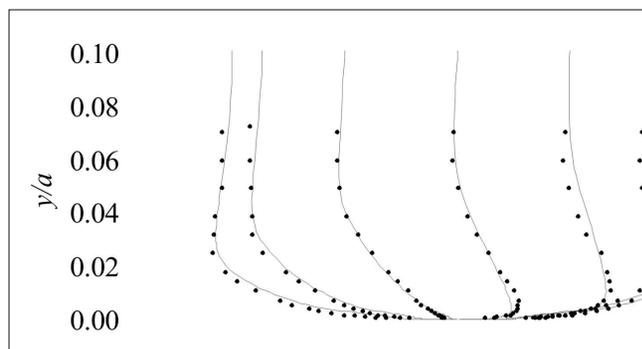


Figura 15 - Test n.1 di Jonsson e Carlsen (1976). Andamento dei profili di velocità durante il ciclo. ($Re=6 \times 10^6$; $k/a=8.1 \times 10^{-3}$). Le linee continue sono state ottenute adottando il modello k- ϵ proposto da Foti e Scandura (2004).

Tali misure mostrarono che lo spessore dello strato limite risultava molto maggiore di quello relativo al caso di fondo piano e consentirono, tra l'altro, la valutazione delle velocità di attrito dalla quale si evince che lo sfasamento tra la tensione tangenziale massima alla parete e la velocità massima è di 25° .

Passando ad un'analisi del moto su parete scabra basata anche su risultati più recenti, brevemente ci si soffermerà su tre aspetti: (i) il moto medio; (ii) la turbolenza; (iii) le resistenze. Per quanto riguarda il moto medio, con riferimento alla Figura 16, viene riportato l'andamento della velocità media in mezzo ciclo sia su fondo scabro ($k_s^+=84$) sia su fondo liscio.

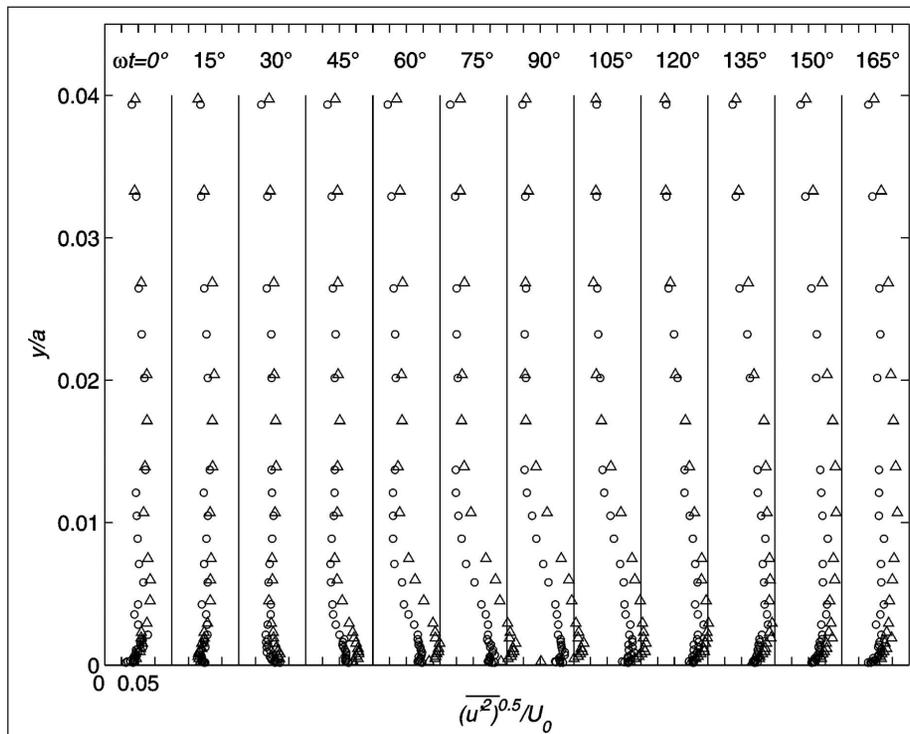


Figura 16 - Confronto tra profili di velocità alle diverse fasi del ciclo nel caso di fondo scabro (triangoli; $k_s^+=84$) e nel caso di fondo liscio (cerchi). Dati desunti da Jensen et al. (1989).

Si può notare che:

- la descrizione dell'evoluzione del moto durante il ciclo che è stata fatta nel caso di fondo liscio, continua ad essere qualitativamente valida anche nel caso di fondo scabro;
- l'introduzione di una parete scabra, tuttavia, produce una diminuzione della velocità media, sebbene tale effetto tenda a scomparire a distanza dalla parete (alla quota $y/a=0.01$ i due profili di fatto coincidono);
- la riduzione della velocità è dovuta ad una sorta di effetto ritardante prodotto dalla scabrezza.

Per quanto riguarda invece la turbolenza, la Figura 17 mostra l'andamento della RMS di u' (ossia della componente di agitazione della velocità) in mezzo ciclo sia su fondo scabro (triangoli, $k_s^+=84$), sia su fondo liscio (cerchi).

L'andamento delle quantità turbolente conferma quanto affermato riguardo ai profili di velocità, sebbene in questo caso le differenze tra parete liscia e parete scabra tendano a scomparire ad una distanza dal fondo maggiore ($y/a=0.03$). Infatti, contemporaneamente ad una diminuzione della velocità media, si osserva un aumento delle quantità turbolente dovuto al trasferimento di quantità di moto nella direzione verticale

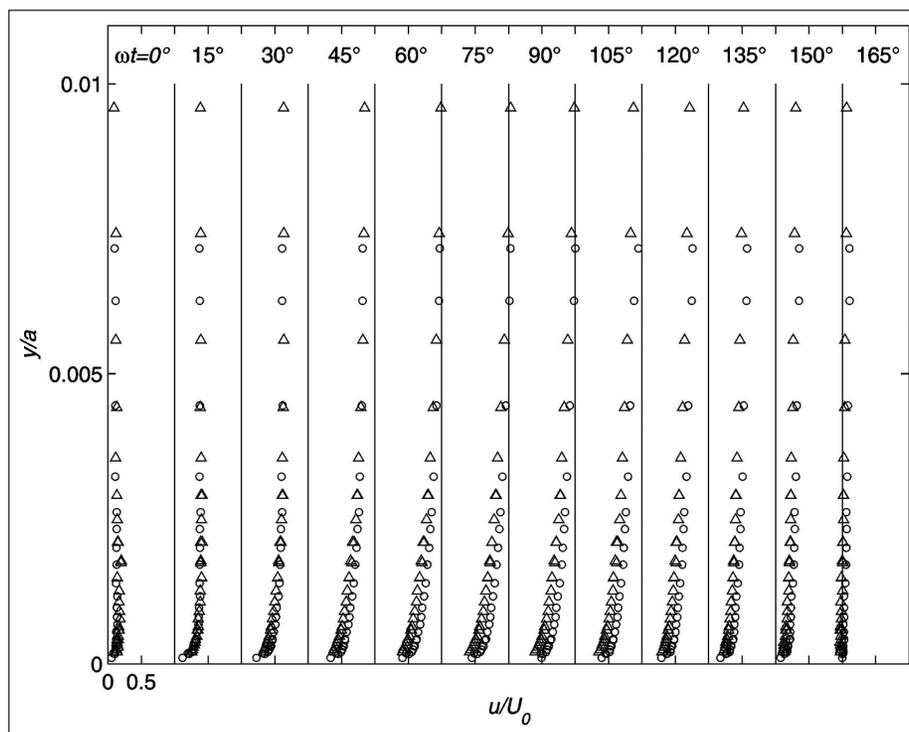


Figura 17 - Andamento alle diverse fasi del ciclo della RMS di u' sia su parete scabra (triangoli, $k_s^+ = 84$) che su parete liscia (cerchi). Dati desunti da Jensen et al. (1989).

dovuto alla presenza degli elementi della scabrezza. Si noti peraltro la presenza di turbolenza anche durante le prime fasi del ciclo, dovuta alla diffusione, ossia come residuo delle fasi precedenti.

Infine, per quanto concerne le resistenze, con riferimento alla Figura 18, che riporta il coefficiente d'attrito in funzione del solo parametro a/k_s , si può notare che gli strati limite turbolenti di parete scabra sono governati soltanto da detto parametro, il quale gioca un ruolo nei confronti dell'andamento del coefficiente d'attrito simile a quello del numero di Reynolds nel caso di parete liscia.

Particolarmente interessante nel citato grafico di Figura 18 la presenza di punti corrispondenti ad elevate scabrezze (rombi).

E' questo infatti il caso, riscontrabile nella pratica, di *armour blocks* per la protezione di scavi. In detti casi il rapporto a/k_s può essere addirittura inferiore ad 1, inoltre, dalla ben nota equazione di Morrison circa le azioni sui corpi immersi, si può notare che le forze che agiscono sui singoli massi (invero rilevanti, essendo dominate solo dall'inerzia) sono tali per cui f_w diventa dipendente da $(a/k_s)^{-1}$ mano a mano che a/k_s tende a zero (Sumer, comunicazione personale). Bagnold (1946) indicava invece un andamento costante per a/k_s tendente a zero, probabilmente dovuto al fatto che le sue misure erano rivolte alla determinazione delle dissipazioni, ossia a casi in cui le forze di inerzia esplicano un ruolo minore.

Interazione tra onde e correnti codirezionali

Lo studio sperimentale di laboratorio dell'interazione tra onde e correnti su parete liscia è stato condotto da numerosi autori. In particolare, Sarpkaya (1966) e Ramaprian e Tu (1983) hanno condotto esperimenti in condotti cilindrici circolari, mentre Thomas (1981), Kemp e Simons (1982), Thomas (1990) hanno utilizzato una canaletta.

Questo tipo di moto presenta numerose peculiarità rispetto al caso di sole onde, che possono essere messe in luce da un'analisi sintetica del lavoro di Lodhal et al. (1998), condotto in un tunnel di sezione circolare di raggio

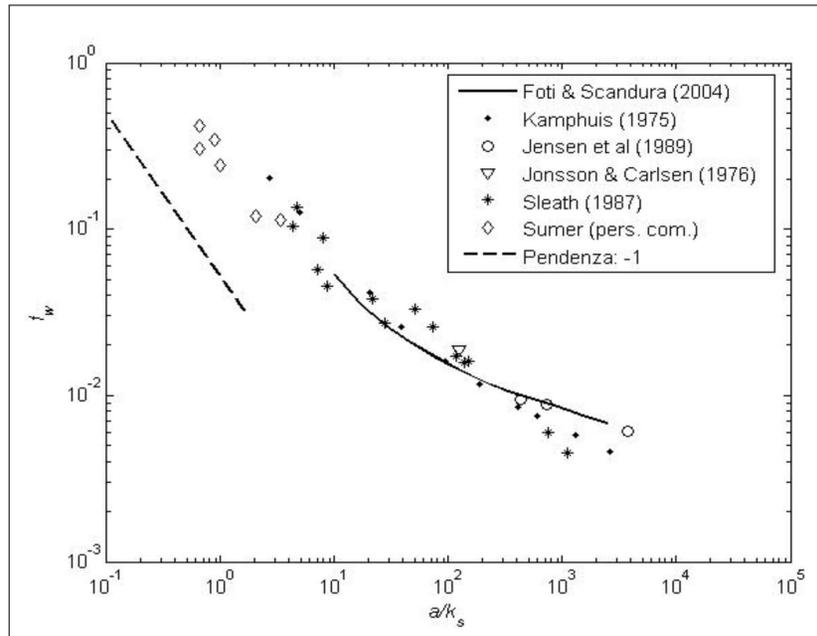


Figura 18 - Coefficiente d'attrito f_w su parete scabra in moto puramente turbolento in funzione dell'inverso della scabrezza relativa (a/k_s).

R , piuttosto che nei più comuni tunnel di sezioni rettangolari, per evitare effetti dovuti a moti secondari.

In particolare, detti autori hanno dimostrato come, sovrapponendo un'onda ad una corrente, con riguardo ancora una volta alle tensioni tangenziali medie alla parete, queste ultime possono:

- rimanere di valore costante;
- diminuire;
- aumentare.

La riduzione delle tensioni tangenziali dipende da un fenomeno detto di rilaminarizzazione, che può essere meglio compreso dall'analisi della Figura 19 che riporta alcuni risultati di Lodhal et al. (1998) espressi in funzione dei parametri adimensionali che governano il fenomeno, e precisamente:

- Re = numero di Reynolds del moto oscillante;
- Re_c = numero di Reynolds della corrente;
- R/δ = rapporto tra il raggio del condotto e lo spessore dello strato limite.

In particolare, si noti come nel caso di Figura 19a, ossia di sola corrente, si abbia un moto turbolento ottenuto in un condotto di raggio $R=9.5$ cm imponendo una velocità $V=3.5$ cm/s (Reynolds della corrente pari a $Re_c=6.650$). Sovrapponendo a tale moto quello oscillante caratterizzato da uno strato limite laminare caratterizzato da un numero di Reynolds dell'onda pari a $Re=1.0 \times 10^5$ si osserva una rilaminarizzazione, ossia una regolarizzazione del moto (vedere Fig. 19b). Solo sovrapponendo un'onda che genera uno strato limite turbolento (ossia imponendo un'onda con strato limite caratterizzato da un numero di Reynolds superiore a quello critico e precisamente pari a $Re=2.0 \times 10^5$) la turbolenza riappare (Fig. 19c).

La scomparsa della turbolenza in casi analoghi a quello descritto è stata studiata da Sarpkaya (1966) e Ramaprian e Tu (1983).

Da quanto detto risulta quindi cruciale la comprensione del fenomeno della transizione in presenza di onde e di correnti sovrapposte. La complessità del fenomeno può essere colta dall'esame della Figura 20, realizzata sulla base dei dati di Lodhal et al. (1998) e di un'analisi di stabilità (linea continua). Detta Figura riporta in ascisse il numero di Reynolds della corrente Re_c mentre in ordinate quello dell'onda Re ; da essa si evince come fissando un valore del numero di Reynolds della corrente, per esempio $Re_c=5000$, il moto combinato risulta turbolento

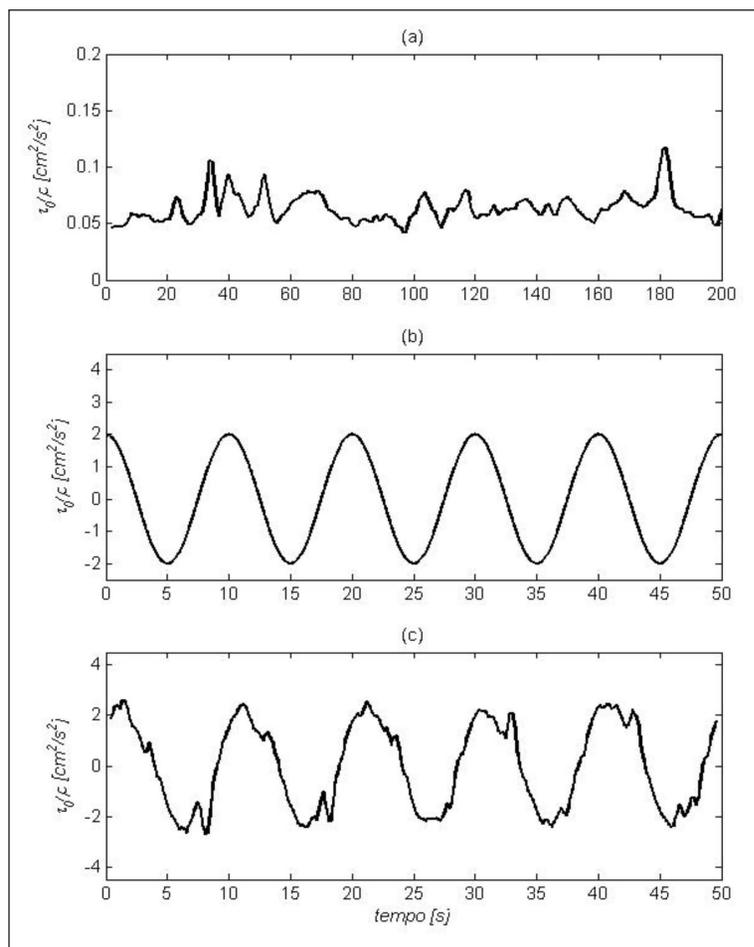


Figura 19 - Andamento delle tensioni tangenziali alla parete nel caso di: a) solo corrente ($Re=0$; $Re_c=6.6 \times 10^3$, $R=9.5$ cm, $V=3.5$ cm/s); b) correnti sovrapposte ad onde che produrrebbero uno strato limite laminare ($Re=1.0 \times 10^5$; $Re_c=6.6 \times 10^3$); c) correnti sovrapposte ad onde che produrrebbero uno strato limite turbolento ($Re=2.0 \times 10^5$; $Re_c=6.6 \times 10^3$). Dati desunti da Lodhal et al. (1998).

fintantoché il numero di Reynolds dell'onda è di circa $Re=10^4$, quindi il moto combinato viene rilaminarizzato per valori compresi tra $10^4 < Re < 10^5$, per ridiventare turbolento per $Re > 10^5$. Il motivo per cui ciò avviene può essere meglio inteso esaminando i diversi regimi di moto che si possono realizzare in termini del rapporto tra la velocità media della corrente V e la velocità massima di oscillazione U_o .

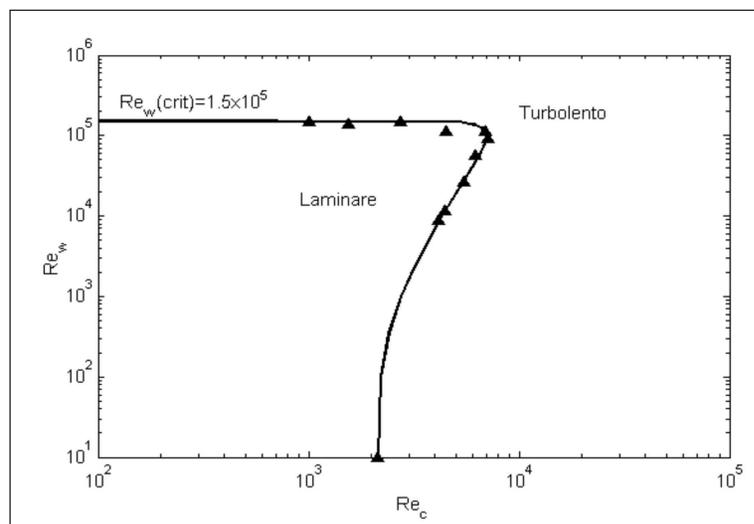


Figura 20 - Analisi della transizione alla turbolenza in presenza di un moto combinato di onde e correnti (codirezionali) per $R/\delta=53$.

In formule:

$$\frac{V}{U_o} = f(Re, Re_c, R/\delta) \quad (6)$$

In base a detto parametro, infatti, è possibile definire due diversi regimi di moto: il regime di correnti prevalenti ($V/U_o > 1$) e quello di onde prevalenti ($V/U_o < 1$). Allorché detto parametro risulta inferiore a circa 0.3, il moto combinato risulta sostanzialmente dominato dal moto ondoso. In altre parole, la componente ondosa prende il sopravvento per cui se essa è laminare, allora anche il moto combinato sarà laminare, se invece la componente ondosa è turbolenta, allora anche il moto combinato sarà turbolento. Ovviamente tutto ciò ha delle ripercussioni sullo stato tensionale alla parete. Poiché il campo di moto della sola componente ondosa può realizzarsi in condizione laminare, turbolenta o in regime di transizione, si ha che le tensioni tangenziali:

- aumentano quando il moto combinato si realizza nel regime di onde prevalenti e la componente ondosa è in moto turbolento;
- diminuiscono quando il moto combinato si realizza nel regime di onde prevalenti e la componente ondosa è in moto laminare;
- restano immutate quando il regime è di correnti prevalenti.

Tutto ciò è sinteticamente e schematicamente riportato nella Figura 21, nella quale la tensione tangenziale alla parete, adimensionalizzata con quella della sola corrente, è riportata in funzione del numero di Reynolds del moto ondoso Re .

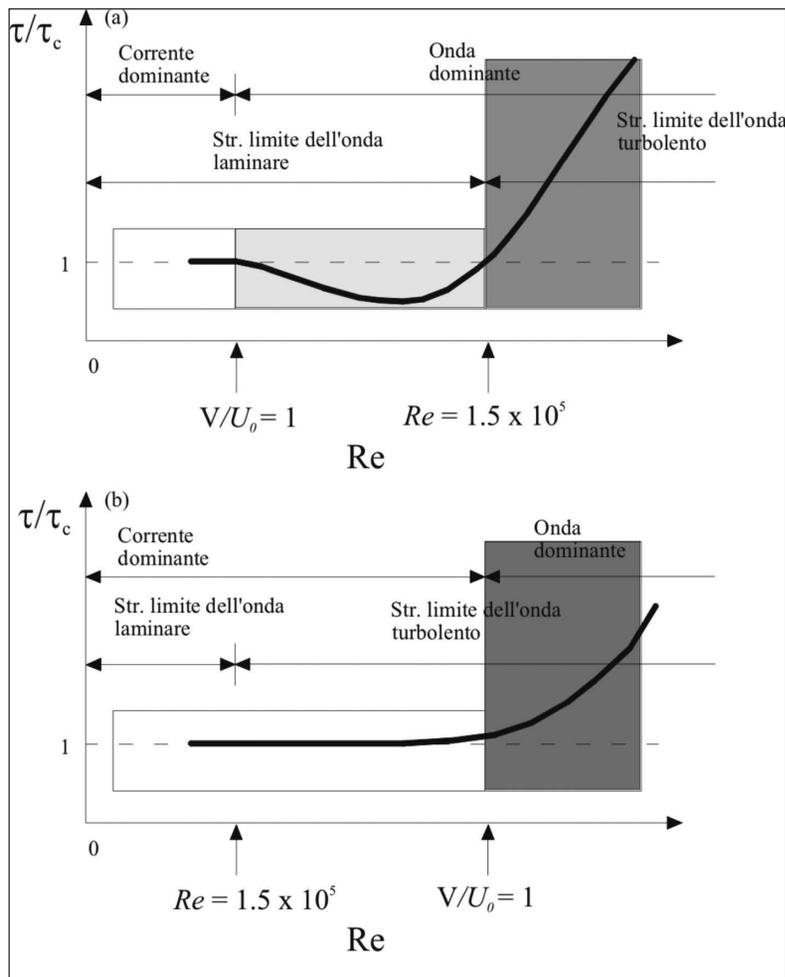


Figura 21 - Descrizione qualitativa delle tensioni tangenziali alla parete nel caso di onde e correnti sovrapposte in funzione del numero di Reynolds dell'onda. Da notare nel pannello a) la zona evidenziata in grigio chiaro, che mostra come la sovrapposizione possa produrre una diminuzione delle tensioni tangenziali alla parete allorché in regime di onda dominante lo strato limite dell'onda risulti laminare.

In particolare, nel pannello superiore si vede nella zona intermedia, indicata in grigio chiaro, come la sovrapposizione possa produrre una diminuzione delle tensioni tangenziali alla parete allorché in regime di onda dominante lo strato limite dell'onda risulti laminare.

E' opportuno segnalare che i risultati prima citati, legati a tre aspetti essenziali, ovvero:

- la rilaminarizzazione;
- la soppressione della turbolenza;
- la diminuzione delle tensioni tangenziali;

non sono ancora stati confermati numericamente.

Interazione tra onde e correnti ortogonali

Il caso di interazione tra onde e correnti ortogonali è stato oggetto di poche sperimentazioni anche a causa delle difficoltà operative. In tal senso, il primo a condurre sperimentazioni fu Visser (1986), che condusse esperienze su due diversi tipi di scabrezza. Successivamente, Ranasoma e Sleath (1994), condussero esperimenti volti a studiare la formazione di forme di fondo di piccola scala, studio poi approfondito da Andersen e Faraci (2003). Più recentemente, Musumeci et al. (2006) hanno investigato il campo di moto generato da onde e correnti ortogonali su due diversi tipi di scabrezza, rilevando interessanti quanto inaspettati risultati che, a parere di chi scrive, meritano di essere qui approfonditi.

Gli esperimenti citati sono stati condotti nell'apparato rappresentato in Figura 22, opportunamente progettato per la generazione di onde regolari e di correnti trasversali. Particolare cura e notevoli energie sono state spese

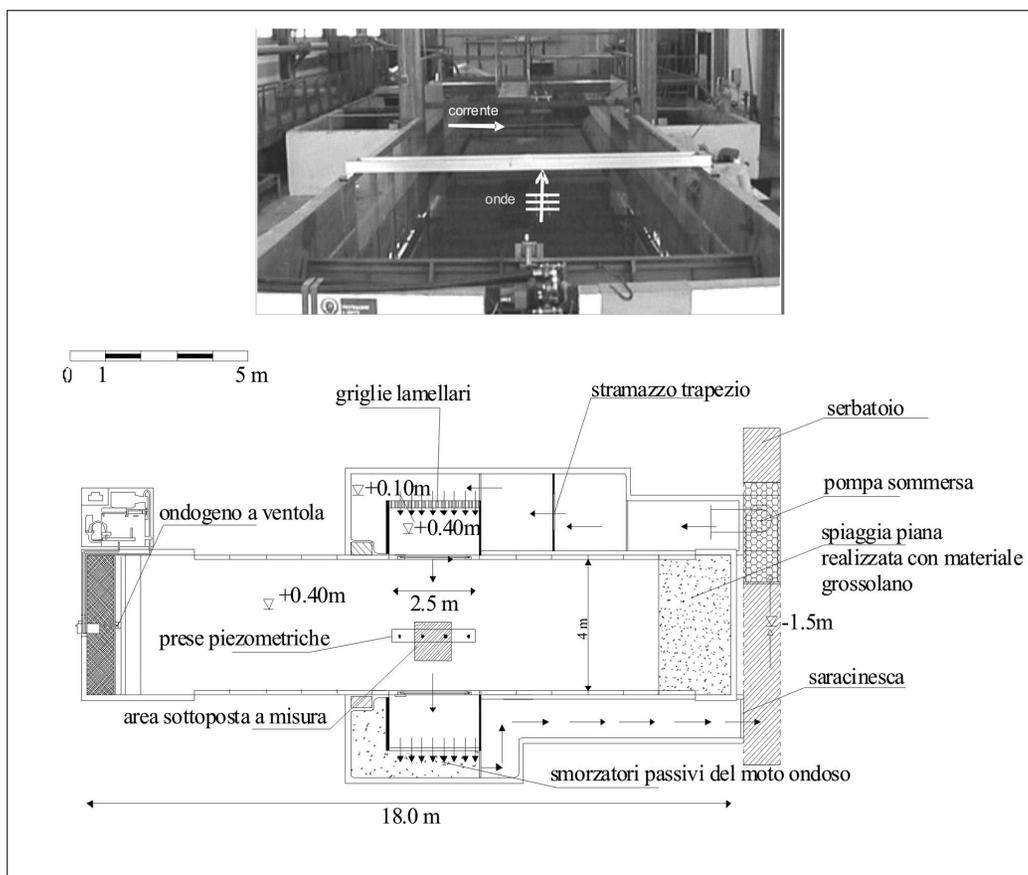


Figura 22 - Vasca per lo studio di fenomeni idrodinamici in presenza di onde e correnti ortogonali in dotazione al laboratorio di Idraulica dell'Università di Catania. Velocità massima della corrente di ricircolo: 25 cm/s; caratteristiche del moto ondoso realizzabili: $T=0.8 \div 2$ s; $H_{max} = 15$ cm.

per garantire la perfetta ortogonalità della corrente immessa in vasca rispetto alla propagazione del moto ondoso. Gli esperimenti hanno avuto per obiettivo quello di rilevare i profili di velocità nella direzione della corrente attraverso un ADV e, noti i profili di velocità, determinare gli effetti sul moto in termini di scabrezza apparente. Le notevoli dimensioni del volume di controllo dell'ADV, purtroppo, non hanno consentito di rilevare con adeguata precisione anche quanto avveniva nella direzione del moto ondoso, giacché lo strato limite delle onde era certamente troppo piccolo e precisamente dell'ordine di qualche millimetro, per poter essere rilevato con il suddetto strumento di misura delle velocità. In altre parole, gli esperimenti sono stati rivolti a determinare gli effetti del moto ondoso su di una corrente che si propaga ortogonalmente ad esso su di un fondo liscio oppure su di un fondo scabro e sono stati condotti per valori dei parametri macroscopici del sistema sintetizzati in Tabella 2.

Tabella 2 - Valori dei parametri macroscopici adottati nella sperimentazione. La profondità dell'acqua è stata mantenuta costante per tutti gli esperimenti e pari a 30 cm (dati desunti da Musumeci et al., 2006).

	 Piccola scabrezza (sabbia: d ₅₀ =0.25 mm)			 Grande scabrezza (ghiaia: d ₅₀ =30.00 mm)		
Corrente	Q[m ³ /s]=0.033			Q[m ³ /s]=0.035		
Onde	H[m]=	0.085	0.105	H[m]=	0.085	0.105
	T[s]=	0.8	0.8	T[s]=	0.8	0.8
		1.0	1.0		1.0	1.0
		1.2	1.2		1.2	1.2
		1.4	1.4		1.4	1.4
Onde più corrente		1.6	-		1.6	-
	Q[m ³ /s]=0.033			Q[m ³ /s]=0.035		
	H[m]=	0.085	0.105	H[m]=	0.085	0.105
	T[s]=	0.8	0.8	T[s]=	0.8	0.8
		1.0	1.0		1.0	1.0
	1.2	1.2		1.2	1.2	
	1.4	1.4		1.4	1.4	
	1.6	-		1.6	-	

E' opportuno ricordare che una stima della scabrezza apparente k_s può essere effettuata assumendo che il profilo di velocità in prossimità del fondo sia descritto dalla ben nota legge logaritmica:

$$\frac{V}{v^*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{30y}{k_s} + B \right) \quad (7)$$

in cui V è la velocità media nella direzione della corrente, v^* è la velocità d'attrito, k è la costante di von Karman, y è la distanza verticale dal fondo, B è una funzione di $k_s^+ = v^* k_s / \nu$. La logica della procedura è simile a quella proposta da Fredsøe et al. (1999) e può essere meglio compresa alla luce di quanto indicato in Figura 23.

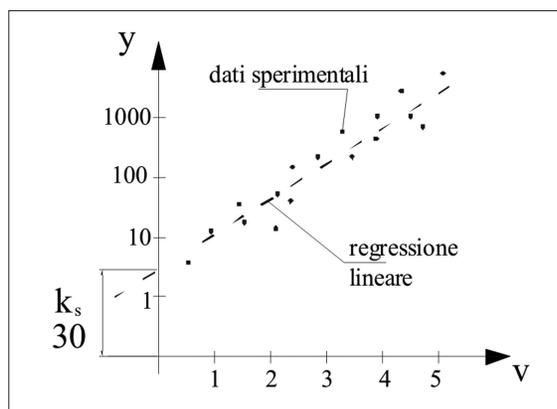


Figura 23 - Metodologia proposta da Fredsøe et al. (1999) per la stima della scabrezza al fondo come intercetta del profilo di velocità in un diagramma semilogaritmico.

Basta, infatti, rappresentare il profilo di velocità in un diagramma semilogaritmico e interpolare i dati attraverso una regressione lineare. L'intercetta così ricavata è pari a $k_s/30$.

Come si evince dalla Figura 24, i risultati mostrano che, sebbene i parametri idrodinamici nei due casi siano simili (profondità, portata, periodo e altezze d'onda), adottando due scabrezze significativamente diverse, scelte in maniera tale che con la scabrezza maggiore lo strato limite dell'onda sia turbolento, l'idrodinamica in presenza di onde e correnti ortogonali risulta profondamente diversa.

Perlomeno con riferimento al range dei parametri investigati, le velocità in direzione della corrente in prossimità del fondo sono più grandi nel caso di onde e correnti che rispetto al caso di sole correnti, ovvero più piccole, a secondo che il fondo sia poco o molto scabro, rispettivamente.

Conseguentemente, la scabrezza apparente può diminuire o aumentare fino ad essere più grande di un ordine di scabrezza rispetto al caso di sole correnti.

Nel caso di moto oscillante e corrente codirezionale, come già ricordato, il motivo per cui le tensioni medie alla parete possono rimanere invariate, diventare più piccole o più elevate rispetto al caso di sole correnti è stato spiegato da Lodhal et al. (1998). Tale risultato sembra spiegare anche quanto avvenga nel caso di onde e correnti ortogonali, ossia quanto descritto nella Figura 24 anzi citata. Sinteticamente si può quindi affermare che la scabrezza apparente e le tensioni tangenziali medie alla parete, nel caso di sovrapposizione di onde e correnti sia codirezionali che ortogonali, risultano dipendere dalla combinazione tra regime idrodinamico (*wave dominated*, ossia $v/U_o < 1$, oppure di *current dominated*, ossia $v/U_o > 1$) e regime dello strato limite generato dalle onde (laminare o turbolento).

Questioni ancora aperte

I risultati della ricerca sull'interazione onde-correnti-fondali marini, sebbene interessanti, non possono certo dirsi esaustivi. Infatti, anche nell'ipotesi di drastiche semplificazioni come quelle adottate nei paragrafi precedenti, vi sono numerosi aspetti che meriterebbero di essere indagati, soprattutto al fine di far emergere gli effetti:

1. della non uniformità (come rapide variazioni di scabrezza, ovvero variazioni dovute ad ambienti convergenti o divergenti, oppure variazioni nella composizione granulometrica del fondo, etc.);
2. di angoli d'attacco diversi tra onde e correnti;
3. di onde asimmetriche o irregolari;
4. del frangimento (ossia analisi degli effetti legati alla turbolenza generata esternamente allo strato limite);
5. delle popolazioni bentoniche;
6. dell'isteresi dei fondali;
7. dell'idrodinamica sul fondale (ossia formazione di forme di fondo di piccola, media e grande scala e analisi delle condizioni per la loro coesistenza. Si osservi al riguardo la Figura 25 che riassume sinteticamente le possibili strutture sedimentarie di piccola e media scala in presenza di onde e correnti).

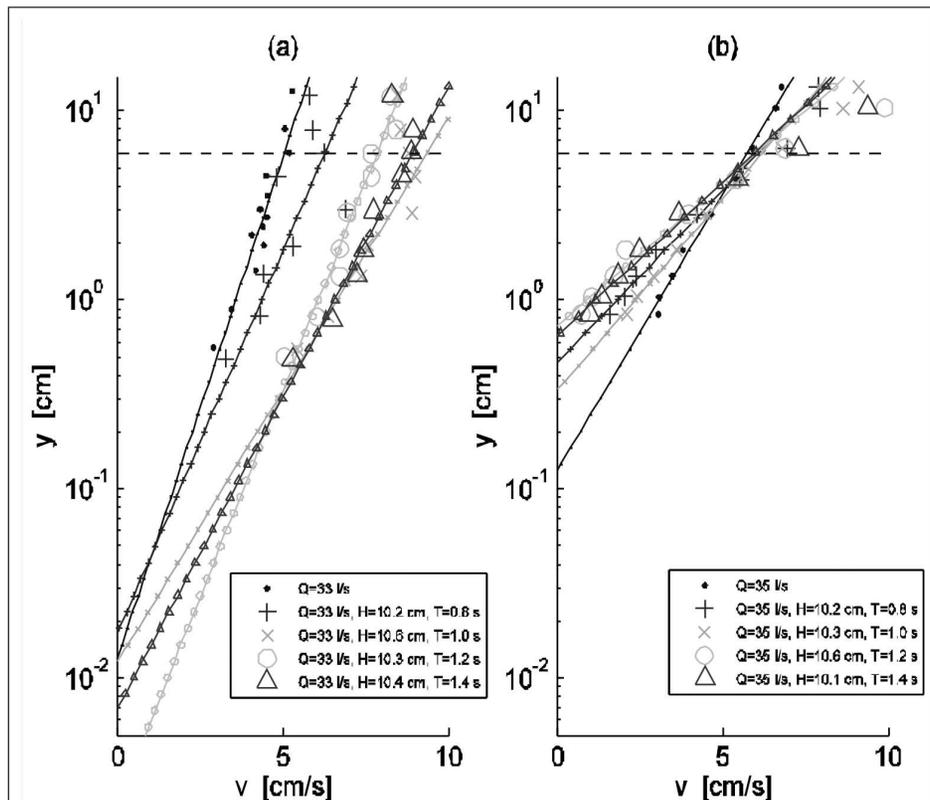


Figura 24 - Velocità in direzione della corrente. Da notare come la sovrapposizione di un'onda produce nel caso (a), ossia di fondo poco scabro, una diminuzione della scabrezza apparente, mentre nel caso (b), ossia di fondo molto scabro, un aumento di scabrezza apparente (la profondità dell'acqua è stata mantenuta costante per tutti gli esperimenti e pari a 30 cm).

La lista potrebbe continuare a lungo e dunque non mancano certo gli argomenti degni di attenzione.

Tuttavia, un problema spesso evocato come cruciale è quello di individuare il giusto approccio metodologico.

Riguardo alla morfodinamica costiera, ad esempio, Battjes (2006) indica un duplice approccio: il primo è quello riduzionista, basato su un approccio "bottom-up", che nella fattispecie parte dallo studio della turbolenza e dalla quantificazione del trasporto solido per prevedere poi evoluzioni morfologiche su tempi più ampi (un esempio è dato da Guizen et al., 2003); il secondo è il metodo olistico, basato sull'auto-organizzazione (*self organization* nella letteratura anglosassone), il cui focus è invece rivolto alla formulazione di relazioni fenomenologiche di grande scala spaziale (un esempio è quello di Coco et al., 2003).

Questa divisione quasi manichea appare superata da quanto ritrovato da alcuni autori. Al riguardo ci si può riferire a Reniers et al. (2004) che, studiando la morfodinamica di una spiaggia a tasca sotto l'azione di gruppi d'onde, hanno cercato di rispondere al quesito: la risposta del fondo è libera o forzata? A tale riguardo hanno trovato che il moto delle onde subarmoniche non è essenziale per lo sviluppo di strutture periodiche, la vorticità dovuta al frangimento può invece produrre celle di ricircolazione che persistono molto più a lungo dei gruppi di onde che le hanno generate. Secondo questi risultati, uno stato di uniformità longshore, soggetto a gruppi di onde frangenti, sviluppa celle di ricircolazione la cui variabilità spaziale è imposta proprio dalla variazione spaziale dei gruppi d'onda incidenti. Pertanto il disturbo iniziale può dirsi forzato, ma la localizzazione del disturbo iniziale del fondo si verifica invece in maniera casuale. Tuttavia, dal momento in cui si manifesta il disturbo in poi, la presenza di una incisione, convogliando maggiore portata, genera un sistema di strutture che sembra governato da una auto-organizzazione. In altre parole ci sono aspetti della risposta che possono dirsi forzati ed altri che possono dirsi, sotto certe condizioni, liberi.

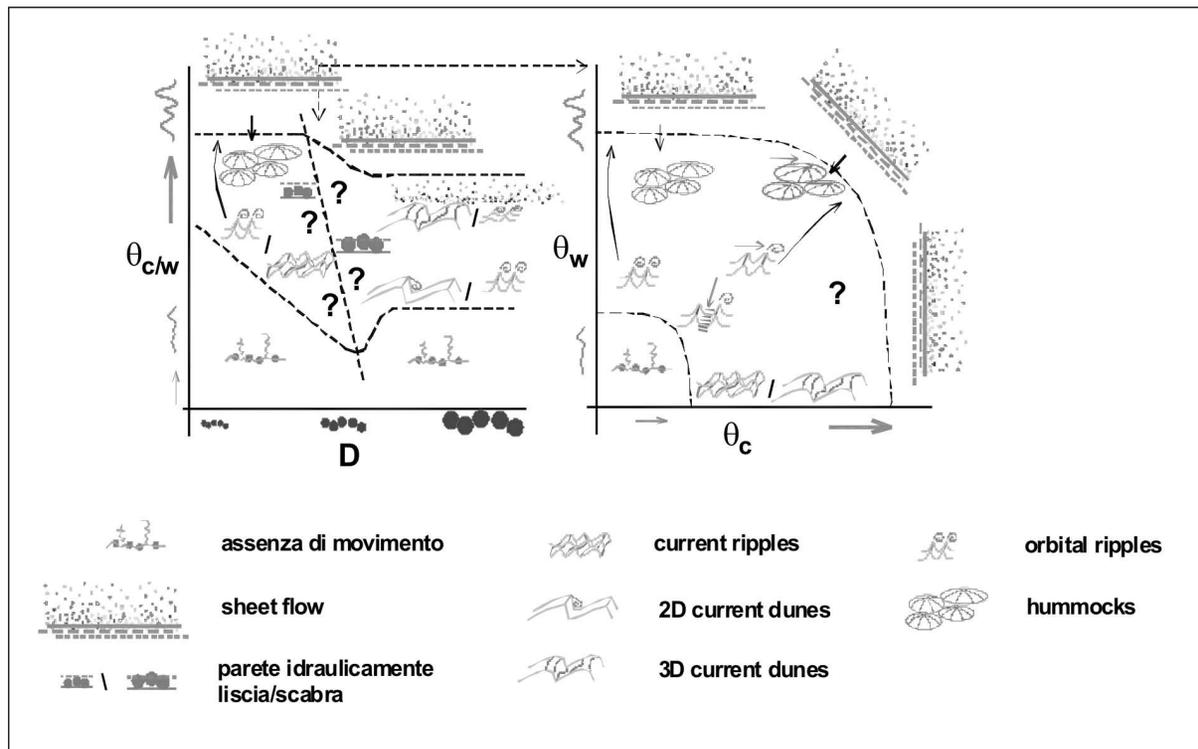


Figura 25 - Rappresentazione schematica dei campi di esistenza delle forme di fondo (adattato da Kleinahns, 2006, comunicazione personale).

Pertanto il problema della scelta del metodo riduzionistico piuttosto che di quello olistico sembra, a parere di chi scrive, come voler decidere se nell'idraulica sia migliore l'approccio differenziale o quello integrale o se in una officina sia più utile la chiave inglese delle pinze: dipende dal problema che si affronta.

Più interessante sembra invece a chi scrive la direzione a cui rivolgere lo sguardo della ricerca. Kamphuis (2006) in riferimento a tale questione e riguardo alle discipline inerenti all'ingegneria costiera fa una analisi del senso della ricerca negli ultimi decenni. Con riferimento alla Figura 26, definisce epoca della modernità i decenni dagli

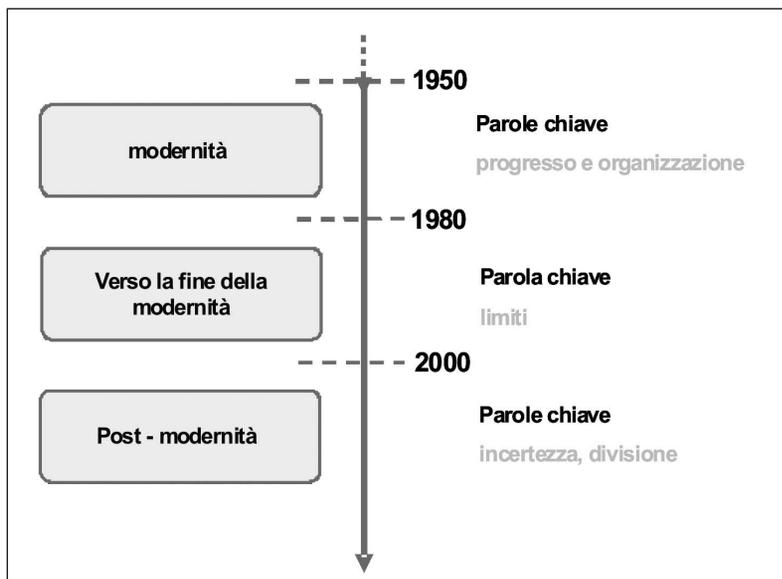


Figura 26 - Evoluzione della ricerca in ambito costiero: libero adattamento da Kamphuis (2006).

anni '50 agli anni '80, quando si credeva che i limiti alla ricerca risiedessero solo nella possibilità di adeguati investimenti. Si pensava infatti che con adeguati investimenti qualunque problema sarebbe stato risolto; una fiducia sostenuta anche dall'avvento e dalla diffusione dei computer. Successivamente si è visto che molti problemi ingegneristici, pur affrontati con le conoscenze più all'avanguardia, non venivano tuttavia risolti adeguatamente; basti pensare agli effetti devastanti di molte opere costiere sui litorali. In altre parole l'ingegneria costiera mostra numerosi limiti. Limiti che dal 2000 innescano non solo un senso di incertezza diffusa nelle reali capacità degli ingegneri costieri di poter governare il cambiamento secondo i nuovi paradigmi dello sviluppo sostenibile, ma che generano inoltre divisioni sempre più nette tra gli ingegneri costieri e gli scienziati dell'ingegneria costiera. Ovviamente cercare di mitigare questa tendenza non è facile. Tuttavia, il superamento di questo stato di cose può forse passare attraverso il tentativo di realizzare numerosi luoghi di dibattito, anche virtuali, nei quali coinvolgere non soltanto scienziati afferenti a discipline diverse, ma altresì soggetti portatori di interessi comuni o affini, sebbene estranei alla comunità scientifica in senso stretto. Solo mediante il confronto e quindi la critica è possibile infatti innescare un processo di fertilizzazione incrociata al fine di favorire la comprensione delle esigenze e dei limiti della ricerca di base e, al contempo, la sensibilizzazione dei ricercatori verso altre istanze.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare:

-il comitato organizzatore del XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche per l'invito a tenere una delle relazioni generali nell'ambito del citato Convegno, che, con alcune modifiche e integrazioni, costituisce la parte essenziale del presente articolo;

-il professor Mutlu Sumer della Denmark Technical University per avermi cortesemente fornito il materiale della sua presentazione generale tenuta in occasione del Euromech Colloquium n. 451, da cui ho attinto a piene mani;

-i professori: P. Blondeaux, G. Bonanno, G. Cozzo, D. Foster, L. Franco, J. Fredsøe, E. Larcas, M. Kleinhans, E. Pugliese Carratelli, G. Rossi, P. Scandura, G. Seminara, J. Trowbridge, G. Vittori, per le discussioni, il materiale fornito e i numerosi consigli prestati.

Un grazie particolare, infine, ai miei più giovani colleghi: E. Capodicasa, L. Cavallaro, C. Faraci, R. Foti, A. Marini e R. E. Musumeci.

Bibliografia

Akhavan R., Kamm R. D., Shapiro A. H. (1991) - *An investigation of transition to turbulence in bounded oscillatory Stokes flows*. J. Fluid Mech., 225: 395-422.

Andersen K. H., Faraci C. (2003) - *The wave plus current flow over vortex ripples at an arbitrary angle*. Coastal Eng., 47: 431-441.

Bagnold R. A. (1946) - *Motion of waves in shallow water. Interaction of waves and sand bottoms*. Proc. Royal Soc. London, A, 187: 1-22 (with an additional note by Sir Geoffrey Taylor, F.R.S.).

Battjes J. A. (2006) - *Developments in Coastal Engineering research*. Coastal Eng., 53: 121-132.

Becchi I., Rebaudengo Landò L., Scarsi G. (1974) - *Sullo strato limite turbolento delle onde di gravità progressive. Parte 1^a. Analisi teorica e verifica sperimentale di modelli matematici relativi allo strato limite turbolento delle onde di gravità progressive*. Atti XIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. Napoli, 10-12 ottobre 1974.

Becchi I., Rebaudengo Landò L., Scarsi G. (1974) - *Sullo strato limite turbolento delle onde di gravità progressive. Parte 2^a. Indagine sperimentale sull'influenza della scabrezza sul regime di moto dello strato limite delle onde di gravità progressive*. Atti XIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. Napoli, 10-12 Ottobre 1974.

Blondeaux P., Vittori G. (1999) - *Boundary layer and sediment dynamics under sea waves*. Advances in Coastal and Ocean Engineering, vol. 4: 133-190.

Coco G., Burnet T. K., Werner B. T., Elgar S. (2003) - *Test of self-organization in beach cusp formation*. J. Geo-

- phys. Res., vol. 108, Issue: C3, pp. 46.1-46.11.
- Conley D. C., Inman D. L. (1994) - *Ventilated oscillatory boundary layers*. *J. Fluid Mech.*, 273: 261-284.
- Cowell P. J., Thom B. G. (1994) - *Morphodynamics of coastal evolution*. In RWG Carter & C.D. Woodroffe (editors), *Coastal evolution, late quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 33-86.
- Dedow H.R.A. (1966) - *A pulsating water tunnel for research in reversing flow*. *La Houille Blanche*. Pp. 837-841.
- Driest E.R. van (1956) - *On turbulent flow near a wall*. *J. Aero. Scie.*, 23: 1007-1011.
- Faraci C., Foti E. (2001) - *Evolution of small scale regular patterns generated by waves propagating over a sandy bottom*. *Phys. of Fluids*, 13: 1624-1634.
- Faraci C., Foti E. (2002) - *Geometry, migration and evolution of small-scale bedforms generated by regular and irregular waves*. *Coastal Eng.*, 47: 35-52.
- Fornarelli F., Vittori G. (2006) - *Moto oscillante in prossimità di una parete scabra*. Atti del XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Roma, 10-15 Settembre 2006.
- Foti E. (1994) - *Analisi teorico-sperimentale sui ripples costieri*. Tesi per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca (Università di Firenze, Genova, Padova e Trento).
- Foti E., Blondeaux P. (1995) - *Sea ripple formation: the turbulent boundary layer case (a)*. *Coastal Eng.*, 25: 227-236.
- Foti E., Blondeaux P. (1995) - *Sea ripple formation: the heterogeneous sediment case (b)*. *Coastal Eng.*, 25: 237-253.
- Foti E., Scandura P. (2004) - *A low Reynolds number $k-\epsilon$ model validated for oscillatory flows over smooth and rough wall*. *Coastal Eng.*, 51: 173-184.
- Foti R. (2005) - *La bioluminescenza di dinoflagellati per la caratterizzazione di stati pensionali nei moti oscillanti*. Tesi di laurea A.A. 2004-2005 (relatore E. Foti), Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Catania.
- Foti E., Faraci C., (2005) - *Prediction of bedforms and bed roughness in combined steady and oscillatory flows*. SANDPIT Project Book, Aqua Publ., AA1-Aa12.
- Fredsoe J. (1984) - *Turbulent boundary layer in wave-current motion*. *J. Hydraul. Engng. ASCE*, 110: 1103-1120.
- Fredsoe J., Andersen K. H., Sumer B. M. (1999) - *Wave plus current over a ripple-covered bed*. *Coastal Eng.*, 38: 177-221.
- Grant W. D., Madsen O. S. (1986) - *The continental-shelf bottom boundary layer*. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 18: 265-305.
- Guizen K., Dohmen-Janssen M., Vittori G. (2003) - *IDV bottom boundary layer modeling under combined wave and current; turbulent separation and phase lag effects*. *J. Geophys. Res.*, 108(C1): 16.1-16.15.
- Hatipoglu F., Sumer B. M., Fredsoe J. (2004) - *Wave boundary layers over a bed with large roughness*. 29th International Conference on Coastal Engineering, pp. 202-202.
- Hino M., Sawamoto M., Takasu (1976) - *Experiments on transition to turbulence in an oscillatory pipe*. *JFM*, 75: 193-207.
- Hino M., Kashiwayanagi M., Nakayama A., Hara T. (1983) - *Experiments on the turbulent statistics and the structure of a reciprocating oscillatory flow*. *JFM*, 131: 363-400.
- Jensen B. L., Sumer B. M.; Fredsoe J. (1989) - *Turbulent oscillatory boundary layer at high Reynolds numbers*. *J. Fluid Mech.*, 206: 265-297.
- Jonsson I. G., Carlsen, N. A. (1976) - *Experimental and theoretical investigations in an oscillatory turbulent boundary layer*. *J. Hydraulic Res.*, 14: 45-60.
- Kamphuis J. W. (1975) - *Friction factor under oscillatory waves*. *J. of the Waterways, Harbor and Coastal Eng.*, 101: 135-144.
- Kamphuis J.W. (2006) - *Coastal Engineering-quo vadis?* *Coastal Eng.*, 53: 133-140.
- Keiller D. C., Sleath J. F. A. (1976) - *Velocity measurements close to a rough plate oscillating in its own plane*. *J. Fluid Mech.*, 73: 673-691.
- Kemp P. H., Simons R. R. (1982) - *The interaction between waves and a turbulent current: waves propagating with the current*. *J. Fluid Mech.*, 116: 227-250.

- Kleinhans M. G. (2006) - Comunicazione personale.
- Krstic R. V., Fernando H. J. S. (2001) - *The nature of rough-wall oscillatory boundary layers*. J. Hydraulic Res., 39: 655-666.
- Lara J. L., Cowen E. A., Sou I. M. (2002) - *A depth-of-field limited particle image velocimetry technique applied to oscillatory boundary layer flow over a porous bed*. Exp. in Fluids, 33: 47-53.
- Larcan (2006) - Comunicazione personale.
- Latz M. I., Rohr J. (1999) - *Luminescens response of a red tide dinoflagellate to laminar and turbulent flow*. Limnol. Oceanogr., 44: 1423-1435.
- Li H. (1954) - *Stability of oscillatory laminar flow along a wall*. US Army Beach erosion Board, Tech Memo, n. 47.
- Lodhal C. R., Sumer B. M., Fredsoe J. (1998) - *Turbulent combined oscillatory flow and current in a pipe*. J. Fluid Mech., 373: 313-348.
- Murray P. B., Soulsby R. L., Davies A. G. (1993) - *Sediment pick-up in combined wave current flow: data report*. HR Wallingford Report SR 364.
- Musumeci, R. E., Cavallaro L., Foti E., Scandura P., Blondeaux P. (2006) - *Waves plus Currents Crossing at a Right Angle*. Experimental investigation. J. Geophysical Research. 111(C7), C07019, doi: 10.1029/2005JC002933.
- Ohmi M., Iguchi M., Kakehashi K., Masuda T. (1982) - *Transition to turbulence and velocity distribution in an oscillating pipe*. Bulletin of JSME, 25 (201), pp. 365-371.
- Petti M., Longo S. (2001) - *Turbulence experiments in the swash zone*. Coastal. Eng., 43: 1-24.
- Petti M., Longo S. (2005) - *Misure e controlli idraulici*. McGraw-Hill.
- Ramaprian B. R., Tu S. W. (1983) - *Fully developed periodic turbulent pipe flow. Part II. The detailed structure of the flow*. J. Fluid Mech., 137: 59-81.
- Ranasoma K. I. M., Sleath, J. F. A. (1994) - *Combined oscillatory and steady flow over ripples*. ASCE J. Waterw., Port, Coastal, and Ocean Eng, 120 (4): 331-346
- Reniers A. J. H. M., Roelvink J. A., Thornton E. B. (2004) - *Morphodynamic modelling of an embayed beach under wave group forcing*. Pp.109, C01030.
- Ribberink J. S., Al Salem A. (1994) - *Bedforms, sediment concentrations and sediment transport in simulated wave conditions*. 24 Int. Coastal Eng. Conf., pp. 2319-2331.
- Rohr J., Allen J., Losee J., Latz M. I. (1997) - *The use of bioluminescence as a flow diagnostic*. Physics Lett. A, 228: 408-416.
- Rousseau G. (2003) - *Etude de l'instabilité d'une interface fluide-granulaire: Application à la morphodynamique des rides de plage*. PhD Thesis, Université Paris 6.
- Sarpkaya T. (1966) - *Experimental determination of the critical Reynolds number for pulsating Poiseuille flow*. Trans. ASME D: J. Basic Engng, 88: 589-598.
- Scherer M. A., Melo F., Marder M. (1999) - *Sand ripples in an oscillating annular sand-water cell*. Phys. of Fluids, 11: 58-67.
- Sleath J. F. A. (1970) - *Velocity measurements close to the bed in a wave tank*. J. Fluid Mech., 42: part 1, 111-123.
- Sleath J. F. A. (1987) - *Turbulent oscillatory flow over rough beds*. J. Fluid Mech., 182: 369-409.
- Sleath J. F. A. (1990) - *Velocities and bed friction in combined flows*. 22nd Int. Conf. Coastal Eng., 1: 450-463.
- Spalart P. R., Baldwin B. R. (1987) - *Direct simulation of a turbulent oscillating boundary layer*. Turb. Shear Flows, 6: 417-440.
- Stegner A., Wesfreid J. E. (1999) - *Dynamical evolution of sand ripples under water*. Phys. Review E, 60: 3487-3490.
- Stokes M. D., Deane G. B., Latz M. I., Rohr J. (2004) - *Bioluminescence imaging of wave-induced turbulence*. J. Geophysical Research, 109, C01004.
- Sumer B. M., Arnskov M. M., Christiansen N., Jorgensen F. E. (1993) - *Two-component hot-film probe for measurements of wall shear stress*. Experiments in Fluids, 15: 380-384.
- Thomas G. P. (1981) - *Wave-current interactions: an experimental and numerical study*. Part1. Linear waves. J. Fluid Mech., 110: 457-475.
- Thomas G. P. (1990) - *Wave-current interactions: an experimental and numerical study*. Part2. Nonlinear waves. J. Fluid Mech., 216: 505-536.

- Visser P. J. (1986) - *Wave basin experiments on bottom friction due to current and waves*. Proc. XX Int. Conf. Coastal Engineering, Taipei. Pp. 807-821.
- Vittori G. (1990) - *Formazione ed evoluzione non lineare di ripples al fondo di onde di gravità*. Tesi per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca (Università di Firenze, Genova, Padova e Trento).
- Vittori G., Verzicco R. (1998) - *Direct simulation of transition in an oscillatory boundary layer*. J. Fluid Mech., 371: 207-232.

Ricevuto il 22/10/2008, accettato 16/12/2008.