

Maree - Onde e Correnti

Come visto nella teoria statica le azioni della Luna e del Sole inducono sulla Terra una componente di forza orizzontale che darebbe luogo a un movimento della superficie marina costituito da periodici innalzamenti e abbassamenti dei livelli (le onde di marea) con conseguenti flussi idrici alternati (le correnti di marea).

Analogamente alle maree anche le corrispondenti correnti presentano dei comportamenti reali diversi da quanto proposto dalla teoria statica.

In effetti le onde di marea, pur risentendo dei cicli della Luna e del Sole, non sono in grado di muoversi tanto rapidamente da stare dietro ai due astri. Il moto ondoso dovuto alla marea è caratterizzato da una lunghezza d'onda (la distanza tra le sommità di due onde consecutive) di migliaia di km in mare aperto, in teoria, all'equatore, pari a metà circonferenza terrestre se non vi fossero i continenti. Manifestazione di tale moto ondoso sono le correnti di marea dette dagli inglesi *streams* o *tidal streams* per distinguerle dalle correnti più generali, permanenti e stagionali, denominate *currents*.

In generale le correnti di marea, quali manifestazione del moto ondoso di marea, hanno velocità massima in corrispondenza dell'AM; tre ore dopo la velocità sarà minima o nulla; è di nuovo massima, ma di segno opposto, nel momento della BM; sarà nuovamente nulla o minima tre ore dopo, alla mezza marea, per ritornare a invertirsi e ripetere il ciclo. Ciò avviene sempre in mare aperto. In tal caso la velocità della corrente è proporzionale all'ampiezza della marea.

In generale un'onda ha una velocità di propagazione crescente al crescere della lunghezza d'onda se è in acque profonde (fondale > della metà della lunghezza d'onda), mentre per fondali inferiori a tale limite la velocità di propagazione diminuisce rapidamente al diminuire del fondale, specie per le onde di maggiore altezza, tendendo a un limite comune. La velocità delle onde di marea oceaniche, per le loro elevate lunghezze d'onda, è fortemente penalizzata dal fondo dell'oceano, tanto che le correnti di marea oceaniche sono modeste, soprattutto se paragonate ad altri tipi di correnti. Diversamente accade in prossimità delle coste e comunque in prossimità di isole, canali, estuari dove il flusso della corrente subisce un restringimento, per profondità e larghezza, dove si registrano correnti con velocità decisamente più alte.

Un esempio si ha nello stretto di Pentland Firth, fra le più meridionali delle isole Lofoten, dove sul lato occidentale si registrano correnti fino a 16 nodi, tra le più veloci al mondo (l'area è infatti considerata il miglior sito per lo sfruttamento delle energie di marea), accompagnate nei passaggi ristretti da vortici e rapide (*tidal race*) pericolosi alla navigazione se combinati con venti di burrasca non improbabili a quelle latitudini. Numerosi sono stati i naufragi come l'affondamento della nave mercantile MV *Cemjord* nel 2015 in cui perirono otto membri dell'equipaggio.

Uno dei più noti vortici di marea è il *Moskstraumen*, dall'isola di Moskoe anch'essa nell'arcipelago norvegese delle Lofoten, che dalla seconda metà dell'800 è più noto come *Maelstrom*, un nome assegnato dallo scrittore statunitense Edgar Allan Poe nel racconto "Una discesa nel Maelström" (*A Descent into the Maelström*), pubblicato nel 1841.

Correnti molto più deboli si trovano anche negli stretti di Messina e Gibilterra.

Nello stretto di Messina correnti e gorgi, generati dalla interferenza fra le maree dello Ionio e Tirreno, favoriti dalle alterazioni morfologiche del fondo marino e dalle differenti densità delle acque, erano note fin dall'antichità, identificate dai mostri marini



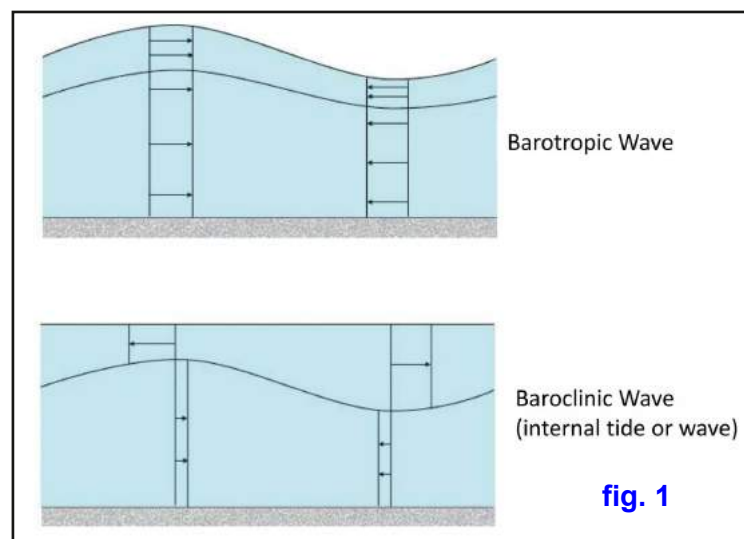
Uno dei vortici che si formano per le maree presso la città di Naruto in Giappone, divenuti attrazione turistica

della mitologia greca Scilla e Cariddi, rappresentando un costante pericolo per le antiche navi a vela che lo percorrevano.

In effetti nelle condizioni più favorevoli si registrano correnti di marea non superiori a 6 nodi che comunque non sono da poco per una imbarcazione a vela. Le correnti di marea interessano non solo la superficie delle acque ma anche le profondità. Tale fenomeno venne notato per la prima volta nel corso delle prime pose di cavi ad inizio '900. Nello stretto di Messina, ad esempio, le correnti di marea portano in superficie la fauna delle profondità, un'occasione per la biologia marina che spinse l'allora regio governo italiano all'istituzione nella città siciliana dell'Istituto Sperimentale Talassografico (1916), oggi Sede Principale di IRBIM CNR (Istituto per le Risorse Biologiche e le Biotecnologie Marine del Consiglio Nazionale delle Ricerche), fondato nel 2018.

Volendo riassumere i principali fenomeni fino ad ora presentati, le onde di marea possono dar luogo a irregolarità dei flussi e a processi di interferenza che si manifestano quando due onde di marea provenienti da due aree diverse si incontrano. In tal caso anche le relative correnti di marea procedono in versi opposti con la possibilità di annullarsi o rinforzarsi. Diverse sono le occasioni di interferenza: un'onda di marea, aggirando un ostacolo in uno stretto o incontrando una costa dà vita a un'onda riflessa originando una nuova onda; le onde di marea di due bacini contigui interagiscono tra loro come accade per le maree tra Ionio e Tirreno nello stretto di Messina.

Le correnti di marea generate nei fenomeni di interferenza hanno, in generale, intensità non



Tipologie di onde di marea: superficiale e interna. Le correnti sono rappresentate vettorialmente.

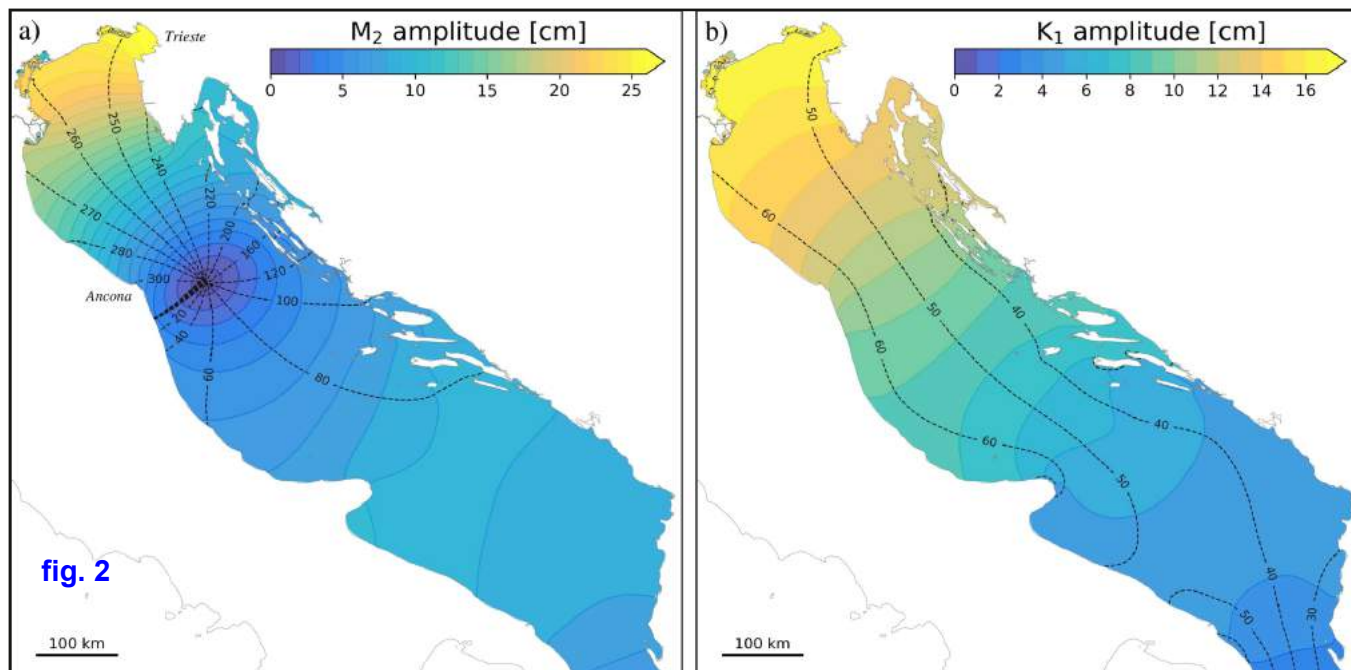
proporzionale all'ampiezza dell'onda che si viene a formare. Nei luoghi in cui due onde di marea, con una differenza di fase di 6 ore, si incontrano su opposte direzioni producono un'onda risultante quasi invisibile ma dando origine a una corrente di marea di maggiore intensità che gli inglesi chiamano *race*, come già visto nello stretto di Pentland Firth.

In genere si crede che le onde del mare siano un fenomeno superficiale, un'idea estesa alle onde di marea oceaniche. Le onde che si muovono sulla superficie sono dette *barotropiche* (un fluido barotropico è quello in cui la densità varia soltanto al variare della pressione). In particolari condizioni topografiche dei fondali tali onde

possono trasferire energia alla massa d'acqua sottostante con formazione di un'onda interna avente la stessa frequenza di quella superficiale ma di ampiezza anche considerevole. Tali onde sono dette *onde barocline* proprio perché interessano quella parte della massa d'acqua in cui esiste un forte gradiente di densità (tra l'acqua calda superficiale, di minore densità e l'acqua fredda sottostante di maggiore densità). Le particelle della porzione d'onda situata nella zona di minore densità vengono spinte verso l'alto, viceversa le particelle di maggiore densità soggette al peso sono portate a muoversi verso il basso.

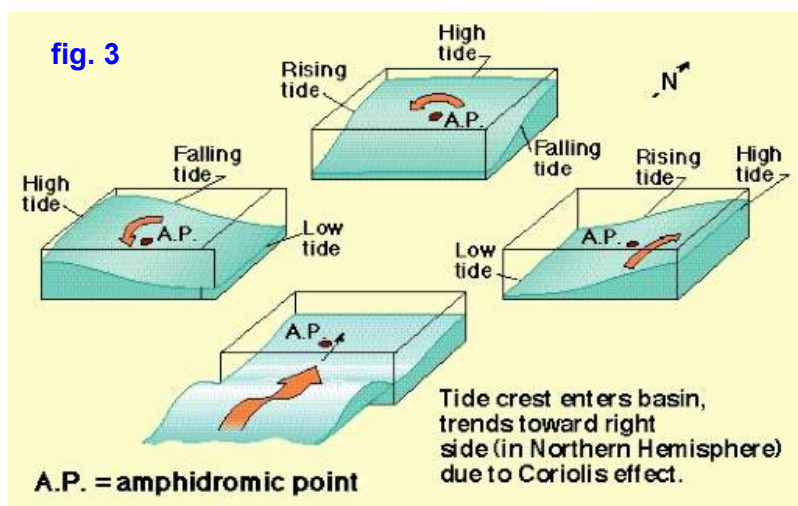
Ma i fenomeni legati alle onde di marea non terminano qui. Pur nella semplicità di esposizione di un argomento, quello delle onde del mare ancora oggi non del tutto compreso, ci sembra opportuno presentare qualche altro caso interessante, tra quelli più studiati.

Come si è fatto osservare nella teoria statica l'alta marea si manifesta con un ritardo, detto *ora di porto*, rispetto al passaggio della Luna al meridiano locale, un ritardo che può essere diverso anche in zone tra loro vicine. Si costruiscono perciò carte che riportano particolari linee,



Rappresentazione grafica di ampiezza e fase delle componenti di marea M2 e K1 (da una pubblicazione del CNR - ISMAR sulla modellazione idrodinamica del Mar Adriatico - 2022)

chiamate *linee cotidali* (insieme del prefisso *co-* “con” e dell’ingl. *tide* “marea”), che uniscono i punti che manifestano la stessa ora di porto, ovvero che raggiungono contemporaneamente l’alta marea e la bassa marea. Tali linee si dipartono come i raggi di una ruota da un luogo detto *punto anfidromico* (dalle parole greche *amfi* “attorno” e *dromos* “corso, corsa”) *nodo di marea*, caratterizzato da una superficie marina che non risente dell’effetto della marea. L’ampiezza di mare aumenta, man mano che ci si allontana dal nodo lungo ciascuna linea cotidale.



Schema della circolazione anfidromica (da un testo sulla didattica dell’Università della Pennsylvania - USA)

Nel Mediterraneo il più importante punto anfidromico si trova nell’alto Adriatico, un bacino semichiuso, a circa metà tra Ancona e Zara, sulla costa croata. Come si nota dalla fig. 2 le linee cotidali con i relativi ritardi, espressi come sfasamento in gradi, ci restituiscono graficamente la rotazione antioraria (nell’emisfero settentrionale) dell’onda di alta marea in quell’area del bacino.

Un punto anfidromico si forma per l’azione combinata sull’onda di marea della forza deviatrice di Coriolis, che sposta verso destra il flusso d’acqua, e dell’influenza (in relazione alla lunghezza d’onda) della topografia del fondo del bacino, come schematizzato nella fig. 3 in cui l’onda si inclina da un lato all’altro, mentre il nodo anfidromico è in pratica immobile.

Nell’emisfero boreale si sperimenta, proprio per l’azione della forza di Coriolis, una circolazione anfidromica in senso orario.

Naturalmente le onde di marea e le relative correnti possono interagire con altri tipi di onde, in particolare con quelle provocate dal vento sui bacini acquei note come *onde di sessa*.

Se solleviamo per pochi secondi un lato di una bacinella piena d'acqua per poi riportarlo alla sua posizione iniziale possiamo osservare delle oscillazioni della superficie che poco dopo spariscono.

Analogamente nei grandi bacini acquei chiusi, o quasi chiusi, come i laghi e nei seni marini, l'azione di un forte e persistente vento, associato eventualmente a condizioni generali di bassa pressione atmosferica, fa scendere il livello dell'acqua in una zona di mare mentre in settori adiacenti il livello tende lentamente ad innalzarsi. A quel punto si assiste a un periodico e lento movimento ondulatorio della superficie delle acque dipendente dalle caratteristiche del bacino.

Si tratta di un fenomeno che ricorda molto un moto di marea, ma con periodi variabili da pochi minuti a molte ore, a seconda delle dimensioni della massa d'acqua. L'ampiezza può variare da pochi centimetri fino, nei casi più eccezionali a qualche metro, soprattutto se le onde di sassa si formano in corrispondenza del massimo di marea astronomico. Un tipico esempio di un tale effetto è l'*acqua alta* a Venezia. Cessata la causa perturbatrice la superficie delle acque, dopo successive oscillazioni smorzate, dissipando l'energia iniziale per attriti, tende a raggiungere, sotto l'azione della gravità, l'equilibrio idrostatico rappresentato da una superficie orizzontale.

Un altro importante fenomeno legato alle onde di marea è la loro risalita, anche considerevole, dei fiumi ad estuario (al mondo sono riconosciuti 56 luoghi interessati al fenomeno).

Dal mare l'onda si insinua nel fiume avanzando contro corrente per sezioni trasversali che diminuiscono anche bruscamente prima in larghezza (la forma a imbuto della foce) e poi in altezza.

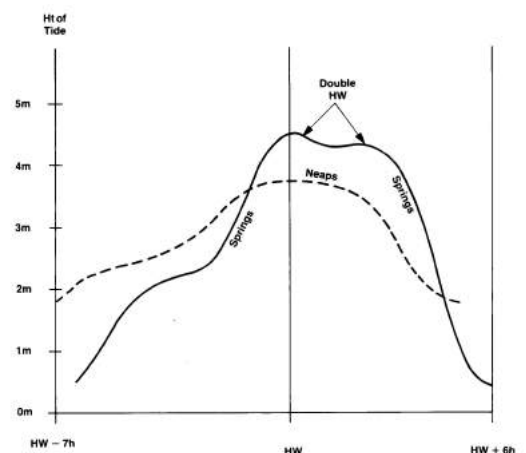
In tali condizioni l'onda tende ad aumentare in ampiezza fino a formare, per valori di marea maggiori, un fronte alterato che risalendo il fiume può essere pericoloso per il naviglio.

D'altra parte il termine estuario viene dal lat. *aestuarium*, der. di *aestuar* "ribollire", del mare quando risale il fiume. L'ampiezza dell'onda viene a ridursi lungo il percorso per annullarsi anche a distanze considerevoli dalla foce. Così in virtù della sua etimologia l'estuario di un fiume può farsi coincidere proprio con tale lungo percorso. L'estuario del Rio delle Amazzoni può considerarsi di 15 km, la distanza dalla foce dove l'onda si esaurisce.

Alla foce dell'estuario la velocità della corrente di marea, il flusso che risale il fiume, è in genere di intensità maggiore della corrente di riflusso diretta verso il mare. Risalendo il fiume le correnti diventano progressivamente più asimmetriche sia nella velocità che nella direzione fino ad annullarsi, mentre il riflusso ha ancora un discreto valore. Questa grande varietà in direzione delle correnti rappresenta un problema per il naviglio e al tempo stesso riveste un ruolo nel trasporto dei sedimenti del fondo con cambiamenti morfologici che incidono sull'ecosistema degli estuari.

Se nella maggior parte delle località marine circostanti l'estuario predomina la componente armonica lunare semi-diurna M2, lungo l'estuario può prevalere quella di acqua bassa, la sovrarmarea, con il risultato di osservare curve di marea diverse dagli schemi ordinari. Vi sono così luoghi in cui in alcuni giorni si registrano ad esempio anche 4 AM nelle 24 ore come in diverse località del Forth River in Scozia, un fenomeno denominato *leaky tide*.

Le onde di marea di maggiore ampiezza ed energia assumono nomi particolari nei diversi paesi e fiumi interessati al fenomeno, anche se il termine internazionale è l'espressione inglese *tidal bore*, dove *bore* è un antico termine anglosassone, di origine norrena, che ha il significato di onda e non foro, come a volte si trova tradotto. Nel Rio delle Amazzoni è conosciuto come *Pororoca*, l'onda più alta, tipica dei



Doppia alta marea - *leaky tide* - (HW - High water) osservata alle sigizie (Springs) diversamente alle quadrature (Neaps)

mesi di febbraio e marzo; *Macareo*, nell'estuario dell'Orinoco; sul fiume della Malesia Batang Lupar, localmente conosciuto come *Benak*; sul fiume Qiantang nella Cina orientale, detto semplicemente *Chau* (marea) *Chau-dau* (alta marea), si manifesta uno dei più imponenti fenomeni di questo tipo (a cavallo tra settembre e ottobre) con onde che possono raggiungere un'altezza di 9 metri capaci di risalire il fiume a una velocità fino a 40 km/h.



La spettacolare onda di marea sul fiume Qiantang in Cina

Anche negli estuari del continente europeo si osservano le risalite controcorrente delle onde di marea. Nell'Inghilterra sud-occidentale le onde più alte, quelle nei giorni successivi alle sigizie, con il favore dei venti e della bassa pressione (mediamente 130 giorni l'anno), attraversano il canale di Bristol a forma di imbuto e si immettono nell'estuario del fiume Severn per ridursi poi a Gloucester. Un tempo le correnti di flusso erano sfruttate dal

naviglio per risalire il fiume, oggi è di interesse per surfisti e canoisti per poter cavalcare le onde.

Altro esempio è quello sull'estuario della Garonna, nel sud-ovest della Francia atlantica, ma il più tristemente famoso *le mascaret*, come viene chiamata la forte onda di marea, è stato quello della Senna (tra il 1789 e il 1829 tra Quilleboeuf e Villequier andarono perdute 112 navi), con onde che potevano raggiungere e superare i 7 m e velocità del fronte tra 2 e 10 m/s. Le continue azioni antropiche hanno determinato la scomparsa del fenomeno



Surfer cavalcano il Severn bore

intorno alla prima metà degli anni Sessanta del '900.

In italiano il termine classico è *mascheretto*, di evidente derivazione francese, ma meglio generalizzare con l'espressione riportata in alcuni documenti del CNR di *onda solitaria* di marea.

Da quanto descritto sinteticamente sui fenomeni delle correnti di marea si comprende la profonda influenza dalle condizioni topografiche. Malgrado ciò le correnti di marea, per un dato luogo, hanno sempre caratteristiche fisiche (velocità, direzione e ore di inversione) strettamente dipendenti dalle fasi di marea. Tale prerogativa permette quindi di fare previsioni nel tempo applicando le informazioni desunte dalle serie storiche dei mareografi e dei correntometri. Pertanto anche per le correnti si ricorre all'analisi armonica di dati relativi a un porto di riferimento ed analogamente ai livelli di marea si compilano apposite tavole delle correnti, integrate frequentemente da carte in cui si evidenziano le direzioni e le intensità in relazione alle condizioni di marea (Admiralty Tidal Stream Atlas). Notizie in forma descrittiva delle correnti di marea si trovano anche nei portolani e più in generale nelle Istruzioni nautiche delle aree interessate.



Stralcio di una carta delle correnti di marea ad uso didattico, simile a quelle pubblicate dall'Admiralty inglese