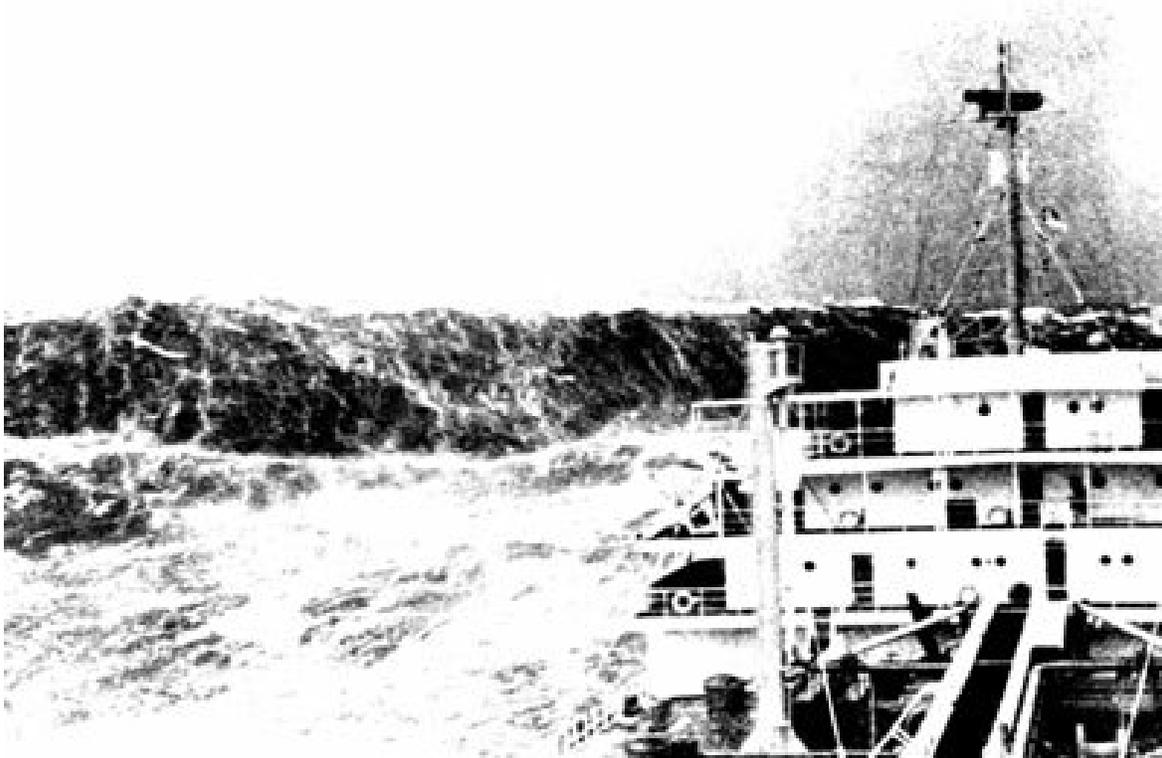




**uff**

**DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA MARINHA  
BACHARELADO EM BIOLOGIA MARINHA**



# **ONDAS MARINHAS**

**ABILIO SOARES GOMES**

**2003**

# ONDAS

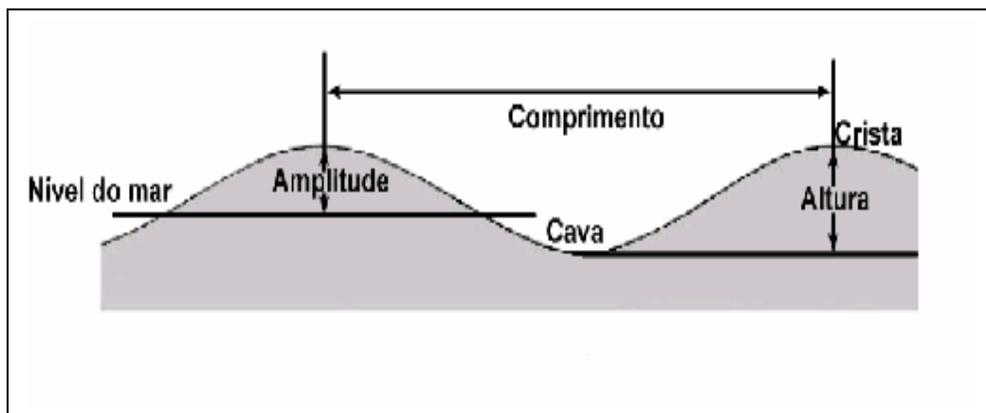
Fenômeno de propagação de energia de um ponto a outro, sem que ocorra transporte de matéria.

## CLASSIFICAÇÃO

*Mecânicas*: propagam-se através de um meio material

*Eletromagnéticas*: podem se propagar no vácuo

## CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS ONDAS



*Crista*: o ponto mais elevado da onda

*Cava*: a depressão entre duas cristas

*Altura (H)*: distância vertical entre o topo de uma crista e o fundo de uma cava vizinha

*Comprimento ( $\lambda$ )*: distância horizontal entre qualquer ponto de uma onda e o ponto correspondente da próxima onda

*Inclinação*: razão entre a altura e o comprimento ( $H/\lambda$ )

*Nível basal do mar*: nível médio da superfície do mar na ausência de ondas.

*Amplitude (T)*: deslocamento vertical máximo do nível basal do mar

*Período*: tempo que um  $\lambda$  leva para passar por um ponto estacionário

*Velocidade*: velocidade que uma onda passa por um ponto estacionário

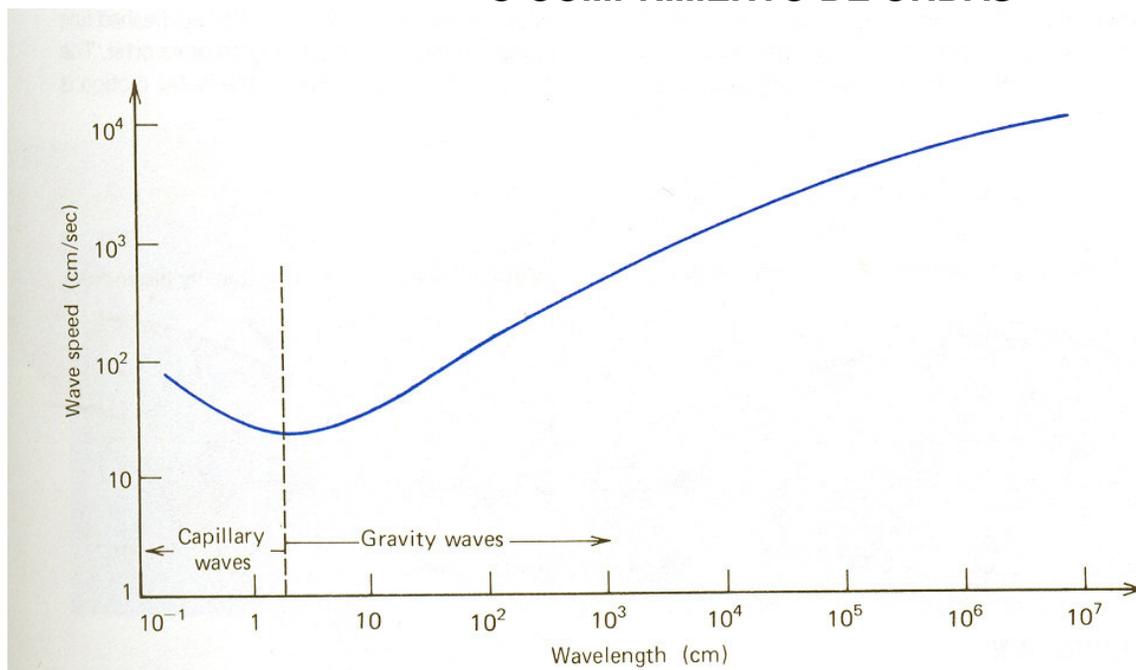
## ONDAS MARINHAS

As ondas observadas nos oceanos e lagos são ondas mecânicas produzidas pela força motriz dos ventos, movimentos da crosta terrestre (terremotos e maremotos) e forças astronômicas. A criação dessas ondas tem a participação da gravidade e da capilaridade que atuam como forças restauradoras do nível do mar. Sem a ação das forças restauradoras uma dada porção do mar que se elevasse pela ação das forças motrizes permaneceria elevada indefinidamente.

Com a ação da gravidade, uma porção elevada da superfície do mar é empurrada forçando a água para baixo, provocando uma elevação do nível do mar na porção vizinha. Conseqüentemente, à medida que uma crista de onda está sendo forçada para baixo, uma porção de água próxima a ela está se elevando, o que provoca a propagação das ondas.

A capilaridade deve-se a tensão superficial da água. A causa da tensão superficial é a polaridade elétrica da molécula de água. Moléculas vizinhas são fortemente atraídas entre si, com o lado negativo de uma molécula sendo atraído pelo lado positivo de outra. Esta atração atua como força restauradora, puxando as moléculas de água. Comparado com a gravidade, a força restauradora da tensão superficial é insignificante. Porém, para ondas muito pequenas, pesando muito pouco, com comprimentos de onda menores que 2cm, a tensão superficial é a força restauradora predominante. Essas ondas são denominadas capilares e possuem a interessante propriedade de viajarem mais rápido quanto menor for a onda, o que é o oposto das ondas gravitacionais.

## RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE E O COMPRIMENTO DE ONDAS



## CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS CAPILARES E GRAVITACIONAIS

|   | Onda    | Período      | $\lambda$      | Tipo de Onda*       | Forçante                   |
|---|---------|--------------|----------------|---------------------|----------------------------|
| G<br>r<br>a<br>v<br>i<br>d<br>a<br>d<br>e | Capilar | < 0,1 s      | < 2 cm         | profunda - rasa     | ventos locais              |
|   | Chop    | 1-10 s       | 1-10 m         | profunda- rasa      | vento locais               |
|   | Swell   | 10-30 s      | > dezenas m    | profunda- rasa      | tempestades distantes      |
|   | Seiche  | 10 min- 10 h | > dezenas Km   | rasa- intermediária | vento, ressonância de maré |
|   | Tsumani | 10-60 min    | > dezenas Km   | rasa-intermediária  | distúrbio submarinos       |
|   | Marés   | 12,4-24,8 h  | centenas de Km | rasa                | Astronômica                |

\*

- Ondas profundas: propagam-se em águas mais profundas que  $\frac{1}{2}$  do  $\lambda$
- Ondas rasas: propagam-se em águas mais rasas que  $\frac{1}{20}$  do  $\lambda$

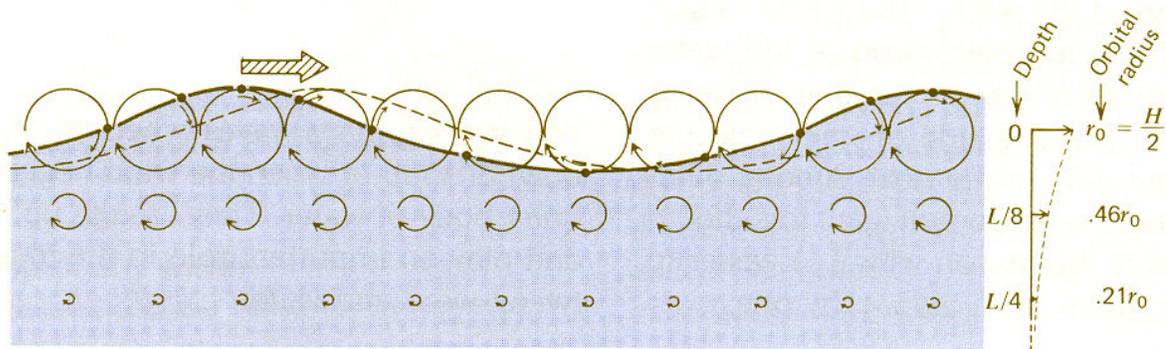
O tamanho da onda depende da velocidade e duração do vento e da área de varredura.

## MOVIMENTO ORBITAL

O movimento da molécula de água abaixo de uma onda é diferente do próprio movimento da onda. Uma onda pode viajar de um ponto a outro do oceano, porém as moléculas de água não vão a parte alguma. Elas simplesmente sofrem ondulações cíclicas, subindo e indo para frente com a aproximação da crista de onda e descendo e indo para trás após sua passagem. Deste modo o movimento líquido é circular, subindo e indo para frente com a aproximação da crista e descendo e indo para trás com a aproximação da cava.

O movimento orbital da água decresce com a profundidade. Numa profundidade maior que a metade do comprimento da onda, o movimento da onda torna-se desprezível, com as ondas tendo pouco efeito sobre o fundo e o fundo tendo pouco efeito sobre as ondas.

Em águas rasas, a interação entre a água e o fundo freia as ondas e provoca movimento dos sedimentos de fundo. O movimento orbital da água torna-se mais elíptico que circular, com as elipses diminuindo e tornando-se achatadas próximo ao fundo, porque o atrito com o fundo restringe o movimento de subida e descida.



A velocidade das ondas depende de duas coisas: o comprimento de onda e a profundidade da coluna d' água. Em geral, quanto maior o comprimento de onda, mais rápida é a onda e quanto mais raso o local, mais vagarosa é a onda. Nos extremos de águas rasas e águas profundas podem existir as seguintes situações:

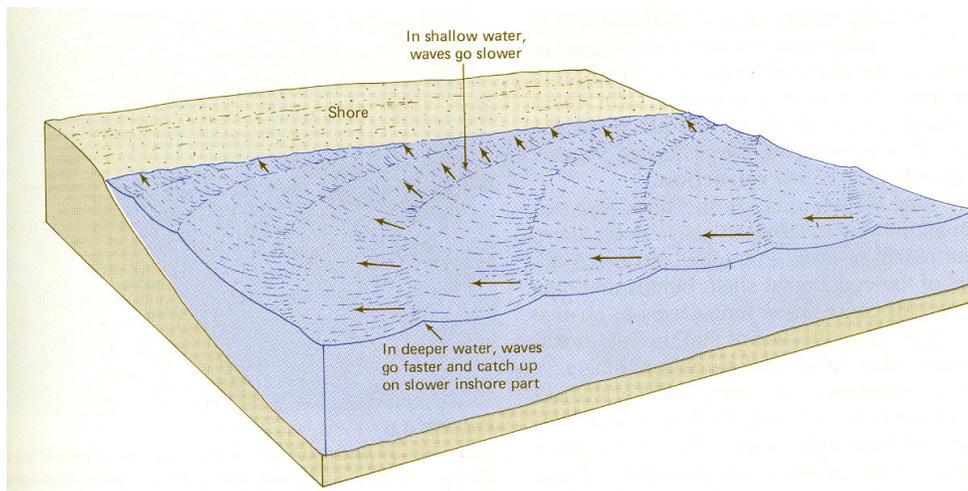
1. Se a água é profunda (mais profunda que a metade do comprimento de onda), então o fundo não tem influência e a velocidade da onda depende somente do comprimento, com ondas maiores se propagando mais rápido.
2. Se a água é muito rasa (mais rasa que a metade do comprimento de onda), todas as ondas irão se propagar na mesma velocidade. Quanto mais raso, mais lentamente as ondas irão se propagar.

## **REFRAÇÃO DE ONDAS**

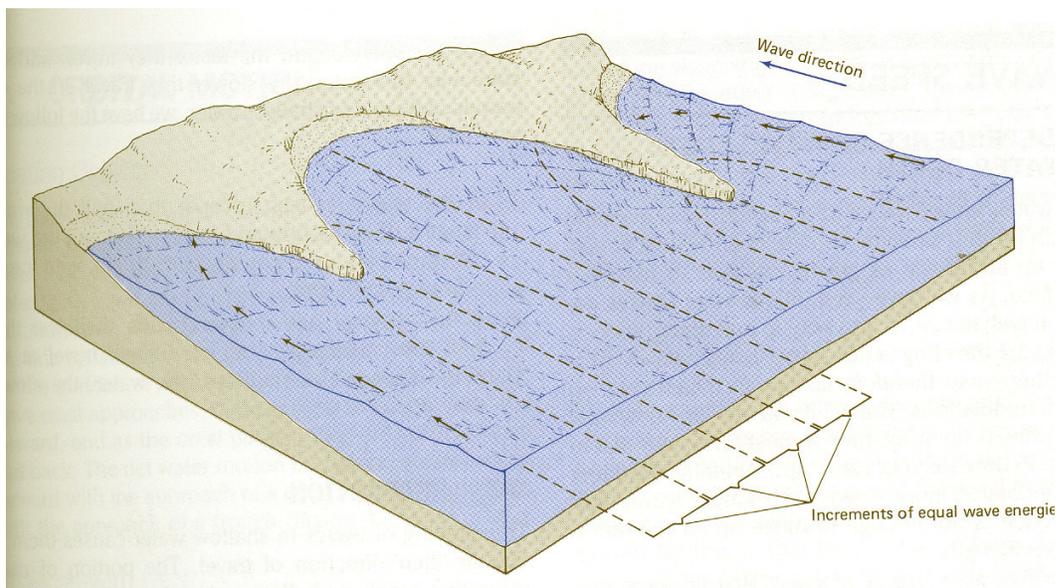
A diminuição da velocidade das ondas após as mesmas penetrarem em águas rasas provoca uma mudança na direção do transporte. A porção da onda que chega primeiro em águas rasas diminuí a velocidade e a porção que ainda está em águas profundas mantém a velocidade. Conseqüentemente, as ondas mudam sua direção, voltando-se para as áreas rasas a medida que diminuem a velocidade. Por esse motivo todas as ondas parecem vir da mesma direção, frontalmente à praia, independente da direção onde foram originadas. Esta deflexão das ondas à medida que atingem águas rasas é denominada refração.

Em costas recortadas, as ondas parecem se concentrar nos pontos mais avançados. Isto ocorre porque as ondas encontram águas rasas primeiramente nesses pontos, mudando a direção para essas regiões. Conseqüentemente, a energia das ondas concentra-se nesses pontos e os fundos das baías são comparativamente mais calmos.

## REFRAÇÃO DE ONDAS



## REFRAÇÃO DE ONDAS NUM LITORAL RECORTADO

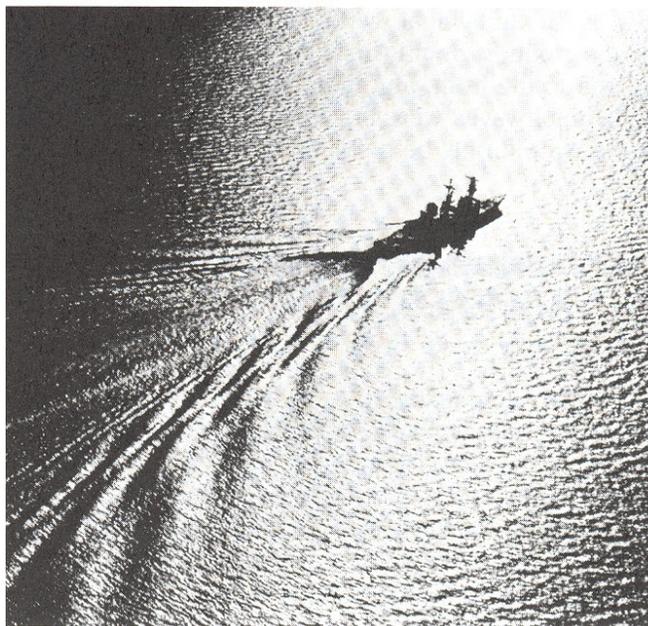


## GRUPOS DE ONDAS

As ondas se propagam em grupos denominados *trens* de onda, que podem ser de tamanho variado. Um exemplo familiar de trem de ondas é a esteira formada pelas embarcações em movimento e os círculos formados por uma pedra atirada num lago de águas calmas. Nesses casos, entre 8 a 10 ondas principais se propagam em grupo. Grupos de onda maiores são formados por tempestades no mar.

À medida que as ondas se distanciam do local de origem elas se transformam em ondas compridas com as cristas aplainadas, denominadas "swell". As ondas de "swell" podem viajar longas distâncias sem perder a energia que adquiriram do vento. Por outro lado os ventos locais produzem ondas pequenas e pontiagudas, denominadas ondas marinhas. Deste modo, as ondas marinhas são formadas por ventos locais, enquanto que as ondas de "swell" são geradas por ventos distantes, no mar aberto.

### TREM DE ONDAS



## **QUEBRAMENTO DE ONDAS**

À medida que o trem de ondas aproxima-se da costa, as ondas que vem na frente entram em águas rasas e diminuem a velocidade. Conseqüentemente, as ondas que vem atrás começam a engavetar e a distância entre as ondas diminui. A água e a energia de cada onda concentram-se numa estreita zona e as ondas empinam. As ondas podem empinar de tal modo que se tornam instáveis e quebram. As ondas, em geral, quebram quando atingem uma profundidade equivalente a 1.3 vezes a altura de onda. Em águas profundas, as ondas quebram quando a razão entre sua altura e comprimento (empinamento) ultrapassa  $1/7$ . As ondas na zona de arrebentação são denominadas de acordo com a forma que elas assumem ou conforme o modo como elas quebram, seja abrupto ou suave. A zona de arrebentação é aquela porção do perfil praias caracterizada pela ocorrência de quebraimento de ondas.

## **TSUNAMIS**

As ondas podem também ser formadas por movimentos da crosta terrestre, tal como maremotos, deslizamentos, vulcões, ou ainda por quedas de blocos de geleiras. Ondas geradas desse modo são denominadas tsumanis ou ondas sísmicas. Estas geralmente apresentam grande comprimento e pequena altura. Tipicamente, essas ondas têm de 200 Km de comprimento e 1 metro de altura.

## **ONDAS GIGANTES (Freak e Rogue Waves)**

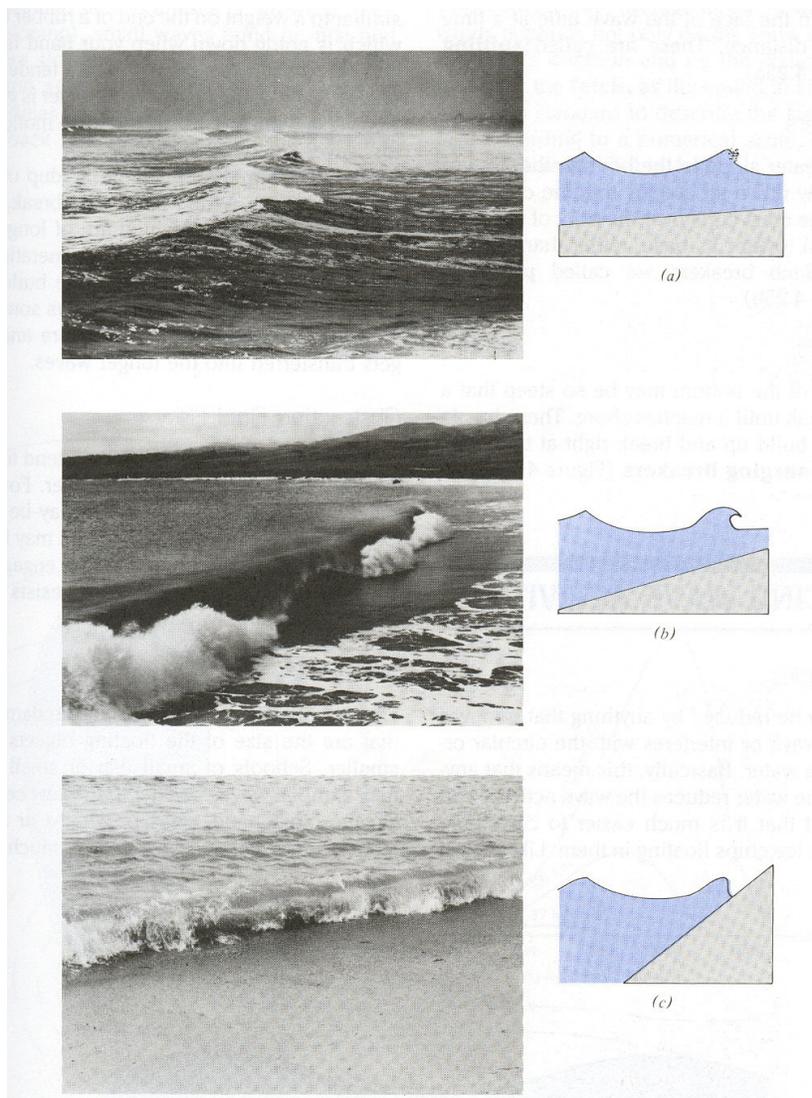
Ondas gigantes podem ser formadas quando ventos fortes batem contra correntes oceânicas, quando ondas formadas em diferentes tempestades juntam suas forças ou quando o "swell" interage de modo singular com um fundo particular.

Ondas de 30 metros já foram observadas com ventos de força 9, sendo freqüente o naufrágio de embarcações devido ao choque com essas ondas. Diferente das Tsunamis, que dissipam sua energia ao atingir áreas rasas na costa, as ondas gigantes são observadas na região oceânica, longe da costa.

### ZONAÇÃO DE UMA PRAIA OCEÂNICA MOSTRANDO A ZONA DE QUEBRAMENTO DE ONDAS



## DIFERENTES FORMAS DE QUEBRAMENTO DE ONDA

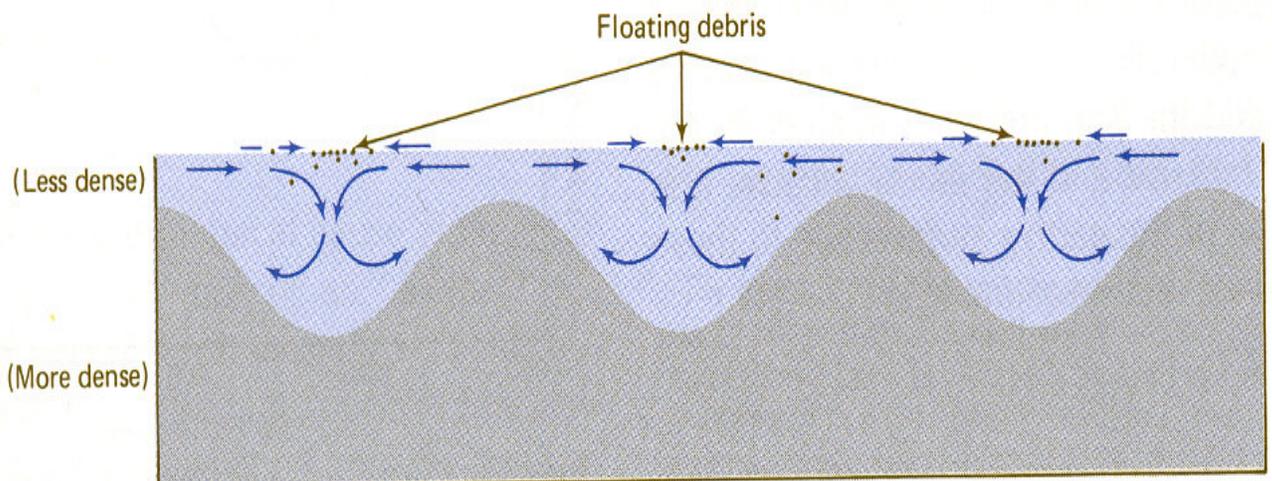


- a) Progressiva ou deslizante (Spilling); b) Mergulhante (Plunging);  
c) Ascendente (Surging).

## ONDAS INTERNAS

Algumas ondas ocorrem e viajam ao longo da interface entre dois fluidos, como ar e água, óleo e água, ou ainda entre água- água e ar-ar, com densidades diferentes. Esse fenômeno pode ser observado em nuvens com forma de ondas e no mar sua presença pode ser detectada por compridos *slicks* paralelos na superfície do mar. Associados a esses *slicks* encontram-se uma esteira de detritos que se formam devido ao movimento das ondas internas.

### ESQUEMA DE UMA ONDA INTERNA



## MARÉS

As marés são as maiores ondas conhecidas, sendo o fenômeno mais evidente na costa, onde o nível do mar sobe e desce regularmente duas vezes ao dia. A diferença entre esses níveis pode ser de menos de 1m, como ocorre no Mediterrâneo e Caribe ou de até 15 m como na Baía de Fundy no Canadá. No Brasil, essa variação é de um pouco mais de 1 m em quase toda a região sul e

sudeste, podendo ultrapassar os 5 m no Maranhão. As marés são ondas produzidas pela forças gravitacionais da Lua e do Sol.

As marés podem ser definidas como movimentos verticais periódicos ou regulares das massas de água causados pela força gravitacional, que é inversamente proporcional à distância e diretamente proporcional à massa. Uma outra força, a força centrífuga, originária do movimento de rotação da Terra, também atua no fenômeno das marés.

A força gravitacional (FG) entre dois corpos pode ser expressa matematicamente através da seguinte expressão:  $FG = G (m_1 m_2 / r^2)$ , sendo:  $G$  = constante gravitacional universal;  $m_1$  e  $m_2$  = massas dos corpos envolvidos; e  $r^2$  = distância entre as massas, a partir do centro dos corpos.

Embora a força gravitacional entre o Sol e a Terra seja mais que 177 vezes aquela entre a Lua e a Terra, a Lua domina as marés. Como a massa do Sol é 27 milhões de vezes maior que a da Lua ela deveria gerar uma uma força geradora de maré 27 milhões de vezes maior. Entretanto, como o Sol dista 390 vezes mais da Terra do que a Lua, sua força geradora de marés diminui  $390^3$ .

Na realidade, a força gravitacional geradora de marés varia inversamente ao cubo e não ao quadrado da distância do centro dos corpos envolvidos. A distância assume um maior peso nas forças geradoras das marés do que ocorre na atração entre os corpos.

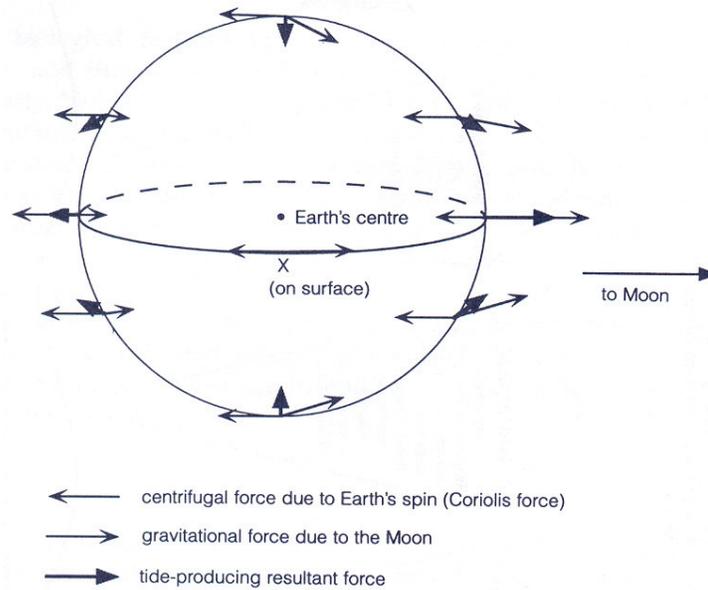
A Terra e a Lua giram uma sobre a outra, ao redor do centro comum de suas massas. Este ponto está na Terra, porém não no seu centro. A distância média entre o centro da Terra e da Lua é constante e, portanto, a força centrífuga do sistema Terra-Lua deve estar exatamente equilibrada pela força gravitacional

do sistema. A força centrífuga é constante em todos os pontos da superfície terrestre, porém a força gravitacional é maior no ponto da superfície mais próximo da Lua e menor no ponto mais afastado. No ponto mais próximo a água se eleva em direção a Lua porque a força gravitacional da Lua é maior que a força centrífuga constante. No ponto mais afastado a água também se eleva, porém afastando-se da Lua devido à força centrífuga ser maior que a força gravitacional lunar. Isto origina duas marés diárias que são observadas com o giro da Terra ao redor do seu eixo. Como a Terra demora 24 h para completar uma evolução, um ponto geográfico qualquer ficará de face ou oposto para a Lua a cada 12 h, apresentando, então, duas preamares e duas baixa-mares.

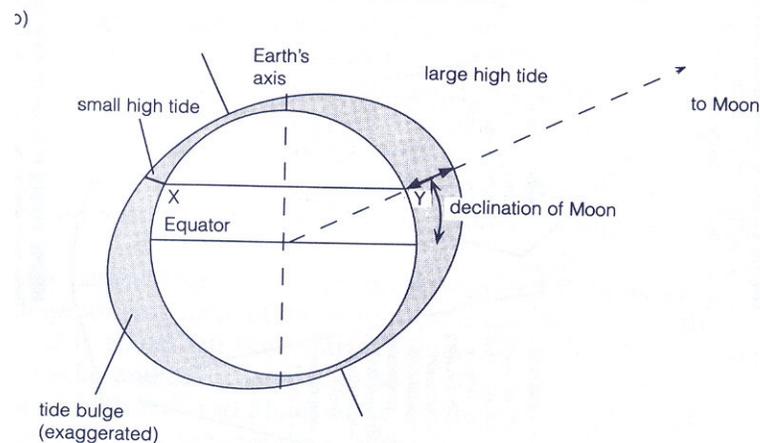
Durante o tempo que a Terra leva para completar uma rotação, a Lua avança em sua órbita, fazendo com que a Terra necessite mais 50 min para alcançar o ponto previamente oposto a Lua. Por isso as duas preamares e as duas baixa-mares ocorrem em horários diferentes de um dia para o outro, com uma defasagem de 50 min.

Quando o Sol encontra-se alinhado com a Lua ocorrem marés de grande amplitude, pois as forças gravitacionais se somam, apesar da força de atração do Sol ser somente 46% da força da Lua. Como o ciclo da Lua ao redor da Terra demora  $29 \frac{1}{2}$  dias, o alinhamento entre a Lua e o Sol ocorre a aproximadamente cada 15 dias (nas Luas Nova e Cheia). Essas marés são chamadas marés vivas, marés de sizígia ou "spring tides". Quando o Sol e a Lua se encontram em ângulo reto (nas Luas Crescente e minguante), as forças gravitacionais se cancelam parcialmente e o resultado é um ciclo de marés de pequena amplitude conhecidas como marés mortas, marés de quadratura ou "neap tides".

## **FORÇAS GERADORAS DAS MARÉS**



### ONDA GERADA PELA FORÇA DA LUA DEVIDO A SUA ÓRBITA

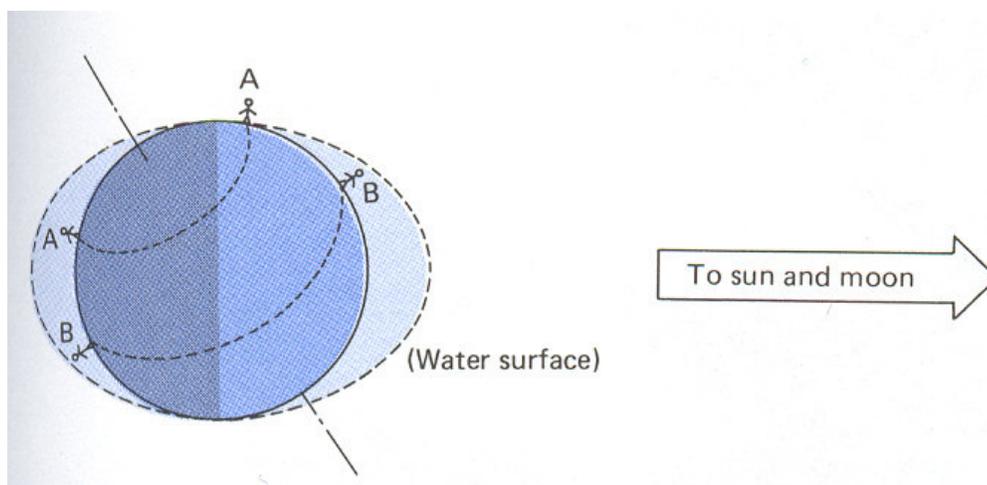


As marés observadas dependem não somente da orientação de uma determinada localidade em relação à Lua, mas também da latitude. A inclinação do eixo da Terra faz com que uma determinada localidade não apresente marés iguais durante o dia lunar (24h e 50 min), havendo uma superposição do componente diurno (uma maré ao dia) e semidiurno (duas marés ao dia). Na maioria dos locais há uma mistura dos dois componentes e na realidade não há

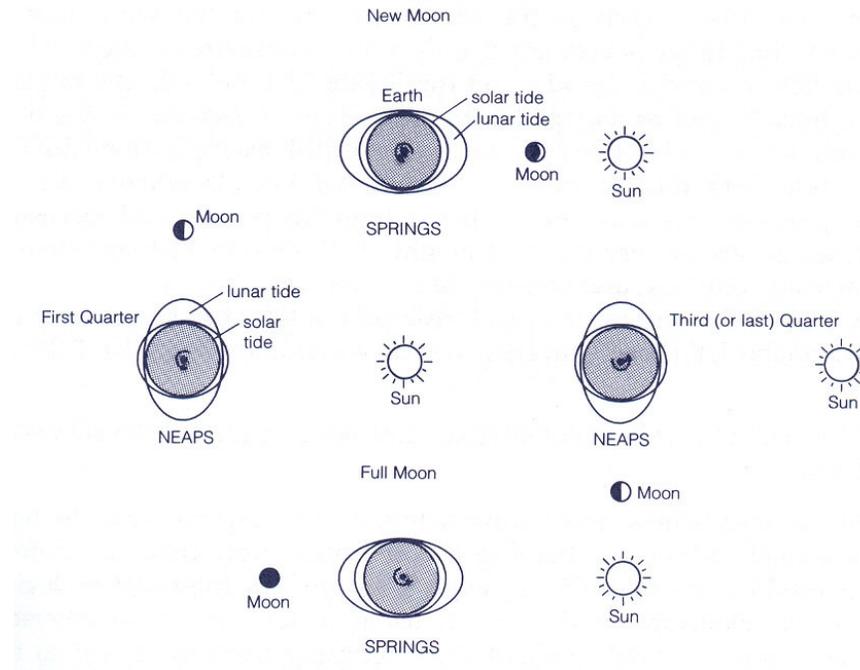
locais com marés diurnas, mas sim o domínio de um dos componentes. Em locais onde ocorre uma maré ao dia, o componente diurno domina e em locais onde as duas marés são semelhantes, o componente semidiurno domina.

A força gravitacional dos astros também causa um deslocamento da atmosfera e das massas continentais terrestres. O deslocamento desta última é menos evidente devido à rigidez da crosta terrestre e mais evidente nos oceanos e atmosfera devido a essas massas serem mais fluidas. O deslocamento da crosta é de aproximadamente 26 cm e o dos oceanos 70 cm.

**Representação de Variação de Maré para 2 Localidades no Hemisfério Norte. No local A será observado somente uma maré e no local B duas marés.**

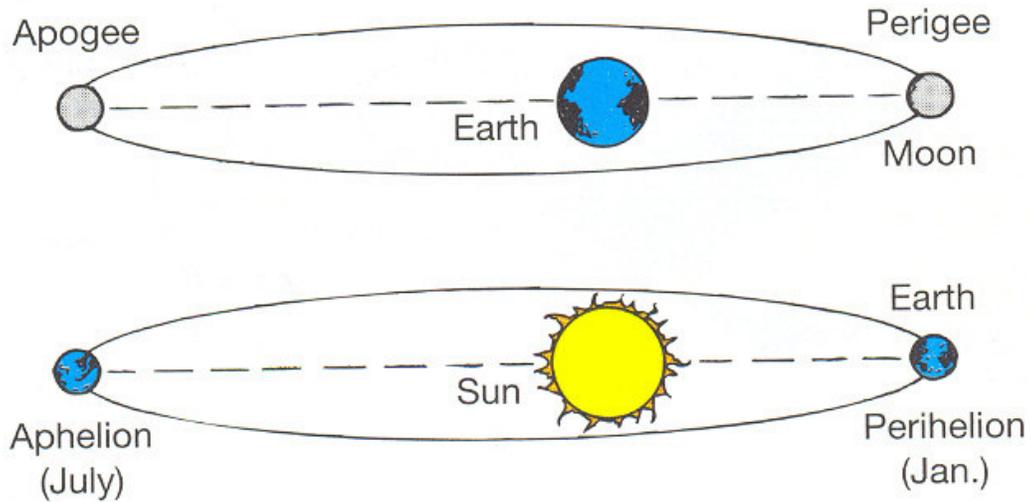


**INTERAÇÃO DAS FORÇAS DA LUA E SOL NAS DIFERENTES FASES DA LUA E A PRODUÇÃO DAS MARÉS**



As marés também apresentam uma variação temporal devido a mudanças nas distâncias da Lua e do Sol em relação à Terra. Devido a órbita da Terra ao redor do Sol ser elíptica, a amplitude de variação da distância entre os dois corpos varia de 148,5 milhões de Km (perihélio) a 152,2 milhões de Km (afélio), sendo que essas máximas são observadas no inverno e verão. A distância da Lua devido a órbita ao redor da Terra varia entre 375,200 Km (perigeu) a 405,800 Km (apogeu), demorando 27½ dias. Devido a esses movimentos as marés têm maiores amplitudes durante o perihélio e o perigeu e menores durante o afélio e o apogeu.

### O Efeito das Órbitas Elípticas nas Marés



**Baixamar na baía de Fundy, Canadá.** (Foto: *Cassiano Monteiro Neto*)