

10 Ondas nos oceanos

Assuntos

- Escalas e parâmetros
- Ondas capilares
- Ondas de gravidade
- Refração
- Ondas subinerciais

Referências bibliográficas

- Notas de aula;
- Livro em preparação.

10.1 Escalas

Embora a nossa percepção sobre ondas nos oceanos nos remeta, invariavelmente, para as ondas que observamos na praia, o oceano apresenta uma variedade de ondas mais complexas com escalas temporais que variam de frações de segundo a meses, e escalas espaciais que variam de centímetros a milhares de quilômetros. As ondas de menor período podem ser abordadas sem se considerar a rotação da Terra. Entretanto, quando os períodos das ondas passa a ser comparável com o período inercial, a rotação da Terra torna-se relevante, não podendo mais ser desprezada.

Relembrando os principais parâmetros que definem uma onda, temos o seu período (T), e a equivalente frequência angular ($\omega = 2\pi/T$), o comprimento (λ), e o equivalente número de onda ($k = 2\pi/\lambda$), a amplitude (η), a altura ($h = 2\lambda$) e a inclinação ($\alpha = h/\lambda$).

10.2 Ondas capilares e capilar-gravidade

As ondas capilares são as que possuem menores comprimentos ($\lambda \leq 2 \times 10^{-2}m$) e menores períodos ($T \leq 2 \times 10^{-1}s$). São ondas geradas pelo vento e o mecanismo restaurador, devido as suas dimensões, é a tensão superficial. As ondas capilar-gravidade, como sugere o nome, possuem escalas espaciais da ordem de centímetro e, assim, tanto a tensão superficial quanto a gravidade tornam-se importantes processos restauradores. Estas ondas possuem períodos da ordem de segundo e são usadas para se estimar o vento na superfície dos oceanos através de satélites.

10.3 Ondas de gravidade

As ondas de gravidade possuem períodos que variam de segundo até poucas dezenas de horas. O comprimento destas ondas está entre dezenas de centímetros a centenas de quilômetros. Embora estas ondas tenham como força restauradora a gravidade, a sua geração pode ser pelo vento (*wind waves*), por abalos sísmicos (Tsunamis) ou por forças gravitacionais astronômicas (ondas de maré).

Para as ondas geradas pelo vento, a amplitude e o comprimento de onda dependem da intensidade do vento, da pista do vento, do tempo de atuação do vento e da profundidade local. As ondas geradas pelo vento são denominadas vagas (*sea waves*) na área de geração e marulho (*swell*), fora da área de geração.

De maneira geral, as ondas de gravidade podem ser classificadas como ondas de águas rasas (ou ondas longas) ou de águas profundas (ou ondas curtas). Esta classificação depende da relação entre o comprimento da onda e a profundidade local (H). Para ondas de águas rasas temos $\lambda \gg H$. Na prática, quando esta relação é da ordem de 10^{-1} consideramos a onda como onda de água rasa. As ondas de gravidade podem ser consideradas de água profunda quando a relação entre a profundidade local e o seu comprimento é da ordem de $1/2$ ou menor. Esta caracterização da onda é importante quando olhamos para a velocidade de fase de uma onda (c), dada por:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi H}{\lambda}\right)} \quad (23)$$

Assim, para ondas de águas profundas podemos aproximar c por:

$$c \approx \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}, \quad (24)$$

e, no caso de ondas de águas rasas:

$$c \approx \sqrt{gH} \quad (25)$$

Para ondas de águas profundas, as órbitas das partículas são circunferências onde os raios diminuem exponencialmente com a profundidade. Para ondas de águas rasas, as órbitas das partículas são elipses onde o semi-eixo menor diminui com a profundidade. É importante notar que ondas de água profunda não perturbam o fundo, enquanto que as perturbações das ondas de águas rasas atingem o fundo.

10.3.1 Energia

Para uma onda de gravidade, podemos estimar a sua energia por unidade de área (E – densidade de energia) por:

$$E = \frac{1}{8} \rho g h^2 \quad (26)$$

Esta estimativa considera tanto a energia potencial quanto a energia cinética de uma onda, que são idênticas neste caso.

10.3.2 Refração

Uma onda de gravidade que se aproxima da costa, a medida em que a profundidade diminui, passa a comportar-se como uma onda de água rasa. Assim, a sua velocidade de propagação diminui com a sua aproximação, o que faz com que esta onda mude a sua direção de propagação, fenômeno conhecido como refração. Desta maneira, as ondas tendem a chegar na praia praticamente paralelas à linha de costa. Este mesmo fenômeno também explica por que em baías e enseadas as ondas são de pequena amplitude, assim como em pontas e cabos, são de grande amplitude.

10.3.3 Dispersão

Para ondas de águas profundas (por exemplo, ondas geradas pelo vento no meio do oceano), a velocidade de propagação depende do seu comprimento de onda. Assim, após o processo de geração destas ondas, ao se afastarem da área de atuação do vento, há um processo de dispersão, onde os diversos comprimentos vão se destacando um do outro devido as diferentes velocidades. Basicamente, ondas mais longas propagam-se com maiores velocidades que ondas mais curtas.

10.3.4 Tsunamis

Tsunamis têm comprimento de onda da ordem de centenas de quilômetros. Desta maneira, independentemente da região onde propaga, são considerados ondas de águas rasas. Para um Tsunami gerado no meio do oceano, onde as profundidades médias são da ordem de $4 \times 10^3 m$, a Equação 25 estima uma velocidade da ordem de $200ms^{-1}$, equivalente a $720kmh^{-1}$, que é próximo da velocidade de cruzeiro de um avião comercial. Além disso, quando são gerados no meio do oceano, suas amplitudes são da ordem de $1m$. Desta maneira, estas ondas de gravidade propagam-se muito rapidamente e são de difícil detecção no meio do oceano, devido a sua pequena inclinação. Para completar o quadro complexo, ao se aproximarem da costa, os Tsunamis aumentam significativamente a sua amplitude, devido a desaceleração sofrida, pois diminui a distância entre duas cristas e, portanto, há uma maior concentração da energia em uma área menor.

10.4 Ondas subinerciais

Ondas subinerciais são aquelas em que o período é maior do que o período inercial. Dentre estas ondas destacamos as Ondas de Kelvin e as Ondas de Rossby.

10.4.1 Ondas de Kelvin

São ondas de gravidade que necessitam de uma barreira física (continentes) para se propagar. Estas ondas são unidirecionais, e propagam-se deixando a costa à esquerda no hemisfério sul e à direita no hemisfério norte. Na direção perpendicular, estas ondas estão em equilíbrio geostrófico.

10.4.2 Ondas de Rossby

Estas ondas têm como mecanismo restaurador a conservação de vorticidade, equivalente ao momento angular para os sólidos, e, portanto, são consideradas ondas de vorticidade. As ondas longas de Rossby propagam-se na direção zonal e sempre para oeste.