

## TEMA 1 - A Estrutura Geofísica do Oceano

### 1.1. Introdução

### 1.2. Atributos da Dinâmica de Fluidos Geofísicos

### 1.3. Análise de Escalas

### 1.4. A Importância da Geometria

### 1.5. A Importância da Rotação

### 1.6. A Importância da Estratificação

### 1.7. O Raio de Deformação Interno

## Lista de Slides

1. Colunas de Taylor
2. Perfil de  $\sigma_\theta$  ao longo da costa paulista
3. Experimento de Águas Mortas de Ekman (1904)
4. Vórtices da CNB
5. Seção da CB ao longo de Cabo Frio
6. Perfis de  $\sigma_\theta$  novamente

## 1.1. Introdução

- Geofísica pode ser amplamente definida como a ciência que estuda a física das esferas que compõem o planeta: litosfera, atmosfera e hidrosfera.
  - Logo, oceano e atmosfera são considerados fluidos geofísicos. E referimo-nos como "Dinâmica de Fluidos Geofísicos" à ciência que estuda escoamentos em escalas de movimento grande o suficiente para que aspectos do planeta Terra o influenciem.
  - No caso do oceano, isto significa que consideraremos escoamentos em escalas de comprimento que variam de dezenas a milhares de quilômetros.
  - Obviamente isso não significa que problemas de escalas menores ou não existam ou não sejam objetos de estudo da Oceanografia Dinâmica. Exemplos como as ondas de gravidade de superfície que vemos que quebram nas praias ou fenômenos de microturbulência no oceano superior, dentre outros podem ser citados.
  - Típicos fenômenos ligados à dinâmica de fluidos geofísicos no oceano são ondas, vórtices e correntes.
- Na atmosfera: dinâmica do Tempo e do clima
- Importância da DFG: citar fenômeno ENSO (3-5 anos)  
ondas longas oceânicas, convergência na atmosfera etc.

## 1.2. Atributos de Dinâmica de Fluidos Geofísicos

- São três os atributos que distinguem DFG da mecânica de fluidos tradicional:

- o efeito da geometria (do oceano e dos mov. oceânicos)
- o efeito da rotação
- o efeito da estratificação

- O efeito da geometria dos movimentos oceânicos advém que estes, na maioria das vezes, estão associados a movimentos muito mais "longos" que profundos. Retornemos mais tarde a este ponto, mas lembremos a própria dimensão das bacias oceânicas. Considere a região do Oceano Atlântico Sul entre  $10^{\circ}\text{S}$  e  $40^{\circ}\text{S}$  - grossamente cerca de  $30^{\circ}$  de extensão meridional. (ou 330 km). A profundidade média nesta região é de 3300 m.

→ Esta anisotropia espacial nos mov. mais longos conduzirá a uma anisotropia espacial das velocidades no oceano.

- O efeito da rotação advém da influência (da existência) de rotação ambiente devido ao movimento da Terra em torno de seu eixo. Esta rotação ambiente introduz dois termos de aceleração - ou forças / massa - na equação do movimento: a força de Coriolis e a força centrífuga.

- A força centrífuga, embora mais palpável para os efeitos em Oceanografia, não desempenha nenhum papel relevante no estudo de escoamentos geofísicos.

- A força de Coriolis, muito menos intuitiva, é crucial para o estudo desses movimentos.

(3)

- Em antecipação ao que veremos ao longo do curso, um dos principais efeitos da força de Coriolis é impor uma certa rigidez vertical aos fluidos geofísicos

SLIDE: Colunas de Taylor (Cushman-Roisin, 1996)

- Fluidos homogêneos submetidos a uma rotação ambiente rápida apresentam movimento estritamente colunar, ou seja, todas as partículas de fluido evoluem em consonância mantendo seu alinhamento vertical.

→ descrever experimento do SLIDE

- Descoberta de Geoffrey Taylor - 1º, Taylor obteve relações matematicamente; 2º, comprovou com experimentos de laboratório

- Em movimentos geofísicos tanto oceânicos quanto atmosféricos, este perfeito estado de rigidez/coerência vertical não existe.

A taxa de rotação do planeta não é suficientemente rápida e a densidade não suficientemente homogênea para mascarar/dominar outros processos

→ exemplo próximo: a Corrente Circumpolar Antártica (~ 50 Sv, prof. maiores que 2500m) → Corrente das Malvinas

- Estratificação é outro dos atributos que distinguem DFG da mecânica de fluidos tradicional.

• Escalamentos que naturalmente ocorrem no oceano envolvem fluidos de diferentes densidades: águas mais quentes e mais

(4)

frias ; águas mais salinas e menos salinas.

- Aqui, a força gravitacional é de grande importância pois tenderá a afundar fluidos mais pesados (mais densos) e sobe fluidos mais leves (menos densos)
- Sob condições de equilíbrio, o fluido é estavelmente estratificado, consistindo num empilhamento de camadas verticais cujos valores aumentam com a profundidade

SLIDE: Perfil de densidade potencial - região  
lat: 22,25°S, lon: 034,25°W

$$\sigma_{\theta} = (\rho_{\theta} - 1000) \text{ Kg m}^{-3}$$

⇒ mencionar variação ⇐

→ PROVA ESCRITA: Expandir este tema, mencionando  $N^2$  e critérios de estabilidade gravitacional.

- Os movimentos dos fluidos podem perturbar este equilíbrio e a força da gravidade tenderá sistematicamente restaurar o equilíbrio.
- Pequenas perturbações tendem a gerar ondas internas, que são os análogos tridimensionais das ondas de gravidade que vemos.
- Perturbações maiores, ppmente motivadas por determinado (considerável) tempo, podem causar convecção e misturamento.

5

• Outras consequências da estabilidade gravitacional da coluna de água no oceano são rivas:

→ é necessária energia (considerável) dos escoamentos para erguer água + pesada (+ terra) através de água + leve (- densa)

→ ou seja é difícil misturar águas profundas (ricas em nutrientes) com águas de superfície (ricas em fitoplâncton faminto)

→ outra consequência importante é que a estratificação inibe velocidades verticais no oceano.

### 1.3. Análise de Escalas

SLIDE: Experimento de Águas Mortas de Ekman (1904)

• DFG estuda movimentos que ocorrem em escalas que sofrem influência do planeta

• Mas como discernir se um processo físico é dinamicamente importante numa situação particular?

• Como avaliar se a geometria da baía, a notação da terra ou a estratificação influenciam o escoamento?

• Para tanto, os dinamicistas de fluidos introduziram o conceito de análise de escalas de movimentos.

• Estas escalas, ao invés de serem quantidades definidas precisamente, costumam ser estimativas e são entendidas apenas em termos de ordens de grandeza.

⑥

• Na maioria dos problemas físicos, as escalas "chave" são tempo ( $T$ ), comprimento ( $L$ ) e velocidade ( $U$ ).

• Mas como escolher estas escalas?

⇒ no caso das águas mortas de Nansen:

$L$  - o comprimento das ondas geradas é proporcional comprimento submerso do navio

$U$  - a velocidade do navio

$T$  - o tempo que o navio demora para percorrer a distância  $L$  com a velocidade  $U$

$$T = \frac{L}{U}$$

⇒ um exemplo mais familiar: o vórtice da Corrente Norte do Brasil

$L$  - Raio dos vórtices - tipicamente 200km ( $2 \times 10^5 \text{ m}$ )  $\sim 10^5 \text{ m}$

$U$  - velocidades Tangenciais em superfície ( $1 \text{ m s}^{-1}$ )

$$T = \frac{L}{U} = 0(10^5 \text{ s})$$

SLIDE: Vórtices da Corrente Norte do Brasil



(7)

⇒ Mencionar comentários do Econt. sobre a utilização das escalas e mais até que a escala → depende de intuição e experiência.

• Além de  $L$ ,  $U$  e  $T$ , outras três escalas desempenham papel relevante no estudo de fluidos geofísicos:

- a escala da profundidade do movimento  $H$
- " da densidade de referência  $\rho_0$
- " da variação de densidade  $\Delta \rho$

→ É importante ressaltar que a profundidade de referência não é aquela (necessariamente) correspondente à prof. local, mas sim onde ocorrem as variações de densidade ou de movimento relevantes.

SLIDE: CB ao longo de Cabo Frio

- Os valores de densidade de referência e de sua variação são geralmente insensíveis ao tipo de movimento e são caracteristicamente:

$$\rho_0 = 1028 \text{ Kg m}^{-3} \quad \sim (10^3) \text{ Kg m}^{-3}$$

$$\Delta \rho = 3 \text{ Kg m}^{-3} \quad \sim (10^0) \text{ Kg m}^{-3}$$

SLIDE: Retornar perfis verticais de  $\theta$ ,  $S$  e  $\sigma_\theta$

(8)

#### 1.4. A Importância da Geometria do Movimento

- A razão entre as escalas de comprimento (movimento horizontal) e profundidade é denominada razão de aspecto.

$$\delta = \frac{H}{L}$$

- Se geralmente,  $\delta$  é um valor pequeno, dizemos em DFG que o fluido é raso.

- Mais especificamente,

$\delta \gg 1$  - não há restrição imposta pela profundidade (mov. profundo)

$\delta \sim 1$  - a profundidade pode influenciar o movimento  
- Restrições à ac. vertical

$\delta \ll 1$  - há robusta restrição pela profundidade  
severas restrições à ac. vertical  
(mov. raso)

- Mas podemos dizer então que o Oc. Atlântico Sul é raso?

$$\delta = \frac{3 \times 10^3}{3 \times 10^6} \sim 10^{-3}$$

- Sim, a região do Giro Subtropical do AS é raso.

## 1.5. A Importância da Rotação

• Certamente devemos nos perguntar quais as escalas em que a rotação ambiente se torna um importante fator em controlar os movimentos dos fluidos.

• Para responder a esta pergunta, primeiramente determinemos a taxa de rotação ambiente - a velocidade angular da Terra:

$$\Omega = \frac{2\pi \text{ radianos}}{\text{tempo 1 revolução}} = \frac{2\pi}{24\text{h}} = \frac{2\pi}{8,64 \times 10^4 \text{s}} = 7,29 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$$

• Se os movimentos evoluem numa escala de tempo comparável ou mais longa que o tempo de uma rotação, este fluido sentirá o efeito da rotação ambiente:

$$\varepsilon_T = \frac{\text{tempo de uma revolução}}{\text{escala de tempo de movimento}} = \frac{2\pi \Omega^{-1}}{T} = \frac{2\pi}{\Omega T}$$

$$\varepsilon \sim (\Omega T)^{-1}$$

$\varepsilon \gg 1$  - efeito da rotação pode ser desconsiderado

$\varepsilon \sim 1$  - ef. da rotação ambiente influencia o escoamento

$\varepsilon \ll 1$  - ef. da rotação é crucial para o entendimento dos movimentos oceânicos

(10)

Uma forma mais usual para este parâmetro é

$$E = \frac{\text{Tempo de 1 revolução}}{\text{Tempo que a parcela de fluido percorre a distância } L \text{ com a velocidade } U} = \frac{2\pi \Omega^{-1}}{L U^{-1}} = 2\pi \frac{U}{\Omega L}$$

SLIDE MEANDROS CB

$$E \sim \frac{U}{\Omega L}$$

⇒

IMPORTANTE: maioria das aplicações de engenharia, a rotação pode ser desprezada: fluxo de água a  $5 \text{ m s}^{-1}$  numa turbina 1 m de diâmetro por exemplo.  
→ citam exemplo da CB com  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  meandando a uma extensão de 100 km

## 1.6. A Importância da Estratificação

• Agora devemos perguntar quando os efeitos da heterogeneidade de massa ou estratificação são relevantes no escoamento.

• Como já dito, o oceano consiste de camadas de fluido de diferente densidade, que sob a ação da gravidade, tendem a se organizar em pilhas verticais correspondente a um estado de energia potencial mínima.

• Entretanto, os movimentos dos fluidos continuamente perturbam esse estado de equilíbrio, "tentando" fazer com que o fluido mais denso e afundem camadas mais leves.

• Por conservação de energia mecânica, um aumento de energia potencial tem de ocorrer às custas de decréscimo de energia cinética.

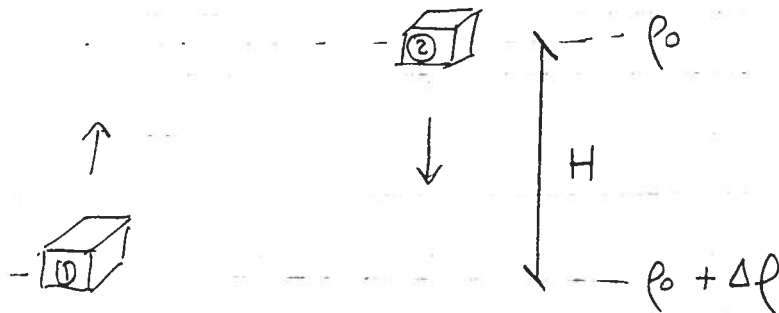
• Logo, a avaliação da importância da estratificação é uma comparação entre energia cinética e potencial.

(11)

- A Energia mecânica é conservante.

$$E_M = E_K + E_P = \text{const.}$$

- Uma prototípica perturbação na estratificação consiste em sougar um elemento de fluido de densidade  $(\rho_0 + \Delta\rho)$  a um intervalo de prof.  $H$ . Obviamente, para que volume se conserve, temos de afundar um elemento de fluido de densidade  $\rho_0$ .



- Energia potencial da partícula sougada :  $e_{P1} = (\rho_0 + \Delta\rho) g H$   
vol.
- Energia potencial da partícula afundada :  $e_{P2} = \rho_0 g H$   
vol.

- A variação de energia pot./vol. é:

$$\Delta e_P = (\rho_0 + \Delta\rho) g H - \rho_0 g H = \Delta\rho g H$$

- Para um cisalhamento com escala de velocidade tipicamente  $U$ , a energia cinética/vol. é

$$e_K = \frac{1}{2} \rho_0 U^2$$

A razão comparativa é dada por:

$$\gamma = \frac{\frac{1}{2} \rho_0 v^2}{\Delta \rho g H}$$

MOSTRAR EXEMPLO

WATER DA CNB

$$\gamma = \frac{1/2 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3} = 0,25$$

- $\gamma \gg 1$  - mudanças em EP ocorrem à custa de pouca EK, e o efeito da estratificação pode ser ignorado
- $\gamma \sim 1$  - um aumento de EP consome significativamente EK. Como resposta, há modificações substanciais no escoamento
- $\gamma \ll 1$  - existe insuficiente EK para perturbar a estratificação, esta limita severamente o escoamento

### O Raio de Deformação Interno

- Um dos casos mais interessantes em DFG é quando os efeitos de Rotação e Estratificação são simultaneamente importantes, mas nenhum dos dois é dominante.
- Matematicamente, atinge-se esta situação quando

$$\text{e } \gamma \sim 1$$

• Da definição de  $E$ , obtemos  $L = \frac{v}{\Omega}$

• Da definição de  $\gamma$ , obtemos  $v = \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho_0} g H}$

Combinando os dois,

$$L \sim \frac{1}{\Omega} \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho_0} g H}$$

Se  $\rho_0 = 1028 \text{ Kg m}^{-3}$ ,  $\Delta \rho = 2 \text{ Kg m}^{-3}$ ,  $H = 1000 \text{ m}$ ,

$$\lambda \approx 60 \text{ Km}$$

Significado físico: distância na qual Tensão gravitacional de manter superfícies isopícnas planas ou manter a estratificação em estado mínimo é equilibrada pelo efeito de rotação da Terra.

→ quantidade fundamental no estudo da DFG

## RESUMO - A Estrutura Geofísica do Oceano

- definir geofísica
- definir dinâmica de fluidos geofísicos
- importância do estudo da DFG: dinâmica do tempo e clima (atm), fenômeno ENSO, ondas longas oceânicas

### Atributos da DFG:

- o efeito da geometria
- o efeito da rotação
- o efeito da estratificação

Geometria - movimentos oceânicos mais longos horizontalmente que profundos  
 citar dimensões do Giro Subtropical  $30^\circ$  de extensão  
 330 Km contra 3,3 Km de profundidade

### Rotação

- advém da presença da rotação ambiente
- introduz dois termos na eq. do movimento na forma de aceleração ou força/massa: força de Coriolis e a força centrífuga
- CENTRÍFUGA - mais palpável mas s/ papel relevante na DFG
- CORIOUS - crucial ao estudo → impõe certa rigidez vertical ao fluido geofísico
- citar Colunas de Taylor
- boa aproximação, mas  $R$  não é rápida o suficiente
- regiões polares



Estratificação - movimentos que ocorrem no oceano em volumes fluidos de densidade diferentes

- a força gravitacional tende a afundar fluidos pesados e a subir fluidos mais leves

→ geralmente, o oceano está estratificado

⇒ Perfil de  $\rho$  potencial -  $1025 - 1028 \text{ kg m}^{-3}$  em 4000 m (lat.  $23^\circ \text{S}$ )  
lon.  $034^\circ \text{W}$

- Movimentos do fluido tendem a perturbar este equilíbrio, gravidade tende a restaurar

→ peg. perturbações → ondas internas  
→ grandes " → (mant. por consider. tempo): convecção / mistura

- Consequências:
    - é difícil misturar águas prof. (e raras em nutrientes) com águas de sup.
    - inibe velocidades verticais
- ⇒ experimento das águas mortas de Ekman (1904)

### Análise de Escalas

- OEF - estuda movimentos que ocorrem em escalas que sofrem a influência do planeta

• Mas como avaliar? Direcionamos o estudo desenvolvendo o conceito de análise de escalas de movimento.

- Escalas - são ordens de grandeza, são estimativas, não definidas precisamente

- Na maioria dos problemas físicos, as escalas chave são tempo ( $T$ ), comprimento ( $L$ ) e velocidade ( $U$ )
- falamos escala advectiva de  $T$

→ Exemplo vórtices da CNB:  $L$  - raio dos vórtices -  $200 \text{ km} \sim 10^5 \text{ m}$

$U$  - velocidades tangenciais em sup.  $\sim 1 \text{ ms}^{-1}$

$$T = \frac{L}{U} = 10^5 \text{ s.}$$

- Além de  $T$ ,  $L$  e  $U$ , três outras escalas desempenham papel relevante na DFG:

- escala da prof. do momento  $H \sim 10^3 \text{ m}$
- " da densidade de referência  $\rho_0 \sim 10^3 \text{ kg m}^{-3}$
- " da variação de densidade  $\Delta \rho \sim 1 \text{ kg m}^{-3}$

ESTENDER DISCUSSÃO

## A Importância da Geometria do Momento

- A razão entre as escalas  $L$  e  $H$  é:  $\delta = \frac{H}{L}$
- $\delta \gg 1$  - não há restrições impostas pela profundidade acelerações verticais podem se desenvolver (mov. prof.)
- $\delta \sim 1$  - a profundidade passa a influenciar o momento  
- há restrições à ac. vertical do fluido
- $\delta \ll 1$  - há severa restrição às acelerações verticais pela profundidade (mov. e' dito raso)

Ex:  $\delta = \frac{3 \times 10^3}{3 \times 10^6} = 10^{-3}$  no caso do Giro Sub tropical

## A Importância da Rotação

- Em quais escalas a rotação ambiente influencia/controla o momento dos fluidos?

→ Defini  $\Omega = \frac{2\pi \text{ rad}}{24 \text{ h}} = \frac{2\pi}{8,64 \times 10^4 \text{ s}} = 7,29 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$

•  $E_T = \frac{\text{Tempo de 1 revolução}}{\text{escala de tempo do momento}} = \frac{2\pi \Omega^{-1}}{T} = \frac{2\pi}{\Omega T} \sim (\Omega T)^{-1}$

Como  $T$  p/ mov. mais longos,  $\omega$  de rotaç. é mais baixa:

$$E = \frac{\text{Tempo de 1 revolução}}{\text{Tempo que a parcela de fluido percorre a distância } L \text{ com a velocidade } U} = 2\pi \frac{U}{\Omega L} \sim \frac{U}{\Omega L}$$

- citar que na maioria dos exemplos de engenharia o número pode ser desconsiderado: fluxo de água a  $5 \text{ ms}^{-1}$  numa turbina de  $1 \text{ m}$  de diâmetro
- em oceanografia, a CB mantém-se com vel. de  $0,5 \text{ ms}^{-1}$  por uma extensão de  $100-200 \text{ km}$ .

### A Importância da Estratificação

- Quando os efeitos da heterogeneidade de massa são relevantes ao escoamento?

- estratificação estável → estado de energia potencial mínima  
→ enfilamento de camadas

- movimento dos fluidos continuamente perturbam esse estado de equilíbrio "tombando" sempre fluidos mais densos e afastam camadas mais leves

- Cons. de energia mecânica → aumento de energia potencial ocorre às custas de decréscimo de energia cinética

- Avaliação da importância da estratificação: comparar  $e_k$  e  $e_p$ .

$$e_M = e_K + e_P \quad (\text{energia por unit volume})$$

- Típica perturbação na estratificação: surgem parcela de fluido de densidade  $\rho_0 + \Delta\rho$  de uma altura  $H$  onde o fluido ambiente é  $\rho_0$ . Por cons. de volume, parcela de fluido tem de afundar.

$$e_{P1} = (\rho_0 + \Delta\rho) g H \quad \Delta e_P = e_{P1} - e_{P2} = \Delta\rho g H$$

$$e_{P2} = \rho_0 g H$$

$$e_K = \frac{1}{2} \rho_0 v^2$$

$$\bullet \text{ A razão comparativa } \sigma': \quad \sigma = \frac{\frac{1}{2} \rho_0 v^2}{\Delta\rho g H} \sim \frac{\rho_0 v^2}{\Delta\rho g H}$$

- $\sigma \gg 1$  - mudanças em  $e_P$  consomem as alturas de energia  $e_K$ , o efeito da estratificação pode ser ignorado
- $\sigma \sim 1$  - um aumento em  $e_P$  consome significativamente  $e_K$ . Como resposta, há alteração no escoamento devido à estratificação
- $\sigma \ll 1$  - existe insuficiente  $e_K$  para perturbar a estratificação, esta limita severamente o escoamento.

$$\text{Ex: meandros da CB: } \frac{10^3 \cdot 1}{1 \cdot 10 \cdot 10^3} = 10^{-1}$$

## O Raio de Deformação Interna

• Em dos casos + importantes em DFG é' qdo rotação e estratificação são simultaneamente importantes, mas nenhum dos dois é' dominante.

• Matematicamente,  $\epsilon, \sigma \sim 1$

• Da definição de  $\epsilon$ , obtemos  $L = \frac{v}{\Omega}$

• Da definição de  $\sigma$ , obtemos  $v = \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} g H}$

• Combinando os dois:  $L \sim \frac{1}{\Omega} \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} g H} \sim R_d$

$$R_d = 10^4 \cdot \sqrt{10} \sim 33 \text{ km}$$

→ valor médio real é' 60 km

Significado físico: distância na qual a tendência gravitacional de manter as superfícies isopícnicas planas é' equilibrada pelo efeito de rotação da terra após perturbação.

→ quantidade fundamental no estudo da DFG