HIDRÁULICA MARÍTIMA
NOTA DE AULA 06 – FINAL DE HIDRÁULICA MARÍTIMA

FENÔMENOS DE HIDRÁULICA MARÍTIMA

CLAPOTIS – ONDAS ESTACIONÁRIAS

Em bacias portuárias limitadas (fechadas), ou no caso da reflexão de ondas progressivas por paredes verticais ou quase verticais, poderemos ter a formação de ondas estacionárias, também chamadas de **clapotis**.

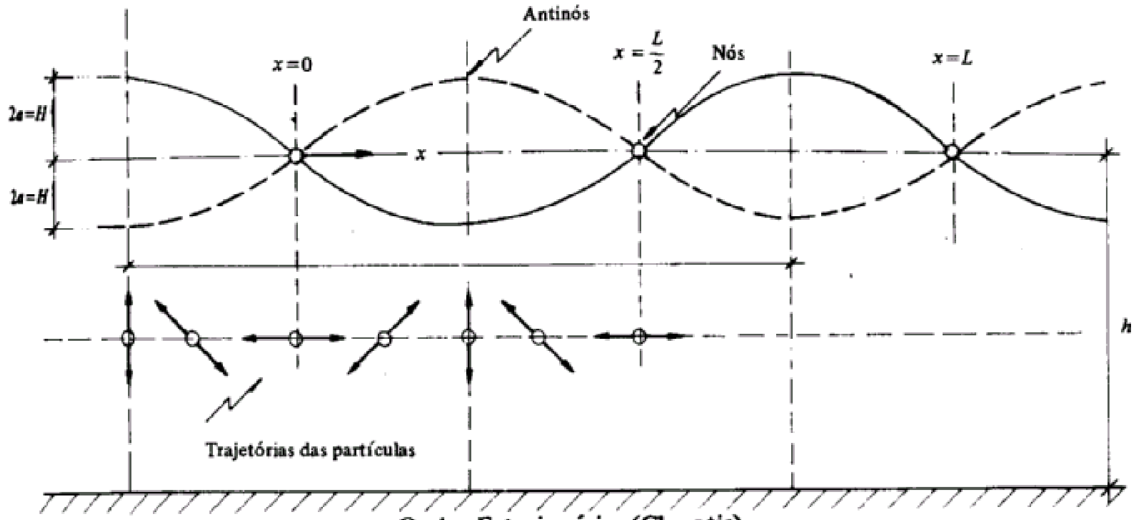
O clapotis é formado a partir da superposição entre uma onda progressiva incidente contra uma onda refletida pela parede ou obstáculo encontrado.

A onda progressiva incidente tem a forma $\eta=\mathbf{a}\cos(Kx-\sigma t)$ que superposta a uma outra onda refletida dá:

$$\eta = 2a\,\mathrm{sen}\,Kx\cos\sigma t$$

ou seja, uma onda com uma amplitude igual ao dobro da amplitude da onda incidente.

Esta onda resultante não é progressiva, e sim estacionária, isto é, provoca uma oscilação do fluido com os pontos nodais fixos $Kx=n\pi$, ou $x=nL/2$. Na figura abaixo mostra-se a criação da onda clapotis.



Ondas Estacionárias (Clapotis)

(Fonte: Mason,J., 1984)

Nos pontos nodais x=0, L/s, ..., nL/2, o nível da água permanece constante. Os pontos situados a meia distância entre os nós são os chamados *antinós* e neles a variação de nível é máxima.

Um estudo da trajetória das partículas fluidas demonstra que as mesmas executam movimentos oscilantes, indicados na figura acima. Nos nós, o movimento de oscilação das partículas é puramente horizontal, nos antinós o movimento é vertical e nos pontos intermediários as trajetórias oscilantes das partículas são inclinadas.

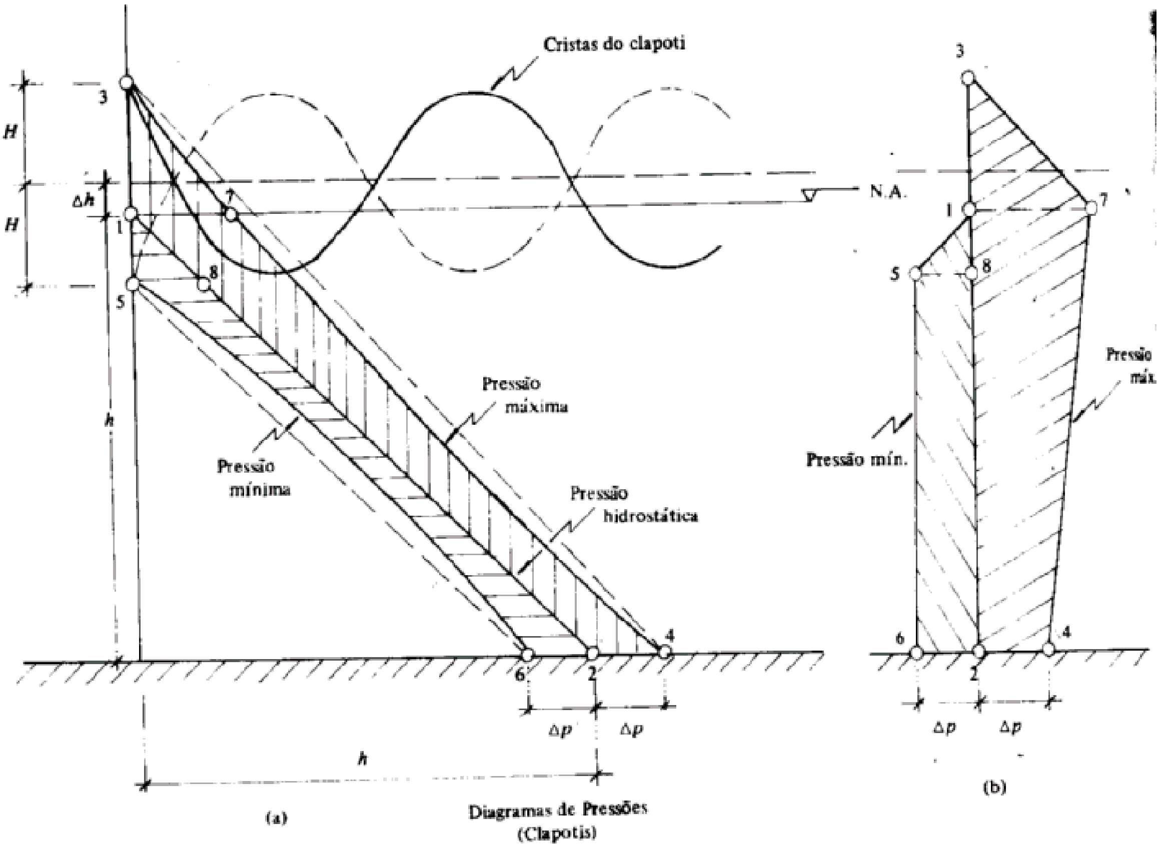
Uma vez que nos antinós o movimento das partículas é vertical, nada seria alterado se, nestas seções, colocássemos paredes verticais impermeáveis. Esta situação ocorre nas bacias portuárias fechadas por paredes verticais e sujeitas a oscilações por clapotis.

Os diagramas de pressões determinados pelas oscilações de clapotis podem ser facilmente determinados com o uso da teoria hidrodinâmica. São empregados os diagramas de SAINFLOU como demonstrado a seguir.

Seja uma onda clapotis, de altura H, sendo refletida numa parede vertical. Demosntra-se que o plano médio da onda ocorre a uma altura

$$\Delta h = \frac{\pi H^2}{L} \cot gh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$$

acima do nível N. A da água em repouso. Veja-se a figura abaixo.



(Fonte: Mason, J., 1984)

A seguir, traça-se a linha 1-2 correspondente à pressão hidrostática, a partir da qual, no fundo marcamos a pressão:

$$\Delta p = \frac{H}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)}$$

para a direita e para a esquerda (pontos 4 e 6). Unindo os pontos 4 a 3 e 6 a 5, teremos as linhas de pressões máximas e mínimas indicadas por linhas cheias. É costume, a favor da segurança, aproxima-las pelas linhas tracejadas próximas indicadas. Os diagramas de pressões máximas e mínimas da onda, descontado o diagrama das pressões hidrostáticas, acham-se representadas na figura (b), devendo naturalmente ser multiplicados pelo peso específico γ do fluido.

RESSONÂNCIA EM BACIAS FECHADAS

O problema das oscilações em bacias fechadas pode ser compreendido com base no estudo referente às ondas estacionárias clapotis.

Tal como foi dito anteriormente, podemos verificar que nada se altera quando colocamos paredes verticais, junto dos antinós das ondas, onde o movimento das partículas é vertical. Em realidade a situação é inversa. Se tivermos na prática paredes refletoras, separadas pela distância L_B, poderão inserir-se entre elas ondas estacionárias tais que L_B seja um múltiplo de L/2 (L= comprimento da onda). Teremos assim:

$L_B = \dfrac{mL}{2}$ sendo m um inteiro.

Por outro lado, como o comprimento de onda L é relacionado com o período T , podemos calculá-lo em função do comprimento L_B da bacia por meio da equação:

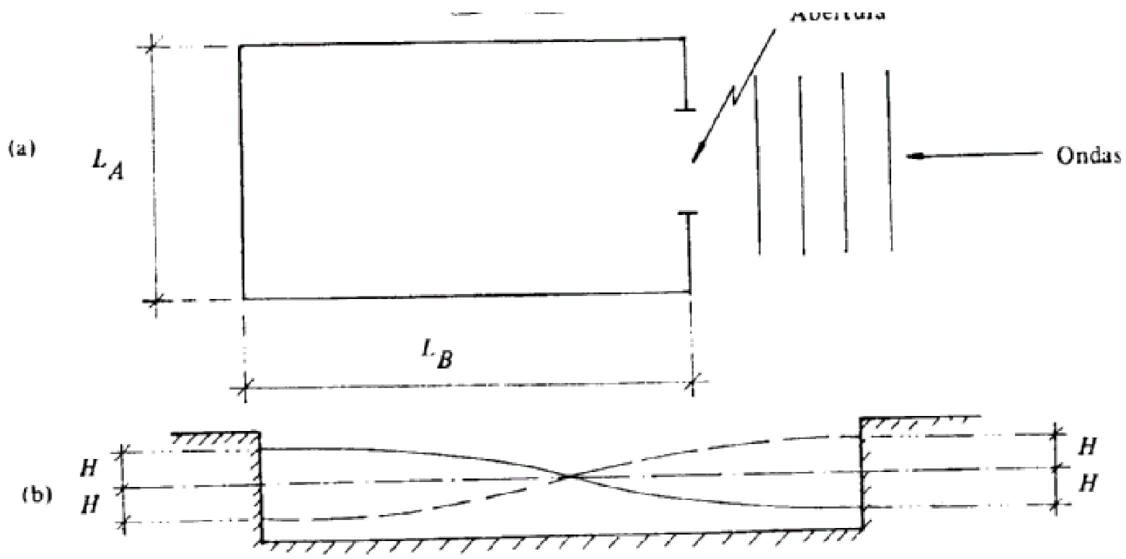
$$T_m = \left[\frac{4\pi L_B}{mg \tanh\left(\dfrac{m\pi d}{L_B} \right)} \right]^{1/2}$$

Nesta fórmula, m poderá tomar o valor de qualquer número inteiro 1,2,3,...etc. O **período fundamental** corresponde a m=1, isto é,

$$T = \left[\frac{4\pi L_B}{g \tanh\left(\dfrac{\pi d}{L_B} \right)} \right]^{1/2}$$

No caso de águas rasas, $\tanh(\pi d/L_B) \cong \pi d/L_B$ de modo que:

$$T = \frac{2L_B}{\sqrt{gd}}$$



(Fonte: Mason,J.,1984)

Esta fórmula foi deduzida para o caso unidimensional, isto é, para quando a dimensão da bacia fechada L_B é muito maior do que a dimensão L_A ($L_B >> L_A$). Caso isto não ocorra a fórmula a ser empregada será:

$$T = \frac{2}{\sqrt{gd}}\left[\left(\frac{1}{L_A}\right)^2 + \left(\frac{1}{L_B}\right)^2\right]^{-1/2}$$ para o período fundamental T de oscilação.

No caso de bacias fechadas com forma nitidamente alongada ($L_B >> L_A$) o único tipo de oscilação de interesse é aquele cujo período é dado pela equação $T = 2L_B/(gd)^{0,5}$. O tipo de oscilação nesse caso é esquematizado na figura (b) acima, com uma amplitude de variação de nível igual a 2H.

Para um observador colocado nas margens da bacia, a variação de nível da água com a amplitude 2H, que se sucede num intervalo de tempo T, apresenta-se algo semelhante à maré nos oceanos, apesar de não passar de um movimento oscilatório da massa fluida confinada na bacia portuária fechada.

Esta fórmula tem sido aplicada a alguns lagos de forma geométrica alongada, existentes em certas parte da terra, tais como o Lago Baikal (Rússia), o Lago de Genebra (Suíça) e Lake George (País de Gales), com resultados surpreendentemente próximos da realidade observada.

Um ponto importante e que deve ser observado na escolha e projeto das bacias portuárias fechadas é o da incidência de ondas em aberturas naturais ou constituídas por quebra-mares numa bacia fechada, conforme mostrado na figura acima.

Se o período das ondas incidentes coincidir com ou se aproximar do período natural de oscilação da bacia, poderemos encontrar nela uma grande agitação. O fenômeno é de **ressonância**, do mesmo tipo daquele que ocorre nas vibrações mecânicas forçadas, quando a freqüência da força perturbadora coincide com a freqüência natural de vibração do sistema.

No presente caso, a oscilação forçada é comandada pelo campo de velocidades do fluido, imposto como condição de contorno na abertura de entrada da bacia.

Portanto, na escolha da conformação da bacia portuária, devemos verificar a possibilidade de haver ressonância em seu interior pela ação de ondas incidentes e, caso ocorra, deveremos alterar sua forma ou introduzir mecanismos de dissipação adequados.

PREDIÇÃO DE ONDAS

Até agora foi visto que, conhecendo-se o período **T** das ondas e sua altura $\mathbf{H_0}$, ambos medidos em águas profundas, poderemos descrever todas as demais características da onda em quaisquer profundidades até sua arrebentação na praia ou nas obras portuárias que temos interesse.

Torna-se necessário então, caso não hajam meios físicos de medição dessas duas características iniciais das ondas, como bóias direcionais (waverider direcional, que mede perído, altura e direção de propagação das ondas), empregar-se métodos indiretos para estimativa dessas duas características primordiais para a hidráulica marítima.

Sabe-se que a principal fonte de geração de ondas é o **vento**, incluindo-se aí todas as suas formas, desde uma leve brisa até uma tempestade ou furacão. Será empregado o Método do COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER do U.S. Army Corps of Engineers – Waterways Experiment Station, Vicksburg Mississipi, 1984.

Ventos Sobre a Água

Entre 10 e 100 m de altura sobre a superfície do mar, a pressão de vento é constante, mas de velocidade variável. O vento resulta do esforço natural para eliminar gradiente de pressão. Os gradientes de pressão estão quase sempre em equilíbrio aproximado com a aceleração produzida pela rotação da terra.

Dois fatores são responsáveis pela geração de ventanias: o aquecimento desigual da superfície da terra ou do mar, promovendo zonas de baixa e de alta pressão e, o efeito de coriolis sobre as massas fluidas, sejam as correntes marítimas, sejam as massas de ar da atmosfera.

O vento nada mais é do que o deslocamento de uma massa de ar de uma zona de alta pressão para uma zona de baixa pressão atmosférica.

Velocidade do Vento – Coeficiente de Arraste

É feito um ajuste na velocidade do vento para cálculo da pressão do vento sobre a água, em virtude da relação *velocidade do vento/pressão do vento* não ser linear. Assim:

$$U_A = 0{,}71U^{1,23}$$

onde U_A = fator de pressão do vento sobre a água em m/s;

U = velocidade medida do vento por meio de anemômetro em m/s.

Todos os cálculos de pressão do vento sobre a água devem empregar o valor de U_A e jamais de U tão somente.

Predição de Ondas em Águas Profundas

Seja:

F = fetch, é subjetivamente uma distância da região na qual a velocidade do vento e sua direção sejam razoavelmente constantes. Pode ser determinado por meio de cartas sinópticas que mostram as isolinhas de pressão atmosférica.

H_0 = altura da onda em águas profundas em (m);

T = período da onda em águas profundas em (seg);

U_A = pressão do vento em m/s.

As fórmulas que permitem calcular as características com base num fetch conhecido são:

$$H_0 = 1{,}616 \times 10^{-2} U_A \sqrt{F}$$

e

$$T = 0{,}6238 \sqrt[3]{U_A F}$$ (note que aqui a raiz é cúbica, cuidado !)

Os valores calculados acima não podem ultrapassar os valores dados pelas fórmulas abaixo que foram determinadas para a condição de *desenvolvimento pleno*, pois há um limite máximo de crescimento das ondas em relação ao fetch que não pode ser desobedecido. Isto é lógico, pois pelas equações acima, se tivéssemos um comprimento de fetch tendendo para infinito, então a altura e o período da onda tenderiam também para infinito, o que não é sequer razoável ou mesmo possível !

$$H_0 = 2{,}4821 \times 10^{-2} U_A^2$$

e

$$T = 0{,}83 U_A$$

Assim, caso os valores determinados pelas primeiras fórmulas acima, calculados com base no fetch, resultem maiores do que os das segundas fórmulas, que dispensam o uso do fecth, os valores a serem empregados deverão ser os destas últimas duas fórmulas.

ONDAS PROVOCADAS POR FURACÕES

As fórmulas para predição de altura de ondas em águas profundas para furacões de baixa velocidade de avanço (deslocamento), o que não significa propriamente uma baixa velocidade de giro, são dadas por:

$$H_0 = 5{,}03\,e^{\left(\frac{R\times\Delta P}{4700}\right)}\left[1+\frac{0{,}29\alpha V_F}{\sqrt{U_R}}\right]$$

e

$$T = 8{,}6\,e^{\left(\frac{R\times\Delta P}{9400}\right)}\left[1+\frac{0{,}145\alpha V_F}{\sqrt{U_R}}\right]$$

onde:

H_0 = altura das ondas em águas profundas em (m);

T = período das ondas em (seg);

e = número de Euler, base dos logaritmos neperianos, igual a 2,718....;

R = raio de vento máximo em Km (ver figura);

ΔP = Pn – Po, depressão atmosférica, onde Pn é a pressão normal atmosférica de 760 mmHg (milímetros de mercúrio) ao nível do mar e, Po é a pressão no centro (olho) do furacão medida também em mmHg; (obs: normalmente se mede a pressão atmosférica em milibar (mb), sendo que 1 mb = 0,75 mmHg)

V_F = velocidade de avanço do furacão em m/s;

U_R = máxima velocidade de sustentação do vento em m/s, calculada para uma altura de 10 m acima da superfície do mar no raio R, onde:

$U_R = 0{,}865\ U_{max}$ para furacões estacionários (parados no local)

ou então

$U_R = 0{,}865\ U_{max} + 0{,}5\ V_F$ para furacões se movimentando com velocidade V_F

Sendo que U_{max} é dada por:

$$U_{max} = 0{,}447\left[14{,}5\left(P_n - P_o\right)^{0{,}5} - R\left(0{,}31 f\right)\right]$$

onde:

f = parâmetro de Coriolis = C = 2 ΩsenΦ em **radianos por hora**.

onde Ω = velocidade angular da terra = $2\pi(1+1/365{,}24)$ radianos/dia = $7{,}292 \times 10^{-5}$ radianos/segundo = $2\pi/24$ radianos por hora

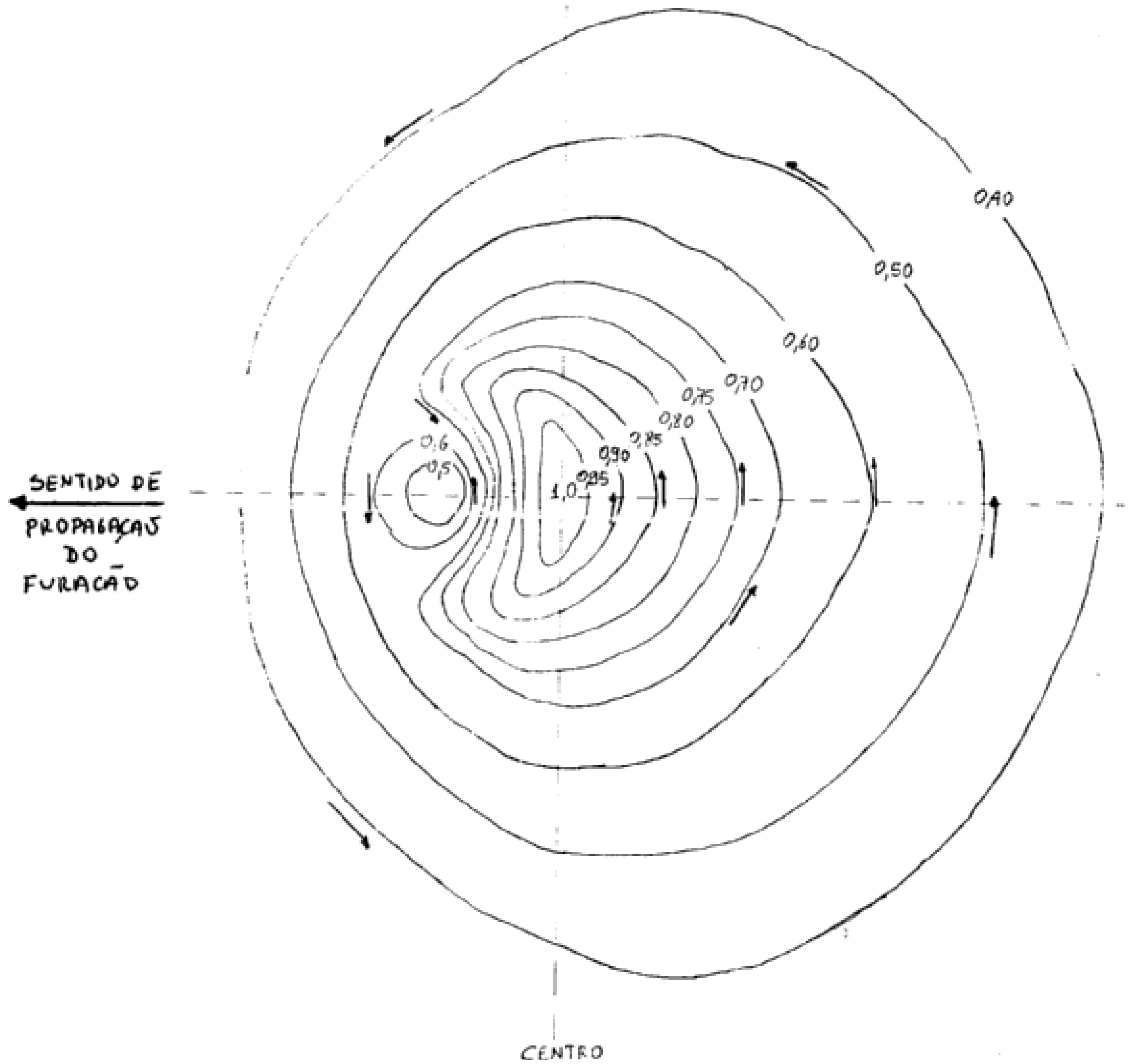
Φ = latitude local

Pode-se tirar o valor de f direto da tabela abaixo em função da latitude do lugar

Latitude em Graus	Parâmetro de Coriolis f
25	0,221
30	0,262
35	0,300
40	0,337

α = um coeficiente que depende da velocidade de avanço V_F do furacão e do incremento em função do comprimento do fetch quando o furacão está em movimento. É sugerido que para movimentação lenta de avanço do furacão, se tome o valor de α = 1,0 por segurança.

O furacão tem isolinhas que representam a altura das ondas em seu entorno como mostra a figura seguinte. O valor básico da altura da onda H, é dada pelas equações acima. Para se conhecer a altura da onda na periferia do furacão deve-se multiplicar o valor da isolinha pela altura H calculada. As setas menores indicam a direção de giro das ondas. O raio R pode ser considerado como a metade do diâmetro da massa de nuvens do furacão geralmente registrada por imagem de satélite.



(Fonte: Autor, 2014)

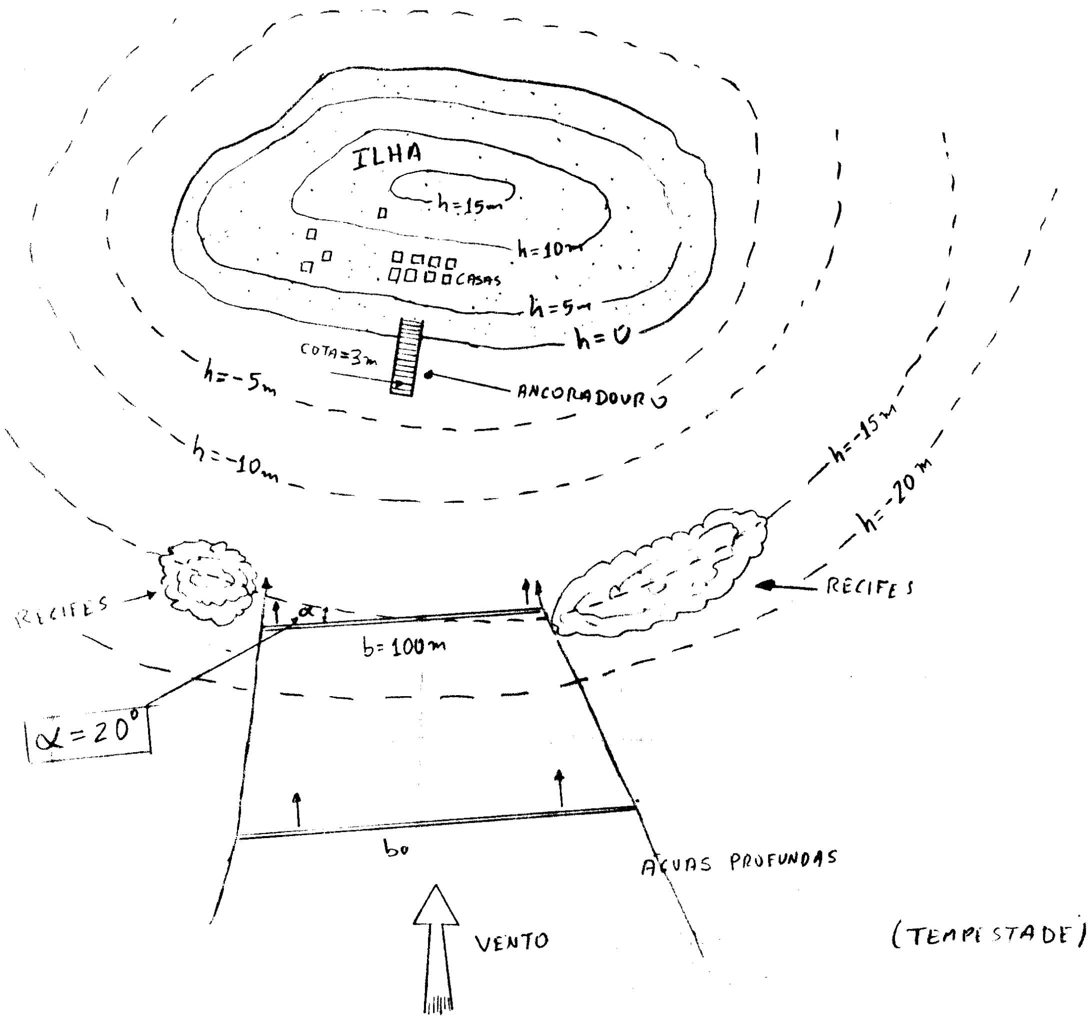
Apresenta-se a seguir a chamada ESCALA DE BEAUFORT para ventos, a qual é obrigatória nas embarcações marítimas para identificação das condições de ventos e tempestades em alto mar. Os valores das velocidades de vento identificados na Escala de Beaufort, podem servir para uma primeira aproximação do cálculo da altura e do período das ondas a incidir sobre uma obra portuária, que não tenha ainda uma instrumentação adequada para medir as características das ondas.

Escala	Nome em Português	Nome em Inglês	Velocidade estimada dos ventos (m/s)	Efeitos em terra	Estado do mar	
					Designação	Aspecto do mar
0	Calmaria	Calm	0 a 0,2	Qualquer fumaça sobe verticalmente	Espelhado	Espelhado
1	Bafagem	Zightair	0,3 a 1,7	A fumaça toma a direção do vento, o catavento não se move	Tranqüilo	Mar com pequenas rugas com aparência de escamas
2	Aragem	Slight Breeze	1,8 a 3,3	O catavento se move, sente-se o vento na face	Chão	Ligeiras ondas com cristas mas sem arrebentação
3	Vento Fraco	Gentle Breeze	3,4 a 5,4	Bandeiras pequenas se desfraldam, folhas e plantas se movem	Pequenas Ondas	Grandes ondas com arrebentações
4	Vento Moderado	Moderate Breeze	5,5 a 8,5	O vento levanta poeira e papéis soltos	Ondas	Ondas mais longas
5	Vento Fresco	Fresh Breeze	8,5 a 11,0	Nos lagos formam-se pequenas ondas	Grandes Ondas	Ondas longas com possibilidade de borrifo (espumas)
6	Vento Muito Fresco	Strong Breeze	11,1 a 14,1	Ovento assovia nos fios, é difícil andar com guarda-chuva aberto	Vagalhões	Ondas longas e borrifo
7	Vento Forte	Moderate Gale	14,2 a 17,2	Partem-se os galhos das árvores	Grandes Vagalhões	Mar grosso e o vento arranca espuma
8	Vento Muito Forte	Fresh Galé	17,3 a 20,8	É quase impossível se andar contra o vento	Tempestuoso	Vê-se faixas de espuma branca
9	Vento Duro	Strong Gale	20,9 a 24,4	Danificam-se as estruturas mais fracas	Idem	O borrifo começa a afetar a visibilidade
10	Vento Muito Duro	Whole Gale	24,5 a 28,5	O vento arranca árvores e danifica estruturas	Idem	A superfície do mar é quase toda branca
11	Vento Tempestuoso	Storm	28,6 a 32,7	Grandes estragos ocorrem	Idem	Os navios médios somem no cavado das ondas

12	Furacão	Hurricane	> 32,8	Destruição generalizada	Idem	A visibilidade à frente é nula de fato

EXERCÍCIOS DE HIDRÁULICA MARÍTIMA

<u>Exercício n° 1</u>: Uma ilha oceânica mostrada na figura abaixo possui um ancoradouro para pequenos barcos de pesca, cuja plataforma está situada na cota +3,00 m em relação ao nível do mar.



A ilha é naturalmente protegida por recifes de corais que afloram na profundidade de h = – 15,00 m (d = 15,00m), tendo uma abertura de 100 m por onde passam os barcos. As casas dos pescadores estão situadas entre a cota + 5,00 m e + 15,00 m acima do nível do mar. As ortogonais das ondas proveniente de águas profundas que chegam frontalmente ao ancoradouro da ilha possuem largura b_0 = 130 m. Na abertura dos recifes de corais, as cristas das ondas formam um ângulo α de 20°. A ilha foi então atingida por um vento muito duro, segundo a escala de Beaufort, com velocidade de vento de 25 m/s, com fetch estimado em 150 Km. A partir destes dados determine:

a) As características da onda na passagem entre os recifes;

b) As características da onda na profundidade h = – 5,00 m (d = 5,00 m);

c) O ângulo de refração na profundidade h = – 5,00 m (d = 5,00 m);

d) A altura da lâmina d`água sobre a plataforma do ancoradouro que fica na cota + 3,00 m.

<u>SOLUÇÃO:</u>

1) Estimativa das características da onda provocada pelo vento em águas profundas:

Dados: V_{vento} = 25 m/s $\cong$ 90 Km/h, daí U = 25 m/s

$U_A = 0{,}71 \times 25^{1{,}23} = 37{,}21$ m/s

Altura da onda para Fetch = 150 Km:

$H_0 = 0{,}01616\ U_A\ F^{0{,}5} \quad \therefore \; H_0 = 0{,}01616 \times 37{,}21 \times 150^{0{,}5} = 7{,}36$ m

Período da onda para Fetch = 150 Km:

$T = 0{,}6238\ (U_A\ F)^{1/3} \quad \therefore \; T = 0{,}6238 \times (37{,}21 \times 150)^{1/3} = 11{,}06$ seg

Comparando-se os valores encontrados pelo critério do Fetch com a condição de *desenvolvimento completo* tem-se:

$H_0 = 0{,}024821\ U_A^2 \quad \therefore \; H_0 = 0{,}024821 \times 37{,}21^2 = 34{,}36$ m

Como o primeiro valor encontrado para H_0 foi de 7,36 m < 34,36 m, então o valor correto de H_0 será 7,36 m.

H_0 = 7,36 m

Agora $T = 0{,}83\ U_A \quad \therefore \quad T = 0{,}83 \times 37{,}21 = 30{,}88$ seg

Como o primeiro valor encontrado para T foi de 11,06 seg < 30,88 seg, então o valor correto de T será mesmo de 11,06 seg.

T = 11,06 seg

2) Características da onda em águas profundas:

$C_0 = gT/(2\pi) \quad \therefore \quad C_0 = (9{,}81 \times 11{,}06) / (2 \times \pi) = 17{,}27$ m/s

$L_0 = C_0 \times T \quad \therefore \quad L_0 = 17{,}27$ m/s $\times$ 11,06 seg = 191,00 m

Por este valor de L_0, estima-se que a profundidade a partir da qual se tem as condições de águas profundas é dada por: $d = L_0/2$ ou $d = 191{,}00/2 = 95{,}5$ m

$\sigma = 2\pi/T \quad \therefore \quad \sigma = (2 \times \pi) / 11{,}06 = 0{,}568$ /seg (Note a unidade: por segundo)

$K = 2\pi/L \quad \therefore \quad K = (2\times\pi)/L_0 = (2\times \pi) / 191{,}00 = 0{,}0328$ /m (por metro)

Velocidade horizontal orbital máxima u_{max}: A velocidade orbital horizontal é dada pela equação abaixo,válida para qualquer profundidade, posição e tempo t:

$$u = \frac{agK \cosh[K(d+z)]}{\sigma \cosh(Kd)} \cos(Kx - \sigma t)$$

Entretanto, quando se trata de analisar a máxima velocidade orbital, a qual acontece na superfície do mar (z = 0) e, para um valor máximo que é quando o argumento do cosseno se iguala a zero ou 2π, produzindo o valor máximo de 1,00 para a função cossenoidal, a equação acima fica simplesmente:

$$u_{max} = \frac{agK}{\sigma}$$

Em que a = amplitude da onda ou H/2.

Então:

$$u_{max} = \frac{\frac{7,36}{2} \times 9,81 \times 0,0328}{0,568} = 2,08 m/s$$

Note que neste caso de águas profundas, $C_0 >> u_{max}$!

3) Características da onda na passagem entre os recifes (h = –15,00 m ou seja, d = 15,00m):

Emprega-se primeiramente a equação interativa

$$\frac{L}{L_0} = \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$$

Daí: $\frac{L}{191,00} = \tanh\left(\frac{2 \times \pi \times 15}{L}\right)$

Para quem não dispõe de uma calculadora programável para igualar ambos os lados da equação empregando a função "SOLVER" ou "atingir meta", só há um caminho a seguir, o qual explicaremos passo a passo neste exemplo:

Quando a profundidade em que se deseja calcular as características da onda (d = 15,00m) está muito abaixo da condição de águas profundas (d = 95,5 m), aconselha-se como primeira tentativa atribuir para L um valor correspondente a 2/3 do valor de L_0. Assim, L_{15m} = 2/3 L_0

$L_{15m} = 0,66 \times 191,00 = 126,06$ m e testa-se esse valor na equação interativa:

Para $L_{15m} = 126,06$ m

$L/L_0 = \tanh(2\pi d / L_{15m}) \;\therefore\; 126,06/191,00 = \tanh(2\times\pi\times 15/126,06)$?

Fazendo-se os cálculos verifica-se que $0,660 \neq 0,633$

Então conclui-se que $L_{15m} \neq 126,06$ porém está próximo, devendo ser diminuído em valor:

Arbitra-se um novo valor para L_{15m} próximo de 126,06 m , por exemplo, 123,00m e vai-se comparando os resultados até igualar, *no mínimo na terceira casa decimal*, o resultado dos dois membros da equação:

P/ $L_{15m} = 123,00$ m $\therefore$ $0,643 \neq 0,644$

P/ $L_{15m} = 123,30$ m $\therefore$ $0,645 \neq 0,643$

P/ $L_{15m} = 123,20$ m $\therefore$ $0,645 \neq 0,644$

P/ $L_{15m} = 123,10$ m $\therefore$ $0,644 = 0,644$

Logo, o valor correto de $L_{15m} = 123,10$ m cuja $\tanh(2\pi d/L) = 0,644$

Agora calcula-se: $K = 2\pi/L \;\therefore\; K = 2\pi/123,10 = 0,051$

Com este valor de K será possível calcular todos os demais elementos para esta profundidade d = 15 m.

$$n = 0,5\left(1+\frac{2Kd}{\mathrm{senh}(2Kd)}\right) = 0,5\left(1+\frac{2\times 0,051\times 15}{\mathrm{senh}(2\times 0,051\times 15)}\right) = 0,847$$

e

$$\frac{C}{C_0} = \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$$ logo, como $\tanh(2\pi d/L) = 0,644$

então C_{15m} = 0,644 × 17,27 m/s = 11,12 m/s

A altura da onda na profundidade d = 15 m será encontrada por:

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{b_0}{b}} \bullet \sqrt{\frac{1}{2}\frac{1}{n}\frac{C_0}{C}}$$

ou seja, H_{15m} = H_0 × (191/100)^{0,5} × (0,5 × 1/0,847 × 1/0,644)^{0,5}

H_{15m} = 7,36 m × 1,38 × 0,957 = 9,72 m ∴ **H_{15m} = 9,72 m**

A velocidade orbital máxima será:

$$u_{\max 15m} = \frac{\frac{9,72}{2} \times 9,81 \times 0,051}{0,568} = 4,28\, m/s$$

4) Características da onda na profundidade h = – 5,00 m ou d = 5,00 m

Aplica-se o mesmo princípio e roteiro de cálculo demonstrado para d = 15m, nesse caso fica:

$$\frac{L_{5m}}{L_0} = \tanh\left(\frac{2 \times \pi \times 5}{L_{5m}}\right)$$ que após resolvida por tentativas resulta em **L_{5m} = 75,3m**

correspondendo a tanh(2πd/L) = 0,394

Os demais valores encontrados serão:

K = 2π/L_{5m} = 2π/75,3 = 0,083

C_{5m} = 0,394 × 17,27 m/s = 6,804 m/s

n = 0,946 (veja-se que está muito próximo de 1,00 = águas próximas de rasas)

H_{5m} =11,76 m considerando-se, logicamente b_0/b = 191m/100m, tal como antes!

$u_{max\ 5m}$ = 8,43 m/s

Note que agora u_{max} (8,43 m/s) é maior do que C_{5m} (6,804 m/s), o que significa que a onda está em franco **processo de arrebentação !**

5) Ângulo de refração com a curva de nível da profundidade h = – 15,00 m

Usa-se a equação:

$$\text{sen}(\alpha_2) = \frac{C_2}{C_1}\text{sen}(\alpha_1)$$

Sendo que $C_2 = C_{5m}$ = 6,80 m/s

$C_1 = C_{15m}$ = 11,12 m/s

α_1 = 20°

Logo: $$\text{sen}\,\alpha_{5m} = \frac{6{,}80}{11{,}12}\text{sen}(20) = 0{,}209$$

Assim: α_{5m} = arc sen(0,209) = 12,07° **α_{5m} = 12,07°**

6) Cota de atingimento no ancoradouro considerando d = 5m

Existe uma equação, ainda não abordada nas notas de aulas anteriores, que determina a **elevação do nível médio do mar quando as ondas se aproximam de águas rasas**. Os efeitos de fricção das ondas no fundo do mar e o incremento de altura das ondas junto a pouca profundidade, faz com que o nível médio de repouso do mar fique um pouco acima de seu nível médio em águas profundas.

Este efeito passa despercebido pelo observador comum e, provavelmente, pelo engenheiro que não tem formação em hidráulica marítima, podendo ocorrer até mesmo um galgamento das cristas das ondas em estruturas portuárias ou costeiras que tenham sido projetadas sem que se tenha levado em conta este fenômeno. A equação da **sobrelevação de nível junto a pouca profundidade** é:

$$\xi_M = \frac{\pi^2 H^2}{2gT^2}\left[1 + \frac{1{,}5}{\text{senh}\left(\dfrac{2\pi d}{L}\right)}\right]$$

Aplicando-se com os dados disponíveis para d = 5m:

$$\xi_M = \frac{\pi^2 \times 11{,}76^2}{2 \times 9{,}81 \times 11{,}06^2}\left[1 + \frac{1{,}5}{senh\left(\dfrac{2\times\pi\times 5}{75{,}3}\right)}\right] = 2{,}55m$$

Ou seja, o *set up* (estabelecimento) em relação ao nível médio em repouso do mar será de 2,55m !

A cota (aproximada) de alcance em d = 5m será:

Cota = nível de repouso (cota =0,00 m) + set up (2,55m) + amplitude da onda (11,76/2) = 0,00 + 2,55 + 5,88 = 8,43 m, aproximadamente (o cálculo correto de set up é bem mais complexo e faz parte do escopo da disciplina de Engenharia Costeira)

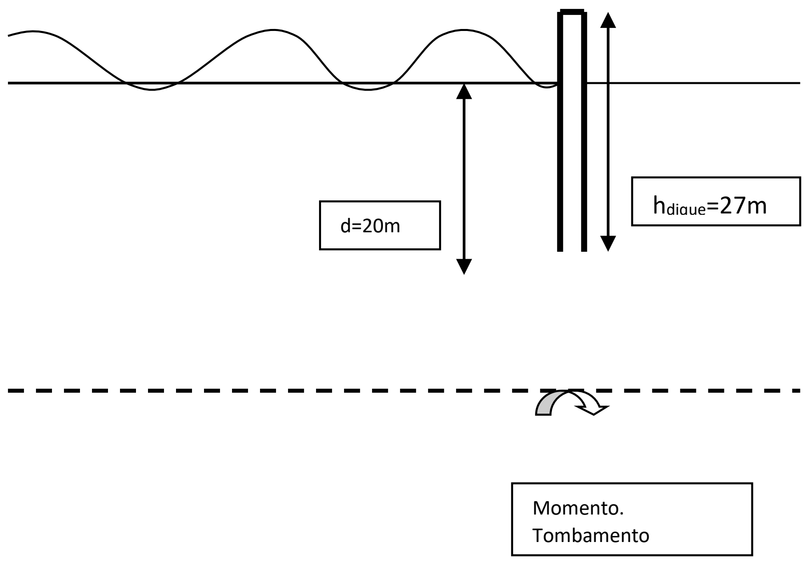
Como a cota da plataforma do ancoradouro é a cota + 3,00m, e a cota aproximada de atingimento da água na profundidade d = 5m é 8,43, então haverá uma lâmina de água da onda passando sobre a plataforma do ancoradouro com 8,43 – 3 = 5,43 m.

Isto significa que, as casas de pescadores que ficam situadas entre as cota + 5,00 m e a cota +9,00 m serão arrasadas pela onda resultante.

Exercício n° 2: Ondas estacionárias – Clapotis:

Suponha que uma onda com as seguintes características em águas profundas atinja a parede vertical de um dique de 27m de altura encravado numa profundidade de 20 m, em mar aberto. Determine qual seria o momento máximo de tombamento no pé do dique para efeito de dimensionamento.

H_0 = 4,90 m ; T = 8 seg



Solução:

$C_0 = gT/2\pi$ $C_0 = 9,81 \times 8/(2\pi) = 12,49$ m/s $L_o = C_0 \times T$ $L_0 = 12,49 \times 8 = 99,92$m

para d=20 m $L/L_0 = \tanh(2\pi d/L)$

para L = 88m 0,880 $\neq$ 0,891

para L = 88,8 m 0,888 = 0,888 (coincidência apenas !) Logo, $L_{d=20m}$ = 88,8m

$C_{20m} = C_0 \times \tanh(2\pi d/L) = 12,49$ m/s $\times\ 0,888 = 11,09$ m/s

$K = 2\pi/L \rightarrow K = 2\pi/88,8 = 0,07075$ $n = 0,5[1 + 2Kd/(\mathrm{senh}\ 2Kd)]$

n = 0,5 {1+[2×0,07075×20/senh(2×0,07075×20)]} = 0,670

Como o dique está faceando o mar aberto, logo a relação entre a largura das equipotenciais dada por $b_0/b = 1$ pois $b_0 = b$ em mar aberto.

A altura da onda em d = 20 m será:

$H/H_0 = [\,0,5 \times 1/n \times C_0/C \times b_0/b]^{1/2} = [\,0,5 \times 1/0,670 \times 1/0,888 \times 1]^{1/2} = 0,916$

Logo $H = 0,916 \times H_0 = 0,916 \times 4,90$ m = 4,50 m   **H_{20m} = 4,50 m**

Calculando o diferencial de pressão Δp:

$$\Delta p = \frac{H}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} = \frac{4,50}{\cosh\left(\frac{2\pi \times 20}{88,8}\right)} = 2,06m$$

Calculando o diferencial de altura Δh em relação ao nível do repouso:

$$\Delta h = \frac{\pi H^2}{L}\coth\left(\frac{2\pi d}{L}\right) = \frac{\pi \times 4,5^2}{88,8}\coth\left(\frac{2\pi \times 20}{88,8}\right) = 0,806m$$

Compondo o Diagrama de **SAINFLOU**:

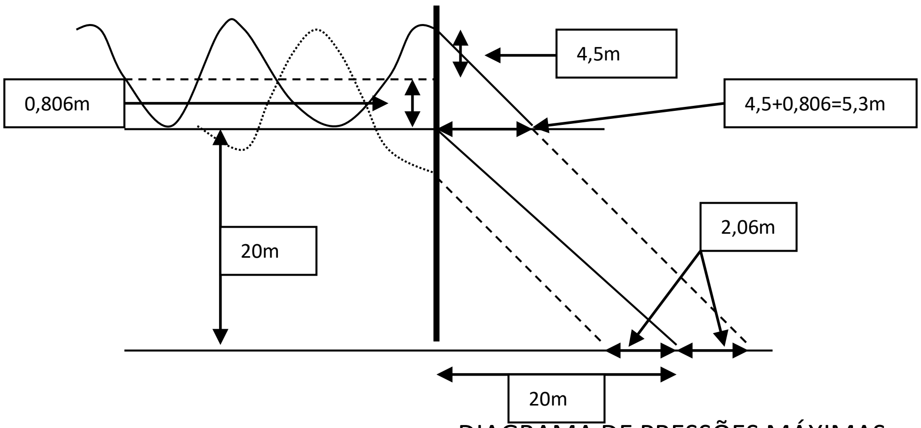
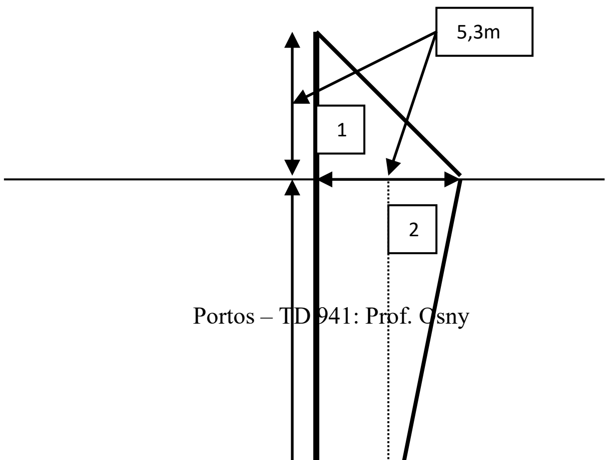
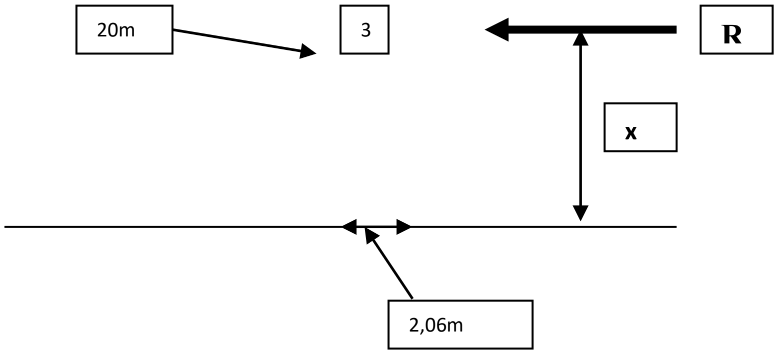


DIAGRAMA DE PRESSÕES MÁXIMAS





As pressões resultantes, descontada a pressão hidrostática que equilibra as mesmas de um lado e do outro do dique, resulta no diagrama acima equivalendo às pressões resultantes somente da ação da crista da onda clapotis atuando sobre a parede do dique. O diagrama implica numa força resultante **R** aplicada a uma distância **x** do pé do dique provocando o momento de tombamento máximo $\mathbf{M_t}$.

A figura do diagrama foi dividida em três figuras elementares 1,2 e 3 para permitir o cálculo da força resultante R e do momento de tombamento M_t.

Por considerações geométricas e de mecânica geral, tem-se que:

$\mathbf{R}=A_{total} \times \gamma_{água}$ considerando-se aqui que a água do mar tem um peso específico γ = 1,034 tf/m^3 ou 1034 kgf/m^3

As resultantes individuais são: $R_1 = A_1 \times \gamma$ $R_2 = A_2 \times \gamma$ $R_3 = A_3 \times \gamma$

O ponto de aplicação do momento resultante pode ser determinado por:

$\mathbf{R} \times \mathbf{x} = R_1 \times \mathbf{x_1} + R_2 \times \mathbf{x_2} + R_3 \times \mathbf{x_3}$

Se dividirmos tudo pó $\gamma_{água}$ fica simplesmente:

$$x = \frac{A_1 \times x_1 + A_2 \times x_2 + A_3 \times x_3}{A_{total}}$$

$A_1 = 5,3 \times 5,3 / 2 = 14,04$ m^2

$x_1 = 20 + 5,3/3 = 21,76$m

$A_2 = (5,3 – 2,06) \times 20/2 = 32,40$ m^2

$x_2 = 2/3 \times 20 = 13,33$m

$A_3 = 2,06\times 20 = 41,20$m^2

$x_3 = 20/2 = 10$m

$A_{total} = 14,04+32,40+41,20 = 87,64$ m^2

R = $A_{total} \times \gamma_{água}$ = 87,64 m² × 1,034 tf/m³ = 90,61 tf/m linear de parede de dique

x = [14,04 × 21,76 + 32,40×13,33+ 41,20× 10] / 87,64 = 13,11 m

E o momento de tombamento máximo será:

M_t = 90,61 tf/m × 13,11 m = 1.188 tf×m/ m linear de parede de dique

Exemplo n° 3:

Para uma onda progressiva semelhante à do Exemplo n° 1 – Nota de Aula 5 – Equações Fundamentais das Ondas Progressivas, que tinha um período de 6,5 seg e uma altura em águas profundas de 4m, incidindo sobre uma zona costeira que tinha uma declividade de 5%, com contornos batimétricos retos e paralelos à linha da costa, em mar aberto, determine:

a) A profundidade possível de ocorrer arrebentação da onda empregando o critério de McCowan;

b) A distância contada da linha da costa para a zona do início da arrebentação;

c) A altura provável de quebra da onda durante a arrebentação.

SOLUÇÃO:

O critério de McCowan fixa o valor de k = 0,78 para a relação $H_b = k\, d_b$:

Como a onda quebrará numa zona de costa, em mar aberto, com contornos batimétricos retos e paralelos, o ângulo θ_0 será 0°, e portanto, $\cos\theta_0 = 1$. Obs: θ_0 = ângulo formado pela tangente à ortogonal da onda (sentido da propagação) com a linha normal à praia numa profundidade de águas profundas.

Lembrando que $K_R = (b_0/b)^{1/2} = (\cos\theta_0/\cos\theta)^{1/2}$

A equação da profundidade de quebra é:

$$d_b = \frac{1}{g^{1/5} k^{4/5}} \left[\frac{H_0^2 C_0 \cos\theta_0}{2} \right]^{2/5}$$

$$d_b = \frac{1}{9{,}81^{1/5} (0{,}78)^{4/5}} \left[\frac{4^2 \times 10{,}148 \times 1}{2} \right]^{2/5} = 4{,}485m$$ **d_b = 4,49 m**

b) A distância da praia para a linha de arrebentação:

$x_b = \frac{d_b}{m} = \frac{4{,}485}{0{,}05} = 89{,}70m$ Logo, a zona de arrebentação começa em **x_b = 89,70m**

d) A altura da onda na quebra é dada por:

$H_b = k\, d_b = 0{,}78 \times 4{,}485 = 3{,}498m$ Logo, **H_b = 3,5 m**

ATENÇÃO: O critério de McCowan (k=0,78) não é absoluto e pode conduzir a erros apreciáveis, em virtude da teoria das ondas progressivas não ter 100% de validade na zona de arrebentação. O critério de fato mais correto para que ocorra a quebra da onda, é encontrar uma profundidade em que a velocidade horizontal das partículas **u** coincida com a celeridade da onda **C** nesta profundidade.

Isto só é possível através de simulação computacional pois só existem duas equações de solução para três variáveis (d_b; H_b e L_b), ou seja, somente conhecendo-se uma relação correta entre H_b/d_b ou L_b/d_b seria possível se obter uma solução analítica explícita.

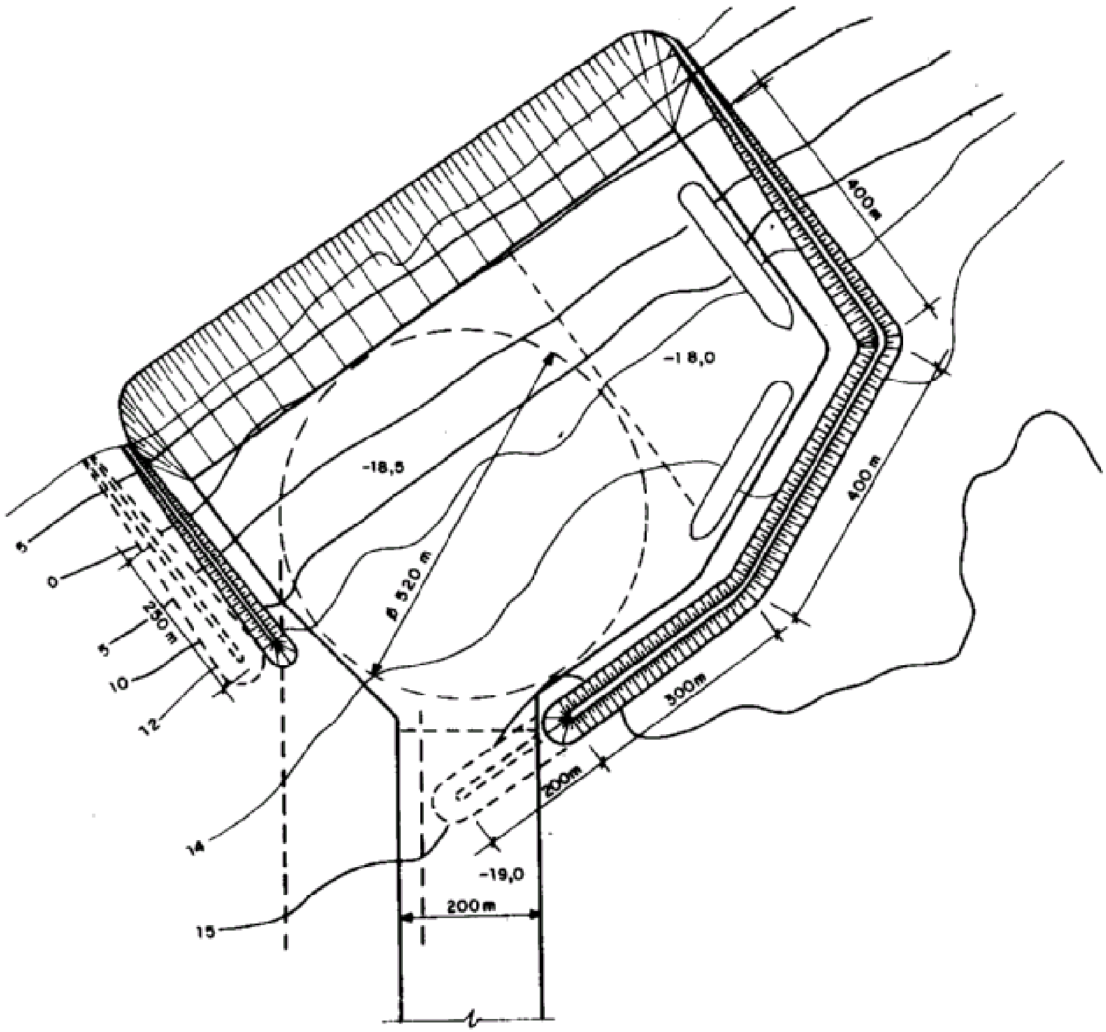
Simulações computacionais indicaram que a altura correta de quebra da onda é com $H_b \cong$ 3,9 m numa profundidade aproximada de 2,8 m. Mas isto seria relativo à **queda do tubo de arrebentação da onda na praia.**

O critério de McCowan que resultou neste caso um H_b = 3,5 m e d_b = 4,49 m assinala a posição onde começa a se formar o tubo de arrebentação que se propaga por 89,7 m até atingir a praia. Ele continua sendo importante para definir a priori para a engenharia de hidráulica marítima, onde começa a ocorrer o processo de formação do tubo na zona de arrebentação.

Exercício n° 4: A bacia portuária da figura abaixo é atingida por ondas provocadas por um *furacão* que se formou numa latitude de 30° no Atlântico Norte. Imagens de satélite revelaram as seguintes características meteorológicas deste furacão:

- Latitude da formação: 30° N
- Raio de Vento Máximo: R = 90 Km
- Pressão Atmosférica no Olho do Furacão: 740 mmHg
- Velocidade de Avanço do Furacão: 90 Km/hora

(Fonte: Mason,J, 1984)



Como se pode observar na figura, a bacia portuária é protegida por molhes, tendo um canal de acesso de 200 m de largura e uma profundidade média é –18,5 m, pois a profundidade é de –19 m na entrada, igual a -18,5 m dentro da bacia de evolução e, de –18m na zona de atracação, resultando numa média de –18,5 m de profundidade.

O comprimento da bacia portuária é de aproximadamente 920m, pois o diâmetro da bacia de evolução é 520m e tem mais 400 m entre o final da bacia de evolução e o cais oposto de atracação. (L_B = 920m).

A largura da bacia portuária é aproximadamente 460 m, pois o diâmetro da bacia de evolução é 520 m e a largura junto ao cais oposto é de 400m, resultando numa média de (520+400)/2 = 460m. (L_A= 460m).

Supondo que o Serviço Meteorológico alertou as autoridades portuárias sobre a vinda do furacão com direção incidente prevista para atingir diretamente sobre a abertura da bacia portuária. Então, como engenheiro portuário, você foi convocado para fazer uma rápida análise do que deverá se passar quando o furacão atingir o porto. Medidas cautelares deverão ser tomadas com base nas seguintes opções:

a) Continuar a operar o porto normalmente no caso dos molhes oferecerem a proteção adequada para a operação portuária. Os molhes foram dimensionados para proteger o porto contra a ação de ondas incidentes de até 8,00 m de altura junto ao porto;

b) As pedras dos molhes poderão suportar momentos de arraste de até 10.000 tf×m, acima disso, o porto deve ser imediatamente fechado e evacuado;

c) A conformação geométrica da bacia portuária foi feita para se evitar condições de ressonância dentro da mesma, no caso de ondas normais, do tipo swell, em condições de ressaca no mar. Entretanto, a condição de ressonância não foi estimada para ondas anormais do tipo daquela provocada por um furacão. Verifique a condição de ressonância e sugira as providências necessárias.

d) As paredes dos molhes, tal como todos os molhes artificiais, são inclinadas em relação à horizontal, promovendo uma *reflexão parcial* das ondas incidentes. O ângulo β de inclinação com a horizontal é de 25°. Nesse caso estime qual seria a altura da onda refletida no molhe e sua possível interferência com a onda incidente provocada pelo furacão;

e) Haverá necessariamente *difração* das ondas incidentes na abertura de entrada da bacia portuária promovendo uma variação de altura de ondas dentro da mesma. Adotando o diagrama de difração da página 7 da Nota de Aula n° 7, cujo ângulo de incidência é aproximadamente o mesmo que ocorrerá na entrada da onda provocada pelo furacão na bacia portuária, calcule quais seriam, aproximadamente, as alturas das ondas atingindo a *popa* de cada um dos navios atracados mostrados na figura.

Redija um relatório técnico para as autoridades portuárias, explicitando suas conclusões e recomendações como engenheiro portuário.

SOLUÇÃO:

A primeira tarefa a fazer é determinar as características das ondas provocadas pelo furacão em águas profundas, determinando sua altura H_0 e período T.

Os valores dados implicam em:

Latitude: 30° N

Fator de Coriolis f = 0,262

Pressão atmosférica padrão Pn = 760 mmHg (sempre !)

Pressão atmosférica no centro do furacão: P_0 = 740 mmHg

Raio de vento máximo: R = 90 Km

Fator alfa: α = 1,0

Velocidade de avanço do furacão: V_F = 90 Km/hora = 90/3,6 = 25 m/s

Daí calcula-se U_{max}:

$$U_{\max} = 0{,}447\left[14{,}5\left(P_n - P_o\right)^{0{,}5} - R\left(0{,}31f\right)\right]$$

$U_{max} = 0{,}447\times[\ 14{,}5\times(760-740)^{0{,}5} - 90\times(0{,}31\times0{,}262)] = 25{,}7186$ m/s

U_R será então dado por:

$U_R = 0{,}865\ U_{max} + 0{,}5\ V_F$

$U_R = 0{,}865 \times 25{,}7186 + 0{,}5 \times 25 = 34{,}7466$ m/s

$\Delta P = 760 - 740 = 20$ mmHg

Calcula-se agora H_0 :

$$H_0 = 5{,}03e^{\left(\frac{R\times\Delta P}{4700}\right)}\left[1+\frac{0{,}29\alpha V_F}{\sqrt{U_R}}\right]$$

$$H_0 = 5{,}03\times e^{\left(\frac{90\times20}{4700}\right)}\left[1+\frac{0{,}29\times1{,}0\times25}{\sqrt{34{,}7466}}\right] = 16{,}45074m$$

H_0 = 16,45 m

Calcula-se agora T:

$$T = 8{,}6\, e^{\left(\frac{R \times \Delta P}{9400}\right)} \left[1 + \frac{0{,}145 \alpha V_F}{\sqrt{U_R}} \right]$$

$$T = 8{,}6 \times e^{\left(\frac{90 \times 20}{9400}\right)} \left[1 + \frac{0{,}145 \times 1{,}0 \times 25}{\sqrt{34{,}7466}} \right] = 16{,}8199 seg$$ **T=16,819 seg**

A segunda tarefa é determinar as características da onda provocada pelo furacão na profundidade da bacia portuária ($h_{médio}$ = -18,5 m ou d = 18,5m)

$C_0 = gT/(2\pi)$ $C_0 = 9{,}81 \times 16{,}819 / 2\pi = 26{,}2596$ m/s

$L_0 = C_0 \times T$ $L_0 = 26{,}2596 \times 16{,}819 = 441{,}66$ m   **L_0 = 441,66 m**

$\sigma = 2\pi/T$ $\sigma = 2\pi/16{,}819 = 0{,}373$ /seg

$$\frac{L}{L_0} = \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \qquad \frac{L_{d=18,5}}{L_0} = \tanh\left(\frac{2 \times \pi \times 18{,}5}{L_{d=18,5}}\right)$$

Daí, após n suadas tentativas para quem não tem calculadora programável para a achar o valor correto de $L_{d=18,5}$ encontra-se que:

$L_{d=18,5}$ = 216,5 m   pois 0,490 = 0,490 ou seja, $\tanh(2\pi d/L) = 0{,}490$

$K = 2\pi/L$ $K = 2\pi/216{,}5 = 0{,}02902$

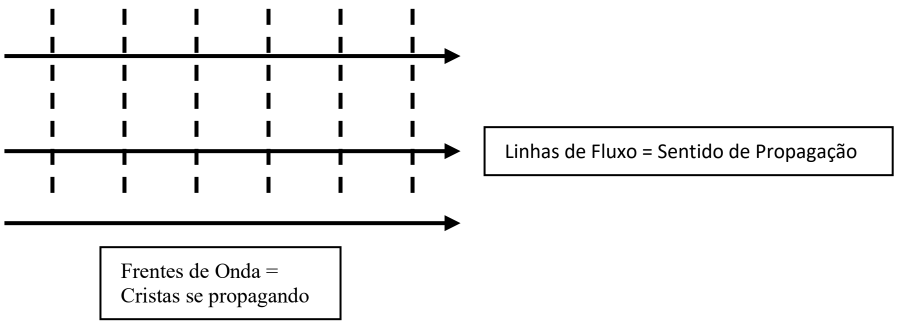
$$n = 0{,}5\left(1 + \frac{2Kd}{\mathrm{senh}(2Kd)}\right) = 0{,}5\left(1 + \frac{2 \times 0{,}02902 \times 18{,}5}{\mathrm{senh}(2 \times 0{,}02902 \times 18{,}5)}\right) = 0{,}915$$

$$\frac{C}{C_0} = \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$$ $C = C_0 \times 0{,}490 = 26{,}2596 \times 0{,}490 = 12{,}867$ m/s

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{b_0}{b}} \bullet \sqrt{\frac{1}{2}\frac{1}{n}\frac{C_0}{C}}$$

Aqui agora tem uma questão fundamental que depende do conhecimento de hidráulica marítima: Qual será o valor de b_0 ?

Na Nota de Aula 4, foi visto que as ondas se propagam segundo REDES DE FLUXO tal como na figura abaixo transposta daquela nota de aula:



Logo, se em águas profundas as redes de fluxo deverão manter uma rede *aproximadamente quadrada* em relação às frentes de onda e as linhas de fluxo e, considerando que o comprimento de onda em águas profundas é L_0 = 441,66 m, então b_0 terá de ter o mesmo valor, ou seja, em águas profundas $b_0 = L_0$ = 441,66 m.

Logo, a relação b_0/b na entrada da bacia portuária será dada por :

$$\frac{b_0}{b} = \frac{441{,}66}{200} = 2{,}2083$$

Aplicando-se a equação da altura da onda para as condições dadas fica:

$H = H_0 \times 1{,}5692 = 16{,}45 \text{ m} \times 1{,}5692 = 25{,}8149$

H = 25,81 m na <u>bacia portuária</u> !

A velocidade orbital máxima será:

$$u_{\max} = \frac{agK}{\sigma}$$

$u_{max} = (25{,}81/2) \times 9{,}81 \times 0{,}02902 / 0{,}373 = 9{,}85$ m/s

Como $u_{max} < C$ (9,85 m/s < 12,867 m/s) a onda ainda está se propagando sem arrebentação quando entra na bacia portuária !

Entretanto as ondas que **atingirão o molhe**, não terão sua altura elevada pela relação $\frac{b_0}{b} = \frac{441{,}66}{200} = 2{,}2083$, pois as ondas atingirão o molhe na condição de **mar aberto**, logo a relação $b_0 / b = 1{,}00$.

A altura da **onda incidente sobre o molhe será dada por:**

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{b_0}{b}} \bullet \sqrt{\frac{1}{2}\frac{1}{n}\frac{C_0}{C}} \quad \text{ou} \quad \frac{H}{16{,}45} = \sqrt{1{,}00} \times \sqrt{\frac{1}{2} \times \frac{1}{0{,}915} \times \frac{1}{0{,}490}}$$

$H = 1{,}05603 \times H_0 = 1{,}056 \times 16{,}45 = 17{,}37$ m

<u>**H_{molhe} = 17,37 m**</u>

Respondendo então a indagação do **Item (a),** como os molhes foram projetados para proteger a bacia portuária para ondas com altura até 8,00m e as ondas incidentes terão altura de 17,37 m, então os molhes não protegerão adequadamente a bacia portuária, sendo ***galgados*** pelas ondas.

Para responder ao **Item (b)**, devemos calcular a **energia total para 1 comprimento de onda** para se ter o momento máximo provocado pelas ondas incidentes sobre o molhe.

$E = \overline{E}L = \frac{\rho g H^2 L}{8}$ (por unidade de comprimento de crista de onda)

Unidade: $N/m^3 \times m^2 \times m$ = N / unidade de comprimento de crista

assim, tendo o comprimento de onda L em m, fica: N × m = Joule

Considerando $\rho_{\text{água do mar}} = 1034\ kg/m^3$:

Dentro da bacia portuária a energia que será transportada pelas ondas será:

$$E = \frac{1034 \times 9{,}81 \times 25{,}81^2 \times 216{,}5}{8} = 182.866.212{,}1 N \times m$$

Como 1 tonelada-força é igual a $9{,}81 \times 10^3$ N então:

E = 182.866.212,1 / 9,81 × 10^3 = 18.640,79 tf×m **E_{bacia} = 18.641 tf×m**

Atingindo o molhe a energia que será transportada pelas ondas será:

$$E = \frac{1034 \times 9{,}81 \times 17{,}37^2 \times 216{,}5}{8} = 82.824.170{,}83 N \times m$$

Ou então E = 82.824.170,83 / 9,81×10^3 = 8.442,83 tf×m **E_{molhe} = 8.442,83 tf×m**

Como os molhes foram projetados para suportar momentos de até 10.000 tf×m, então certamente não haverá possibilidade de colapso de sua estrutura e os molhes permanecerão praticamente estáveis !

Respondendo ao Item (c), a condição de ressonância dentro da bacia portuária será avaliada comparando-se o *período fundamental de oscilação da bacia portuária* com o período das ondas incidentes provocadas pelo furacão.

Como L_B = 920 m não é muito maior do que L_A = 460 m, então emprega-se a equação:

$$T = \frac{2}{\sqrt{gd}}\left[\left(\frac{1}{L_A}\right)^2 + \left(\frac{1}{L_B}\right)^2\right]^{-1/2}$$ ou

$$T = \frac{2}{\sqrt{9{,}81 \times 18{,}5}}\left[\left(\frac{1}{460}\right)^2 + \left(\frac{1}{920}\right)^2\right]^{-1/2} = 61{,}08 seg$$ ou

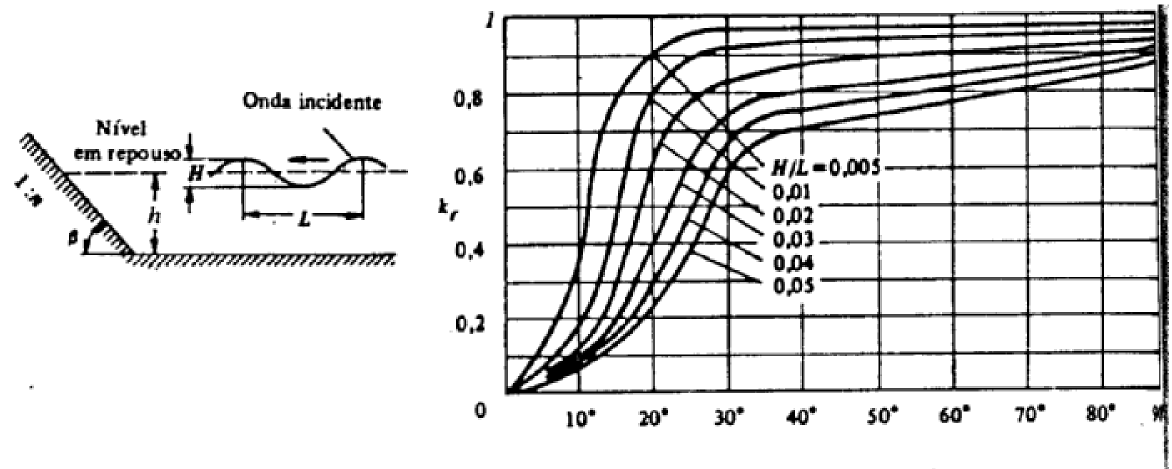
T_{bacia} = 61,08 seg

Logo, como T das ondas do furacão é 16,81 seg, então **não haverá possibilidade de agitação por ressonância dentro da bacia portuária !**

Respondendo ao Item (d), como o ângulo de inclinação do molhe com a horizontal $\beta = 25°$, empregando o gráfico da página 3 da Nota de Aula 7, em função de:

H/L = 17,37 / 216,5 = 0,08

(Fonte: Mason, J., 1984)



Coeficiente de reflexão k_r, em função de β

Para β = 25° e H/L = 0,08, o valor de k_r tirado do gráfico, adotando a última curva disponível que é H/L = 0,05, logo k_r = 0,38 aproximadamente.

Daí: $k_r = \dfrac{H_r}{H_i}$ ou $H_r = k_r \times H_i$ $\qquad H_r = 0{,}38 \times 17{,}37$ m = 6,60 m

A altura da onda refletida será **H_r = 6,60 m**, a qual interferirá com a onda incidente em um complexo esquema de interferência que só poderá ser avaliado através de modelos computacionais de alta capacidade de resolução como o MIKE21 do Danish Hydraulic Institute ou programa similar.

Respondendo ao Item (e), a difração deverá ser avaliada pela superposição visual do diagrama de difração dado pela figura da página 7 da Nota de Aula 7 com a figura da bacia portuária de interesse.

Note que no gráfico do diagrama de difração, deve-se entrar com a relação **raio de interesse / comprimento de onda** para se obter as alturas de onda dentro da bacia portuária de interesse.

O comprimento de onda que devemos empregar é 216,5 m, que é o comprimento de onda dentro da bacia portuária.

O raio de interesse vai variar de acordo com a distância radial para a qual desejamos calcular a altura da onda em relação ao ponto zero de contacto da onda com a parede do quebra-mar ou molhe na entrada da bacia portuária.

Para se determinar a altura da onda difratada na entrada da bacia portuária que vai atingir a popa do navio situado no canto nordeste da bacia portuária, ou seja, do navio que fica com a popa para o lado do canto que forma um ângulo de 90° entre os molhes da bacia, a distância estimada desde a entrada até este ponto de interesse é aproximadamente o comprimento da diagonal do retângulo aproximado formado pela bacia portuária, cujos lados seriam L_1 = 400 m + 300 m = 700 m e L_2 = 520 m.

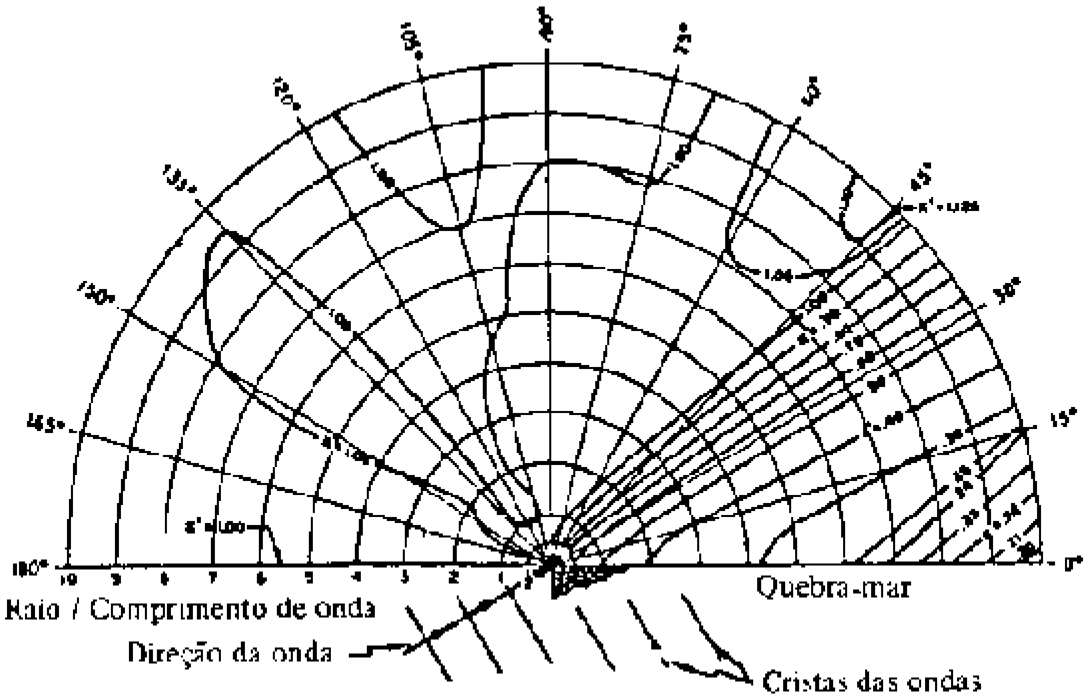
Diagonal = hipotenusa = $L_h = (700^2 + 520^2)^{0,5}$ = 872 m

A relação raio / comprimento de onda será: 872 / 216,5 = 4,02 ou apenas 4.

Superpondo a quina da entrada do molhe da figura da bacia portuária com a quina do quebra-mar mostrado na figura do gráfico de difração da nota de aula 7, vê-se que o ângulo formado até a posição desejada do primeiro navio é aproximadamente 38°. Usando um R/L = 4, a relação da altura difratada seria aproximadamente 0,70, daí:

$k_d = \frac{H_d}{H}$ k_d = 0,70 Logo, $H_d = 0,70 \times 25,81$ m = 18,06 m

Em outras palavras, este navio teria a popa atingida por uma onda de 18 m!



(Fonte: Mason, J. 1984)

REFERÊNCIAS

MASON. J.. (1984). **Obras Portuárias.** Editora Campus. Portobrás. 282p. Rio de Janeiro.RJ

DEAN. R.G., DALRYMPLE, R.A. (1994) **Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists**. World Scientific. New York. 353p

USACE. (1996) **Shore Protection Manual**. Volume I e II. Vicksburg. 1996.

OBS: Esta Nota de Aula 06 encerra a parte de Hidráulica Marítima do Curso. Como ela é muito extensa e complexa, o professor fará alguns vídeos explicativos sobre aspectos importantes da Nota de Aula.

Para esta Nota de Aula 06 será lançado amanhã no Solar o NTF-6 que VALERÁ **3,0 PONTOS NA MÉDIA**, e terá prazo de entrega de 15 dias.