



T08

## ANÁLISE DA CINEMÁTICA DE ONDAS OCEÂNICAS COM O AUMENTO DA PROFUNDIDADE E SUA INFLUÊNCIA EM LINHAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

*Amanda S. Ferreira<sup>1</sup>, Heleno P. Bezerra Neto<sup>2</sup>*

**RESUMO:** O objetivo do presente estudo passa por analisar o efeito da profundidade nas velocidades e acelerações horizontais e verticais das ondas oceânicas em linhas de produção de sistemas petrolíferos utilizando a Teoria Linear de Airy no estudo de ondas regulares, tendo como finalidade comprovar, através de cálculos feitos no Excel, que a partir da profundidade correspondente à metade do comprimento da onda, as velocidades e acelerações não são mais significativas. Nestes casos de análise, a altura da onda é pequena em comparação ao seu comprimento. Para tal, foram testados dados oceanográficos de amplitude média de 0.75 metros (H), período de 9.54 segundos (T) e lâminas d'água (d) de 200, 250, 300, 400, 500, 600, 1000 e 2000 metros, a fim de calcular os respectivos comprimentos de onda ( $\lambda$ ) e realizar o cálculo relativo entre os parâmetros cinemáticos com variadas profundidades, analisando seu comportamento. Verifica-se que os valores em módulo das velocidades e acelerações satisfazem à proposta inicial, tendendo a zero e descrevendo um comportamento permanentemente decrescente, tornando-se, dessa forma, irrelevantes a partir de valores de profundidade próximos à metade do comprimento de onda.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Variação de velocidade e aceleração; profundidade limite; Teoria de Airy.*

### 1. INTRODUÇÃO

As ondas oceânicas são irregulares e são aleatórias em forma, altura, comprimento e velocidade de propagação (DNV, 2017). Pode-se descrever as ondas irregulares como o somatório de várias ondas regulares. Segundo DNV (2017), as ondas regulares se propagam com forma permanente.

Uma maneira intuitiva de compreender as consequências decorrentes da propagação de ondas oceânicas em linhas de produção de petróleo é a análise e o estudo cinemático destes fenômenos. Em mar aberto, conforme a profundidade aumenta, a influência da propagação das ondas torna-se cada vez mais irrelevante, deixando, desse modo, de haver considerável interação destas com a topografia submersa bem como em estruturas de produção mais próximas ao leito.

Sob a ótica da Teoria de Airy, pode-se utilizar de suas formulações para calcular os parâmetros necessários para observação do decréscimo em módulo da aceleração e da velocidade de maneira significativa a partir de certa profundidade até o ponto no qual estes valores serão nulos ou muito próximos a zero.

---

<sup>1</sup> Afiliação: Universidade Federal de Alagoas – Campus A.C. Simões  
Email: amandasouza.ufal@gmail.com

<sup>2</sup> Afiliação: Universidade Federal de Alagoas – Campus A.C. Simões  
Email: helenopontes@lccv.ufal.br



Em linhas de produção, a excessiva ação de ondas, bem como seu efeito, gera instabilidades imediatas e, em longo prazo, fadiga, com conseqüente desgaste do material. Isto ocasiona inevitavelmente a diminuição do tempo de vida útil da estrutura e perdas financeiras, o que é altamente indesejável, tendo em vista as dimensões financeiras na exploração offshore, onde muitos materiais são onerosos e os custos de sonda e exploração são elevados. A maioria das recentes instalações de petróleo estão sendo realizadas em águas profundas a ultraprofundas.

Desse modo, faz-se necessário a compreensão da influência da cinemática da onda nestas profundidades. Sendo assim, este trabalho objetiva verificar que para estes casos, a partir de profundidades correspondentes à metade do comprimento de onda analisada, as considerações de velocidade e aceleração podem ser desprezadas, reduzindo assim, de maneira significativa, para todos os futuros cálculos e estudos na área, o tempo computacional.

### 1.1 Referencial Teórico

A teoria linear de Airy é considerada a mais simples de todas, tratando-se de uma teoria na qual se considera pequena a altura de onda quando comparada à sua profundidade. A cinemática da onda é influenciada de acordo com o comprimento da lâmina d'água, apresentando distintas condições para águas rasas e águas profundas. Quanto mais raso for, maior é a influência da topografia na superfície, desse modo as ondas vão mudando de direção à medida que vão interagindo com o solo do oceano podendo se concentrar em alguns locais ou divergir. Segundo Haritos (2007), esta influência é referida como o "efeito de cardume", que pressupõe importância significativa para o campo da engenharia offshore. Para as chamadas condições de águas profundas, onde a profundidade da água excede a metade do comprimento de onda, a influência topográfica do fundo do oceano na cinemática das partículas de água é considerada desprezível, removendo uma potencial complicação para a descrição da hidrodinâmica de estruturas offshore em ambientes aquáticos.

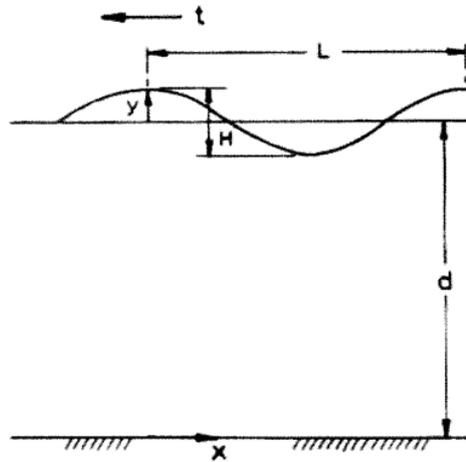
As linhas de produção instaladas no solo marinho para a exploração e produção de petróleo estão sujeitas às ondas oceânicas, ventos e corrente. Terremotos e ondas de tsunami também podem ocorrer em certas partes do mundo. Para a manutenção da integridade destas estruturas, os efeitos destes ambientes nas linhas de produção devem ser avaliados e deve-se conhecer até que profundidade tais carregamentos ambientais são de fato relevantes do ponto de vista estrutural. A teoria linear de Airy assume que o fluido é homogêneo, incompressível (densidade constante) e irrotacional, permitindo a existência do potencial de velocidade (MEIRELES et al. 2007). Assim, aplicam-se as formulações apresentadas na DNVGL-RP-C205/2017.

## 2. METODOLOGIA

A figura 1 descreve o movimento de partículas fluidas da onda. Para o cálculo da cinemática da onda, considera-se que o assoalho é plano, de modo que a profundidade da água seja constante em todos os pontos ao longo da direção x (CHAKRABARTI, 2005).



Figura 1 – Movimento bidimensional de onda em superfície plana



Fonte: Chakrabarti, 2005.

sendo:

- $t \rightarrow$  tempo (s)
- $L \rightarrow$  comprimento de onda (m)
- $H \rightarrow$  altura da onda (m)
- $y \rightarrow$  amplitude (m)
- $x \rightarrow$  projeção horizontal (m)
- $d \rightarrow$  profundidade (m)

A fim de iniciar a análise cinemática, utilizam-se as formulações apresentadas na DNVGL-RP-C205/2007. Para o cálculo do comprimento de onda, utiliza-se a equação 01

$$\lambda = T\sqrt{gd} \cdot \left( \frac{f(\varpi)}{1 + \varpi \cdot f(\varpi)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Equação 01})$$

sendo:

- $\lambda \rightarrow$  comprimento de onda (m);
- $T \rightarrow$  período médio (s);
- $g \rightarrow$  aceleração gravitacional ( $m/s^2$ );
- $d \rightarrow$  profundidade (m).

A função  $f(\varpi)$  é definida por:

$$f(\varpi) = 1 + \sum_{n=1}^4 \alpha_n \varpi^n, \quad (\text{Equação 02})$$

e

$$\varpi = \left( \frac{4\pi^2 d}{gT^2} \right) \quad (\text{Equação 03})$$



sendo:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &\rightarrow 0.666; \\ \alpha_2 &\rightarrow 0.445; \\ \alpha_3 &\rightarrow -0.105; \\ \alpha_4 &\rightarrow 0.272.\end{aligned}$$

Para determinação dos parâmetros característicos da onda, número de onda, velocidade de fase e frequência angular, utilizam-se as expressões dadas por

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (\text{Equação 04})$$

$$c = \frac{\omega}{k}, \quad (\text{Equação 05})$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (\text{Equação 06})$$

sendo:

$$\begin{aligned}k &\rightarrow \text{número de onda } (m^{-1}); \\ c &\rightarrow \text{velocidade de fase } (m/s); \\ \omega &\rightarrow \text{frequência angular } (rad/s).\end{aligned}$$

Tendo conhecimento dos parâmetros característicos de onda, objetivando agora mensurar velocidades e acelerações horizontais e verticais, com base na teoria linear de ondas para profundidade finita, calculam-se estes valores por

$$u(x, z, t) = \frac{gkH}{2\omega} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cos[k(x - ct)], \quad (\text{Equação 07})$$

$$u'(x, z, t) = \frac{gkH}{2} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \sin[k(x - ct)], \quad (\text{Equação 08})$$

$$v(x, z, t) = \frac{gkH}{2\omega} \frac{\sinh k(z+d)}{\cosh kd} \sin[k(x - ct)], \quad (\text{Equação 09})$$

$$v'(x, z, t) = -\frac{gkH}{2} \frac{\sinh k(z+d)}{\cosh kd} \cos[k(x - ct)], \quad (\text{Equação 10})$$

sendo:

$$\begin{aligned}u &\rightarrow \text{velocidade horizontal } (m/s); \\ u' &\rightarrow \text{aceleração horizontal } (m/s^2); \\ v &\rightarrow \text{velocidade vertical } (m/s); \\ v' &\rightarrow \text{aceleração vertical } (m/s^2); \\ x &\rightarrow \text{distância horizontal } (m); \\ z &\rightarrow \text{profundidade } (m); \\ H &\rightarrow \text{altura da onda } (m).\end{aligned}$$

Considerando-se oito valores de lâmina d'água para testes, de forma a se obter oito valores diferentes de comprimento de onda e conseqüentemente oito valores de velocidade e aceleração para cada valor



de  $x$ ,  $z$  e  $t$  utilizados, desenvolveram-se os cálculos no Excel. Tendo em vista a influência sobre as linhas flexíveis e que elas são fixadas no leito marinho, calculam-se, portanto, a relação percentual das grandezas cinemáticas obtidas em superfície, ou seja, para  $z = 0$  e para o valor correspondente à metade da profundidade testada.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando a equação 01 e usando oito valores de lâmina d'água ( $d$ ) e um período ( $T$ ) de 9,54 segundos, obtêm-se os valores de comprimentos de onda. Os valores de lâmina d'água e os respectivos comprimentos de onda são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Comprimento de onda versus profundidade

	Lâmina d'água ( $d$ ), em metros							
	200	250	300	400	500	600	1000	2000
<b>Comprimento de onda (<math>\lambda</math>), em metros</b>	142,09	158,86	174,02	200,94	224,67	246,11	317,72	449,33

Fonte: Os autores (2018)

Quanto aos parâmetros característicos da onda, de acordo com a equação 06, vê-se que a frequência angular é dependente apenas do valor de  $T$ , sendo este fixo e igual a 9,54 segundos. A frequência angular, portanto, também não se altera e seu valor é de 0,6586. Como 8 valores de comprimento de onda foram gerados, calculam-se os respectivos números de onda e velocidades de fase (equações 4 e 5) conforme ilustrado na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros característicos

	Comprimento de onda ( $\lambda$ ), em metros							
	142,09	158,86	174,02	200,94	224,67	246,11	317,72	449,33
$k (m^{-1})$	0,044	0,039	0,036	0,031	0,027	0,025	0,019	0,013
$c (m/s)$	14,90	16,66	18,25	21,07	23,56	25,81	33,32	47,12

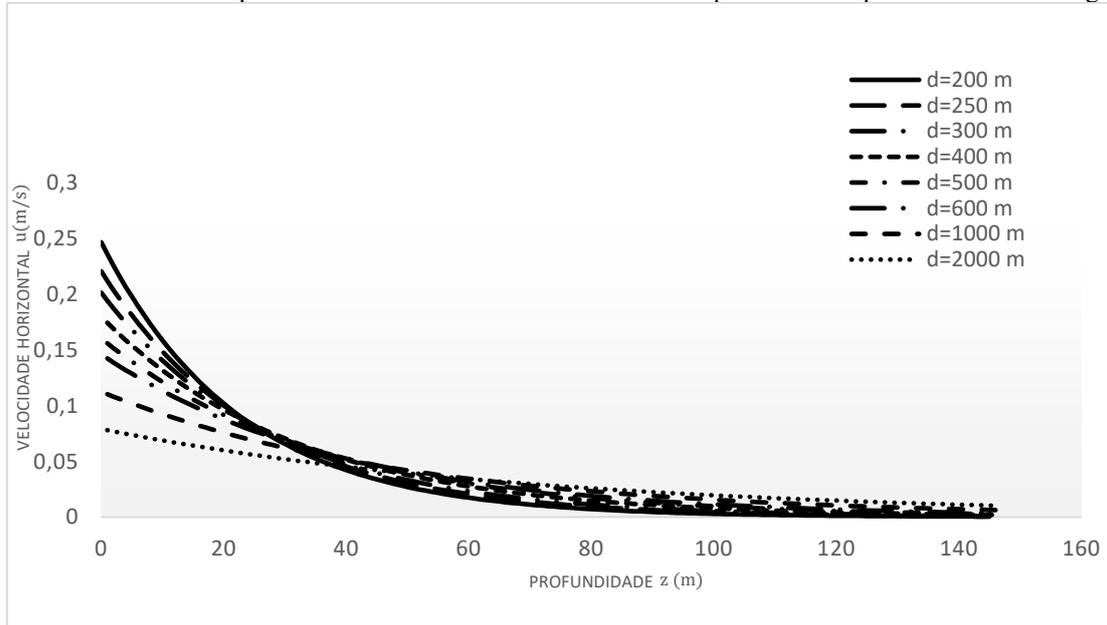
Fonte: Os autores (2018)

A importância da determinação dos parâmetros característicos da onda, bem como os dados cinemáticos, se deve à descoberta sobre a real influência destes em estruturas submersas, como as linhas de produção, importantes no setor petrolífero. As linhas de produção são dutos de coleta e escoamento empregados em todo sistema submarino, que tem por finalidade conduzir os fluidos produzidos pelo poço para as unidades de produção localizadas na superfície. Podem ser utilizadas para a interligação de uma unidade a outra ou para a exportação da produção para terra. Seu formato é tubular, com camadas de materiais metálicos e não metálicos, cada qual com uma função específica (PETROBRAS – FATOS E DADOS, 2018).

Com base na teoria linear de ondas para profundidade finita, utilizando as equações 05, 06, 07 e 08 para a realização do cálculo dos parâmetros cinemáticos, analisa-se, através dos gráficos presentes nas figuras 2 e 3, o decaimento progressivo, em módulo, da velocidade e aceleração conforme a profundidade aumenta, com tendência a zero.

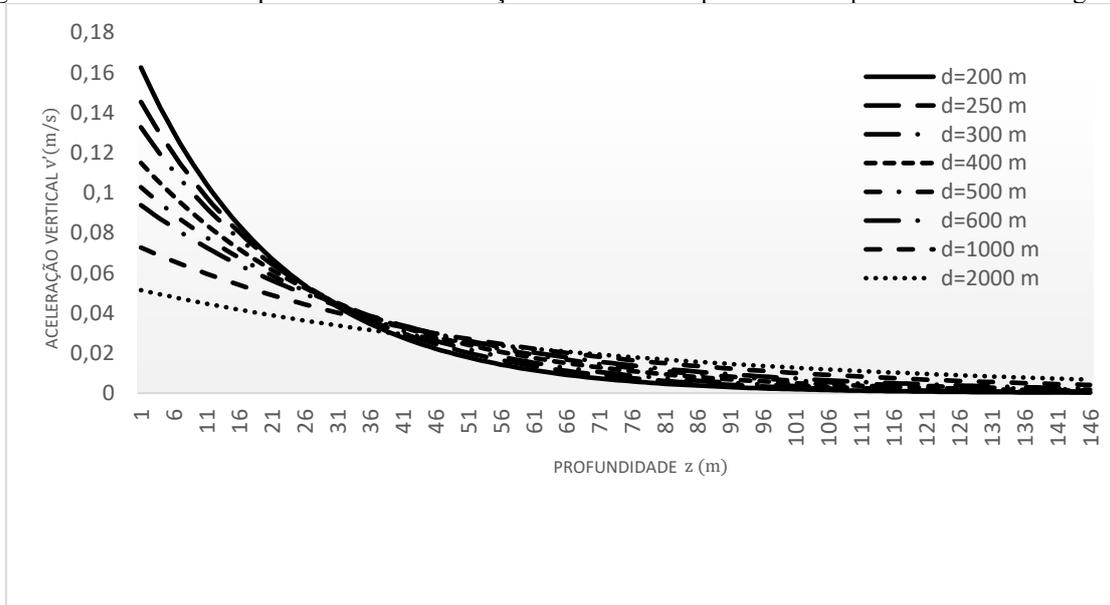


Figura 2 – Gráfico do comportamento da velocidade horizontal versus profundidade para cada lâmina d'água (d).



Fonte: Os autores (2018)

Figura 3 – Gráfico do comportamento da aceleração vertical versus profundidade para cada lâmina d'água (d).



Fonte: Os autores (2018)

Como resultado, observa-se que tanto os valores de velocidade quanto os de aceleração apresentam um decaimento progressivo, tornando-se desprezíveis a partir da profundidade correspondente à metade do comprimento de onda analisado. Tal resultado pode ser visto numericamente na tabela 3 onde são exibidos os valores dos parâmetros cinemáticos usando como exemplo a lâmina d'água de 600 metros.



Tabela 3 – Velocidade e aceleração relativas com a profundidade

Profundidade (m)	Velocidade horizontal (m/s)	Velocidade relativa (%)	Aceleração horizontal ( $m/s^2$ )	Aceleração relativa (%)
0	0,1424	100	0,0938	100,00
11	0,1076	75,52	0,7087	75,50
24	0,0772	54,20	0,0508	54,20
30	0,0662	46,50	0,0436	46,50
43	0,0475	33,37	0,0313	33,37
<b>d = 600m</b>	52	26,53	0,0260	26,53
	66	18,56	0,0174	18,56
	71	16,33	0,0153	16,33
	89	10,32	0,0096	10,32
	110	6,04	0,0056	6,04
	123	<b>4,33</b>	0,0040	<b>4,33</b>

Fonte: Os autores (2018)

Como visto na tabela 1, para uma lâmina d'água de 600 metros, o comprimento de onda é de aproximadamente 246 metros e, de acordo com a tabela 3, quando a profundidade é de aproximadamente a metade desse comprimento de onda ( $d=123$ ), a velocidade relativa entre a superfície e  $d= \lambda/2$  é menor que 5%. Este mesmo fenômeno ocorrerá para as demais profundidades em relação ao comprimento de onda analisado.

#### 4. CONCLUSÕES

As linhas de produção são estruturas úteis e indispensáveis no setor produtivo e de exploração offshore. São compostas por materiais onerosos de maneira que qualquer tipo de desgaste é altamente indesejável. Conforme a profundidade aumenta, pôde-se observar, portanto, que a influência dos parâmetros cinemáticos da onda nas linhas de produção vai diminuindo gradativamente. Quando a profundidade é equivalente à metade do comprimento da onda analisada, as velocidades e acelerações são menores que 5% dos valores encontrados na superfície, tornando-se uma influência desprezível nas linhas, pois a ação das ondas nas linhas de produção de petróleo é atenuada. Assim sendo, a desconsideração destes cálculos nestas profundidades diminuirá, consideravelmente, o tempo computacional em simulações ou modelagens de estruturas offshore sujeitas às ações de ondas, uma vez que somente parte da estrutura terá a força computada, a cada passo de tempo, ao longo da análise.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MEIRELES, S; CARVALHO, N. **Modelagem computacional da propagação de ondas superficiais no oceano: um subsídio para a compreensão dos fenômenos ópticos.** 2007. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

HARITOS, N. **Introduction to the Analysis and Design of Offshore Structures– An Overview.** The University of Melbourne, Australia. 2007.

CHAKRABARTI, S. K. **Handbook of offshore engineering.** Vol. 1. Illinois, EUA. 2005.



**SEMENGE**  
V Semana de Engenharia

REPENSANDO A ENGENHARIA  
EFICIÊNCIA, ECONOMIA E SUSTENTABILIDADE

**DET NORSKE VERITAS. DNVGL RP C205: Environmental Conditions and Environmental Loads. 2017.**

**PETROBRAS - FATOS E DADOS. Conheça curiosidades sobre equipamentos de nossos sistemas submarinos.** Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-curiosidades-sobre-equipamentos-de-nossos-sistemas-submarinos.htm>> Acesso em: 10 de março de 2018