

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Modelagem numérica de dutos submarinos

A simulação numérica do duto projetado em um ambiente tridimensional realista obtido por medições da topografia do fundo marinho, permite que os engenheiros explorem quaisquer oportunidades que o comportamento do mesmo pode oferecer para desenvolver soluções seguras e econômicas. Por exemplo, o projetista pode analisar primeiro o comportamento do duto na batimetria original. Se alguns dos casos de carga resultam em tensões além do limite aceitável, pode-se simular uma modificação do fundo do mar no modelo de elementos finitos. A análise é executada novamente para confirmar que as modificações levaram à diminuição desejada de tensão ou deformação.

O modelo de elementos finitos pode ser uma ferramenta para analisar o comportamento *in-situ* de um duto. Por comportamento *in-situ* de um duto, entenda-se a resposta do mesmo às cargas ao longo de um histórico de carregamento (BAI; BAI, 2014). Isto pode consistir em vários casos de carga em sequência, como, por exemplo:

1. instalação;
2. testes de pressão (enchimento de água e do teste hidrostático);
3. operação (enchimento com conteúdo, pressão de projeto e temperatura);
4. ciclos de carga/descarga;
5. flambagem lateral e vertical (*upheaval*);
6. onda dinâmica e/ou de corrente;
7. cargas de impacto.

Bai e Bai (2014) apresentam o processo de análise do comportamento *in-loco* desses duto através do MEF, que será detalhado a seguir.

FLUXOGRAMA

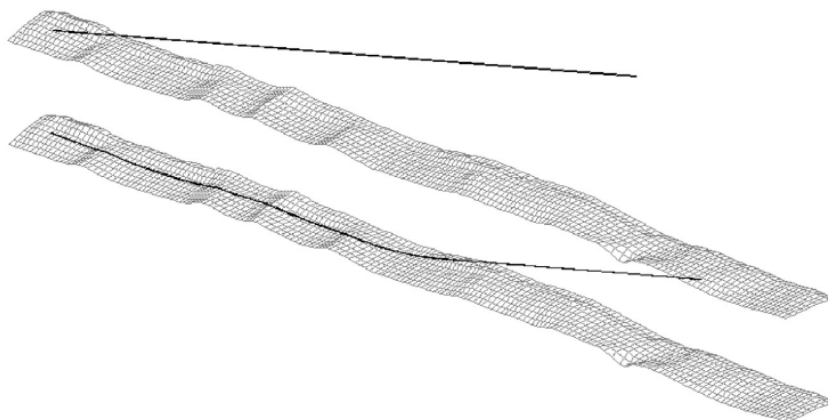
1.1.1 Análise estática

A modelagem da instalação do duto é o primeiro passo para o estudo do comportamento *in-situ* do duto. Visa reproduzir a configuração indeformada do duto assim que lançado sobre a leito marinho. Essa configuração é o ponto de partida para as etapas posteriores da análise. Mais importante do que investigar o comportamento do duto durante a instalação é garantir que

a correta representação da tração e ângulo de lançamento de tal modo que consigam gerar forças residuais no duto, oriundas do atrito quando o duto se assenta sobre a batimetria.

Por simplicidade, neste trabalho, assume-se o ângulo entre o duto e a horizontal nulo, isto é, o duto está em um plano horizontal que desce em direção a superfície batimétrica. Desse modo, o modelo permite especificar somente a tração de lançamento. Essa modelagem visa garantir a correta representação do contato entre o duto e a batimetria (forças de contato e ponto onde o duto toca o solo). A Figura 1 mostra o duto antes e durante o processo de instalação.

Figura 1 – Modelo de elementos finitos durante o lançamento.



Fonte: Bai e Bai (2014)

A medida que o duto se assenta, é necessário garantir um equilíbrio estável entre ele e o solo, o que é feito mediante um modelo representativo dessa interação, no qual deve-se definir o atrito e rigidez do leito marinho. No ABAQUS (Dassault Systèmes Simulia, 2018), pode-se relacionar a penetração e a força de reação do solo por meio de uma curva de rigidez axial, além de usar modelo anisotrópico para o atrito do solo, representando as diferenças entre os atritos nas direções longitudinal e transversal.

Após a descida do duto, têm-se os processos de alagamento e desalagamento, que acarreta em mudanças no peso submerso do duto e, conseqüentemente, altera na sua configuração. Esses processos podem ser facilmente modelados por uma variação em uma carga vertical atuando no duto. Mas, um duto sujeito a essa variação de carga na condição alagada sofrem grandes deformações axiais devido à mudança em geometria, e assim o duto se deforma e afunda nos vãos livres ao longo da rota do duto.

Dessa maneira, é desejável que o modelo a ser estabelecido use um procedimento de análise que considere grandes deslocamentos e o efeito de alterações na área da seção do duto devido a alta tensão axial. Além disso, é interessante que o modelo do material seja capaz de representar o comportamento plástico da seção do duto. No trabalho aqui proposto, não são contempladas nas análises os efeitos de carregamentos de temperatura.

A pressão hidrostática externa é um fator importante para a capacidade de resistência de

duto em águas profundas. Como o modelo pode incluir uma estrutura tridimensional no fundo do mar, a pressão externa pode ser uma função da profundidade da água. Já a pressão interna pode ser assumida como constante, mas a possibilidade de representar o efeito estático do conteúdo na extremidade pode ser incluído.

1.1.2 Procedimentos e etapas de carregamento na análise de elementos finitos

Um conceito base no ABAQUS é a divisão do histórico do carregamentos em etapas de carga. Para cada etapa, o usuário escolhe um método de análise. Dessa forma, é possível representar qualquer sequência e tipo de histórico de carregamento. Por exemplo, em um passo estático, o duto pode ser carregado com gás, no passo estático seguinte descarregado, e na terceira etapa, pode-se realizar uma análise exclusiva do duto vazio. Um histórico de carga de um modelo construído para uma análise de assentamento de duto é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Histórico de carga típico em uma análise de dutos no ABAQUS.

Passo	Ação	Análise
1	Aplicação de peso próprio e empuxo do duto	Estática
2	Aplicação de pressão externa hidrostática	Estática
3	Aplicação de tensão leiga	Estática
4	Assentamento do duto no fundo do mar (ver Figura 1)	Estática
5	Remoção dos elementos de guincho	Estática
6	Modificando condições de contorno para a condição de instalação	Estática
7	Enchimento de água para condições alagadas	Estática
8	Aplicação de pressão do teste hidrostático.	Estática
9	Remoção da pressão do teste hidrostático	Estática
10	Enchimento de gás	Estática
11	Aplicação de pressão de operação	Estática
12	Aplicação de temperatura de operação para a condição operacional	Estática
13	Remoção de pressão e temperatura para condição de recarga	Estática
14	Aplicação de carga de onda e corrente	Dinâmica

Fonte: Bai e Bai (2014).

Após os passos referentes ao processos de assentamento do duto, é possível incluir uma passo de perturbação linear para obtenção dos modos de vibração, que são essenciais na análise de fadiga.

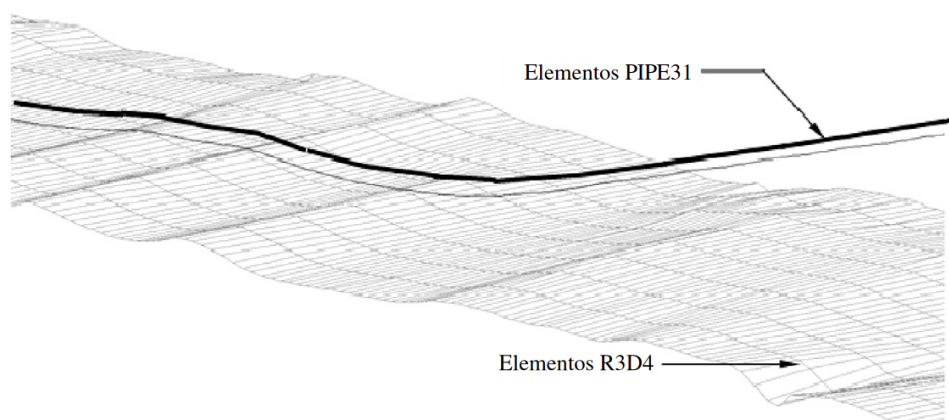
É válido de nota que a análise estática disponível no ABAQUS usada no modelo lida com respostas não lineares de efeitos de grandes deslocamentos, não-linearidade do material e não-linearidades de contorno, como contato, deslizamento e atrito (interação solo-duto). O ABAQUS usa o método de Newton para resolver as equações de equilíbrio não lineares. Portanto, a solução é obtida como uma série de incrementos com iterações para obter equilíbrio dentro de cada incremento (SIMULIA, 2018).

1.1.3 Tipos de elementos

O Abaqus dispõe de alguns tipos de elementos a serem usados no modelo do sistema de solo-duto com elementos finitos, conforme a Figura 2:

- Para modelar o fundo do mar pode-ser usar os elementos rígidos do tipo R3D4 usados, ou superfícies analíticas rígidas.
- Os elementos do tipo PIPE31H usados para modelar o duto.
- Os elementos de molas usados para representar a continuidade do duto nas extremidades.

Figura 2 – Tipos de elementos usados no modelo.



Fonte: Bai e Bai (2014)

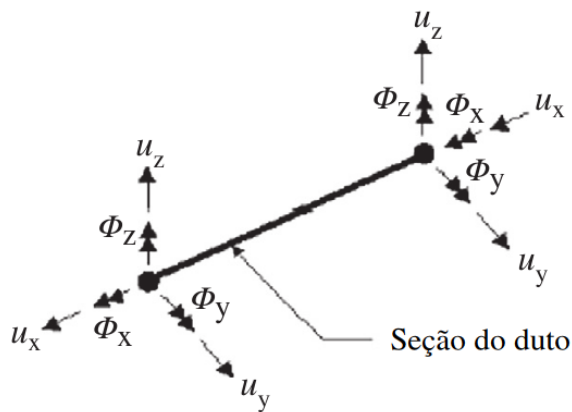
1.1.3.1 Elementos para representação do duto

A Figura 3 mostra o elemento de duto finito 3D usado no modelo estabelecido, com 2 nós e 12 graus de liberdade. O elemento PIPE31 usa interpolação linear, e o elemento PIPE32 interpolação quadrática. A formulação híbrida torna o elemento adequado para casos com estruturas delgadas e problemas de contato, como um duto descendo sobre o fundo do mar.

Os elementos híbridos (PIPE31H/PIPE32H) são fornecidos para uso nos casos em que é numericamente difícil calcular as forças axiais e de cisalhamento pelo método de deslocamento próprio do Método dos Elementos Finitos. O problema nesses casos é que pequenas diferenças em posições nodais podem causar forças muito grandes em algumas partes do modelo, o que por sua vez, causar grandes deslocamentos em outras direções. Os elementos híbridos superam essa dificuldade usando uma formulação mais geral, na qual as forças de cisalhamento axial e transversal nos elementos são incluídas, juntamente com os deslocamentos e rotações nodais, como variáveis primárias. Embora essa formulação torne esses elementos mais custosos computacionalmente, eles geralmente convergem muito mais rapidamente quando as rotações dos dutos são grandes.

O elemento está disponível com uma seção circular vazada de paredes finas e suporta a possibilidade de o usuário especificar pressão externa ou interna. Elementos de paredes espessas também estão incluídos no ABAQUS. O elemento também pode considerar alterações na área da seção do duto devido ao alto nível tensão axial do duto.

Figura 3 – Elemento PIPE31.



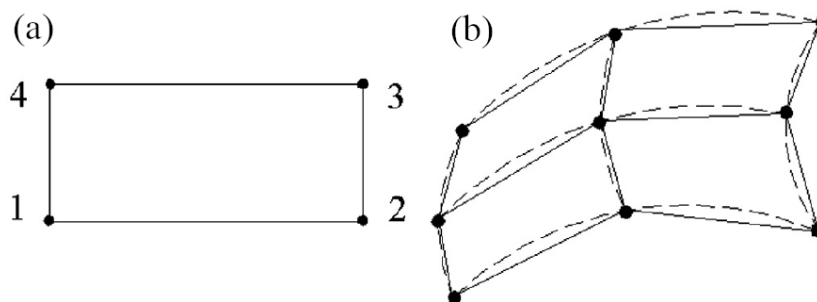
Fonte: Bai e Bai (2014)

1.1.3.2 Elementos para representação do fundo do mar

1.1.3.2.1 Elemento R3D4

O elemento rígido R3D4 de quatro nós, como mostrado na Figura 4, possibilita modelar superfícies complexas com geometria arbitrária e é geralmente escolhido ao modelar a topografia do fundo do mar. Uma característica muito importante do ABAQUS ao modelar o fundo do mar tem sido a possibilidade de suavizar as superfícies geradas com os elementos rígidos, o que leva a uma representação muito melhor do fundo do mar do que a superfície facetada inicial.

Figura 4 – Elemento rígido R3D4 (a), e suavização da superfície de elementos (b).



Fonte: Bai e Bai (2014)

A suavização é feita pela ABAQUS, criando superfícies de Bèzier com base na superfície facetada do fundo do mar formada pelos elementos rígidos. As superfícies de Bèzier resultantes,

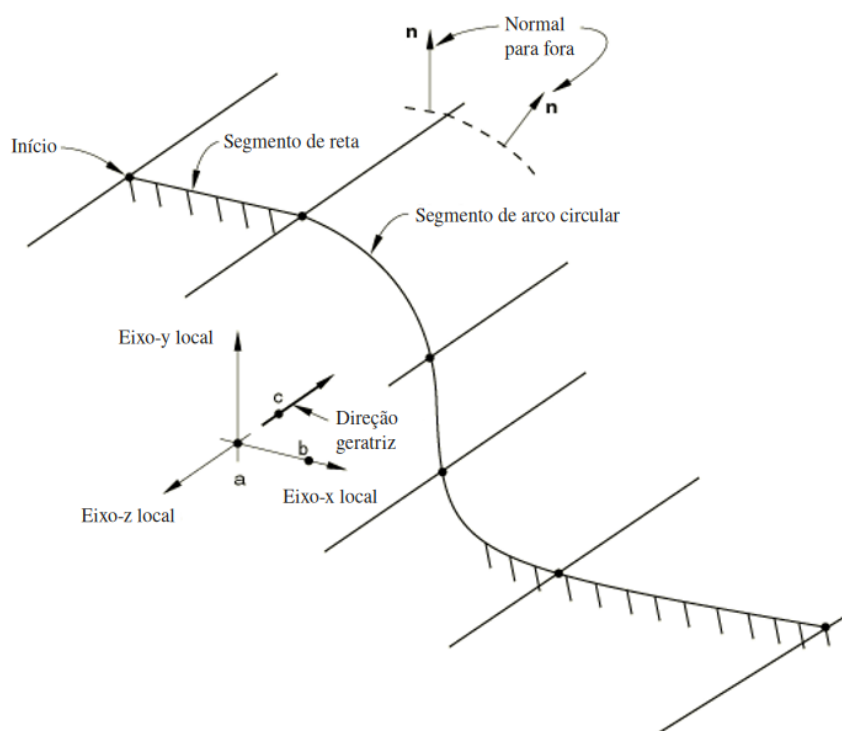
diferentemente da superfície do elemento facetado, são lisas e têm uma superfície externa com direção normal contínua. As superfícies de Bèzier não correspondem exatamente à geometria facetada da superfície rígida, mas os nós dos elementos rígidos que definem o fundo do mar permanecem sempre na superfície de Bèzier. Além disso, o usuário pode especificar o grau de suavização para controlar a geometria da superfície suavizada.

Um conjunto de elementos R3D4 que definem o fundo do mar é usado como a superfície principal chamada para aplicações de contato com os elementos do duto. Isso significa que um par de contatos (solo-duto) é definido e um modelo de interação é especificado. Esse modelo de interação geralmente consiste em uma definição de rigidez e atrito no fundo do mar.

1.1.3.2.2 Superfície analítica rígida

Outra forma de representar a batimetria do piso marinho é utilizar uma superfície analítica rígida, isto é, uma superfície geométrica com perfis que podem ser descritos com segmentos de linha reta ou curva, conforme Figura 5. Esses perfis podem ser varridos por um vetor gerador ou rotacionados em relação a um eixo para formar uma superfície tridimensional. Uma superfície analítica rígida está associada a um nó de referência de corpo rígido, cujo movimento governa toda a superfície. É importante frisar que este tipo de superfície possui apenas um lado disponível para contato, especificado de acordo com a orientação de eixos definida.

Figura 5 – Exemplo de superfície analítica rígida.



Fonte: SIMULIA (2018)

Em relação ao uso de superfícies formadas por elementos, o uso de superfícies analíticas rígidas apresenta duas vantagens:

- Superfícies geométricas curvas podem ser modeladas com precisão, uma vez que é possível parametrizá-las com segmentos de linhas curvas, o que tem como resultado uma superfície mais suave, fornecendo uma melhor aproximação à restrição de contato físico.
- Menor custo computacional decorrente do algoritmo de contato.

Por outro lado, como desvantagens do uso deste tipo de superfície:

- Uma superfície analítica rígida sempre agirá como superfície *master* em uma interação de contato, impossibilitando que se modele o contato entre duas superfícies rígidas analíticas.
- Forças de contato e pressões não podem ser plotadas em uma superfície rígida analítica, apenas na superfície *slave*.
- Um número muito grande de segmentos, na ordem de milhares, para definir uma superfície rígida analítica pode diminuir o desempenho. Sendo mais recomendável o uso de superfície baseada em elementos.

Para os casos estudados, utilizou-se uma superfície cilíndrica rígida tridimensional.

1.2 Vibração induzida por vórtices em vãos livres

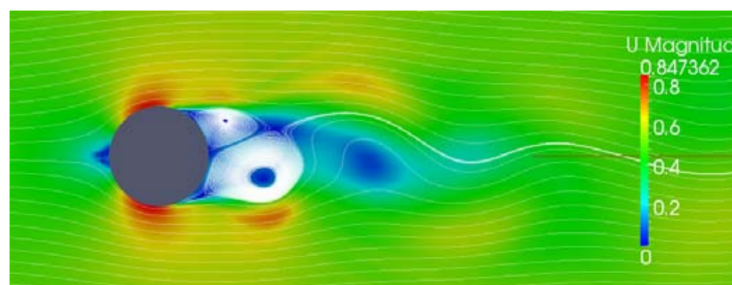
Quando um fluido de baixa viscosidade encontra um obstáculo, forma-se uma camada limite. Esta fina camada de fluido está sujeita aos efeitos das forças viscosas. Nesta camada, a velocidade do fluxo varia rapidamente, ficando cada vez mais lenta, formando um escoamento rotacional dentro da camada limite. Para determinadas velocidades de escoamento, a camada limite se desprende do obstáculo, formando uma esteira de vórtices, conhecida como esteira de von Kármán (CURRIE, 2012), conforme visto na Figura 6. Como consequência direta do desprendimento de vórtices, surge uma força oscilatória transversal ao fluxo, que age sobre o obstáculo, resultando em oscilações verticais e horizontais (NIELSEN; SØREIDE; KVARME, 2002).

A frequência do desprendimento de vórtices causado por um fluxo normal ao obstáculo (o duto em vão livre, no caso em questão), é governado pelo número de Strouhal, diâmetro externo e velocidade de fluxo (MØRK et al., 2003). O número de Strouhal pode ser obtido pela expressão

$$S_t = (fL)/V \quad (1.1)$$

onde f é a frequência de vórtices, L é o comprimento característico e V é a velocidade do fluxo. Quando a velocidade do fluxo alcança uma das frequências naturais da estrutura, ela começa a

Figura 6 – Esteira de Von Kármán.



Fonte: Van den Abeele, Boël e Hill (2013)

vibrar e estas duas vibrações se correlacionam, causando vibrações de grande amplitude e grande dano (*lock-in*) (MØRK et al., 2003).

Como os dutos são geralmente modelados como cilindros, é importante entender como funciona o comportamento do fluxo de fluido ao redor dessa estrutura. Segundo Sumer e Fredsoe (1995 apud BATCHELOR, 1967), ao estudar vibrações de cilindros em corrente constante, inicia-se o desprendimento de vórtices quando o número de Reynolds,

$$Re = (UD)/\nu \quad (1.2)$$

é maior que 40, onde U é a velocidade do fluxo, D é o diâmetro do cilindro e ν é a viscosidade cinemática (SUMER; FREDSOE, 1995).

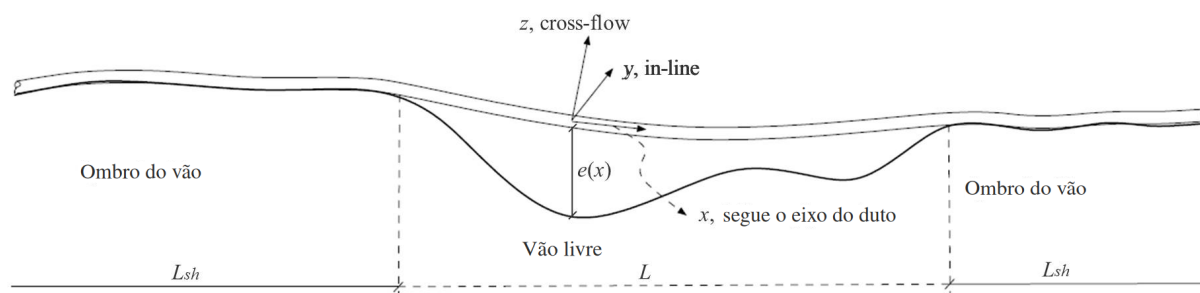
O desprendimento de vórtices induz uma variação cíclica de forças no cilindro. Assim, enquanto uma força de sustentação (*lift force*) oscila à mesma frequência do desprendimento de vórtices, a força de arrasto (*drag force*) oscila à duas vezes esta mesma frequência (SUMER; FREDSOE, 1995). Essas forças oscilatórias, os vórtices, podem induzir vibrações na direção ortogonal ao fluxo, *cross-flow* (CF), e na direção do fluxo, *in-line* (IL), denominadas vibrações induzidas por vórtices (VIV).

Os diversos dutos submarinos, que tem como objetivo o transporte de fluidos, seja entre o poço e a plataforma, entre plataformas, etc., estão sujeitos ao fluxo intermitente de cargas ambientais. Essas cargas tornam-se um desafio ainda maior quando os dutos, instalados diretamente no irregular leito marinho, encontram-se em vãos livres (FYRILEIV; MØRK, 1998), como ilustrado na Figura 7.

Vãos livres não aparecem apenas quando os dutos são instalados em leito irregular, mas também quando ocorre erosão posterior (*scouring*¹), devido, por exemplo, a suportes artificiais. Com o duto exposto às ondas e correntes, a parte não apoiada estará suscetível à VIV. Caso a frequência de desprendimento alcance uma das frequências naturais do duto, esse poderá entrar em ressonância. As excitações dinâmicas podem causar danos por fadiga, sendo importante identificar os corretos procedimentos de intervenção, seja no duto ou no leito marinho.

¹ Erosão do solo marinho causada pela ação de ondas ou correntes. Caracteriza-se pela remoção de sedimentos com formação de cavidades ou canais.

Figura 7 – Duto em Vão livre e direções das oscilações.



Fonte: Adaptado de Det Norske Veritas (2017)

A DNVGL-RP-F105 é uma referência técnica adotada mundialmente no estudo de dutos em vão livre. Nele está presente uma metodologia baseada em modelos de resposta a fim de avaliar a fadiga causada por VIV. Estes modelos representam relações empíricas entre a velocidade reduzida (Equação 1.4) e a amplitude de resposta adimensional, utilizadas para prever as amplitudes de vibração nas direções *in-line* e *cross-flow* (MØRK et al., 2003; Det Norske Veritas, 2017). Além desta, a recomendação prática sugere também um método baseado no coeficiente de sustentação e nas curvas do coeficiente de massa adicional como função da amplitude de resposta adimensional e da frequência de vibração adimensional (Det Norske Veritas, 2017). Como terceira opção, a DNVGL-RP-F105 indica o uso de fluidodinâmica computacional (CFD, na sigla em inglês) para escoamento turbulento ao redor dos dutos para avaliação do VIV.

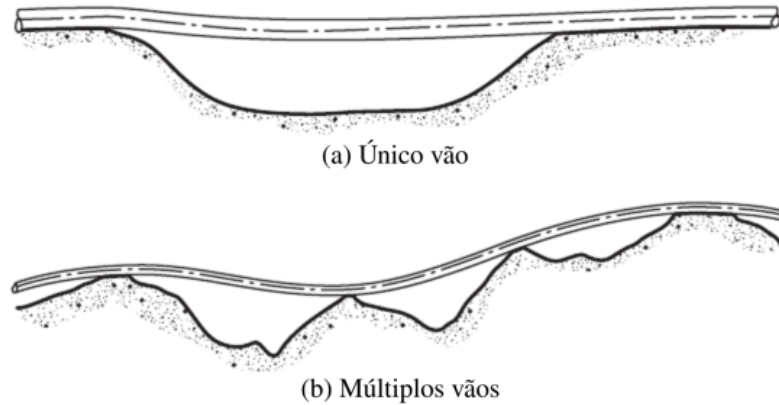
A DNVGL-RP-F105 considera dois modelos para estimar a resposta dinâmica em um vão livre: Modelo de Resposta (*Response Model*–RM) e Modelo de Força (*Force Model*–FM). A escolha do modelo, segundo Tura et al. (1994), depende: (i) do comportamento dos carregamentos ambientais, isto é, quando há ressonância induzida por vórtice, aplica-se RM; e quando o comportamento do vão livre é afetado por carregamentos periódicos com pouca ou nenhuma amplificação dinâmica, aplica-se FM; (ii) da direção e tipo de fluxo, RM é aplicável na direção *in-line* para corrente contínua e na direção *cross-flow* para qualquer padrão de fluxo; o FM é aplicado na direção *in-line* para carregamentos de onda direto.

A DNVGL-RP-F105 pode ser aplicada para vãos únicos e múltiplos onde um modo de vibração é predominante (*single-mode*), conforme a Figura 8. Porém, a combinação de vãos de grande extensão e altas correntes, ou ainda vãos múltiplos, faz com que não apenas os modos fundamentais sejam ativados, mas também diversos outros modos de ordem mais alta (*multi-mode*).

1.2.1 Modelos de respostas

Os modelos de resposta relacionam a velocidade do fluxo do fluido externo e a amplitude de vibração do duto em casa direção (*in-line* e *cross-flow*). Estes modelos pode então ser

Figura 8 – Configurações típicas para vãos.



Fonte: Adaptado de Bai e Bai (2014)

construído através do conjunto de equações que dependem principalmente da velocidade reduzida V_R e do ângulo do fluxo θ_{rel} .

Segundo a DNVGL-RP-F105 o fluxo pode ser dividido em duas zonas: (i) uma zona exterior, distante do solo marinho, onde velocidade de corrente média e a turbulência variam muito pouco na direção horizontal, e (ii) uma zona interior, onde a velocidade de corrente média e a turbulência têm variações consideráveis na direção horizontal. Uma vez que as medições da corrente são realizadas na zona exterior, fora da camada limite, a velocidade de corrente U_c no duto pode ser aproximada a partir da equação

$$U_c = R_c U(z_r) \frac{\ln(e + D/2) - \ln(z_0)}{\ln(z_r) - \ln(z_0)}, \quad (1.3)$$

em que $U(z_r)$ é a velocidade da corrente na altura de referência z_r , e é o gap entre o duto e solo, z_0 é a cota de referência e D é o diâmetro externo do duto.

Uma vez encontrada a velocidade da corrente na zona interior, isto é, próxima do solo, a velocidade reduzida V_R pode ser calculada assim

$$V_R = \frac{U_c + U_w}{f_n D}, \quad (1.4)$$

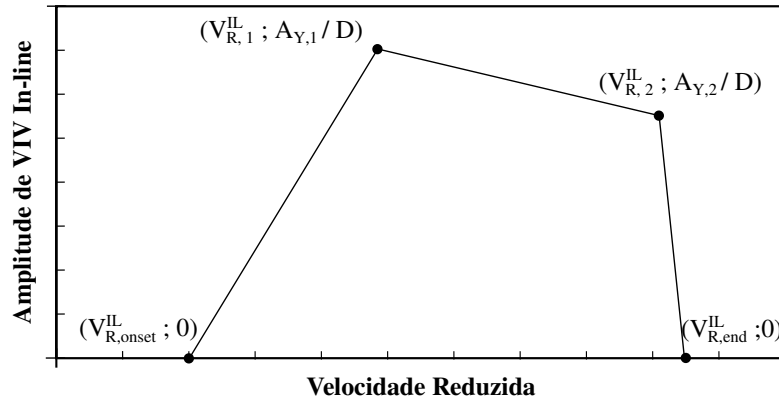
onde U_w é a velocidade de fluxo induzida por onda e f_n é a frequência natural de amplitude.

O parâmetro de estabilidade K_S , representa o amortecimento para uma dada forma modal, sendo obtido a partir da equação

$$K_S = \frac{4\pi m_e \zeta_T}{\rho_w D^2}, \quad (1.5)$$

em que ρ_w é a densidade da água e ζ_T é a taxa de amortecimento modal total.

Com esses valores calculados, e pode-se construir a curva que relaciona velocidade reduzida e amplitude de vibração *in-line* para diâmetro unitário, semelhante a Figura 9, onde as coordenadas dos pontos são dados nas equações do item 4.6.4 da DNVGL-RP-F105.

Figura 9 – Curva de modelo de resposta *in-line*.

Fonte: Adaptado de Det Norske Veritas (2017)

Conforme observado na DNVGL-RP-F105, a resposta de amplitude de um duto vibrando na direção *in-line*, contempla regiões com velocidade de corrente entre 1,0 e 4,5. Tem-se então que a resposta na direção longitudinal depende dos parâmetros de velocidade de corrente, estabilidade, intensidade de turbulência e do ângulo entre a corrente e o duto. Percebe-se que, à medida que o parâmetro de estabilidade aumenta, a amplitude de resposta tende a diminuir, uma vez que este é proporcional ao amortecimento do sistema (Equação 1.5).

Para o modelo de resposta *cross-flow* também é necessário calcular alguns outros parâmetros. Dessa vez, inicia-se com o cálculo do fator de correção para considerar a proximidade do duto com o solo

$$\Psi_{proxi,onset} = \begin{cases} \frac{1}{5} \left(4 + 1,25 \frac{e}{D} \right) & \text{para } \frac{e}{D} < 0,8 \\ 1 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1.6)$$

Caso o duto esteja localizado próximo ou em trincheiras é necessário considerar o fator de correção específico

$$\Psi_{trench,onset} = 1 + 0,5 \frac{\Delta}{D} \quad (1.7)$$

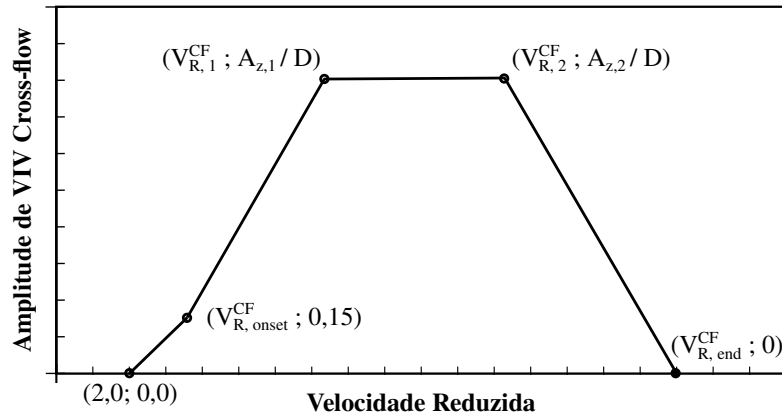
onde Δ é a profundidade da trincheira.

Com esses valores calculados, pode-se construir a curva que relaciona velocidade reduzida e amplitude de vibração para diâmetro unitário, semelhante a Figura 10, onde as coordenadas dos pontos são dados nas equações do item 4.6.4 da DNVGL-RP-F105.

1.2.2 Resposta *multi-mode*

A resposta do vão livre pode ser dada em função de uma coordenada x ao longo da direção longitudinal do duto. Para cada combinação relevante de estado de mar e velocidade de corrente, um número de modos pode ser excitado simultaneamente na mesma direção, dando origem a uma resposta *multi-mode*. Todavia, o número de modos que responderão e o quanto

Figura 10 – Curva de modelo de resposta *cross-flow*.



Fonte: Adaptado de Det Norske Veritas (2017)

cada modo contribuirá para o dano por fadiga dependerá da velocidade do fluxo, da posição no eixo x e da competição com outros modos.

A DNVGL-RP-F105 define três diferentes tipos de modos:

Modos ativos são os modos que podem ser excitados por VIV. Com base no item 2.3.3 da DNVGL-RP-F105, os critério de definição para que um modo *in-line* com frequência $f_{IL,j}$, ou *cross-flow* com frequência $f_{CF,j}$, seja considerado ativo é:

$$\begin{aligned} f_{IL,j} &\leq \frac{U_{extreme} \gamma_{f,IL}}{V_{R,onset}^{IL} D} \\ f_{CF,j} &\leq \frac{U_{extreme} \gamma_{f,CF}}{2D} \end{aligned} \quad (1.8)$$

sendo $\gamma_{f,IL}$ e $\gamma_{f,CF}$ coeficientes de segurança, variando de 1 a 1,3 a depender da classe de segurança e nível de definição do vão livre (item 2.7.2 da DNVGL-RP-F105). Já $U_{extreme}$ é a velocidade do fluxo perpendicular ao duto que considera velocidades de corrente e onda, e pode considerar combinações de períodos de retorno de 1, 10 e 100 anos. Um modo que não passível de ativação pode ser totalmente desconsiderado nas análises em todos os pontos e velocidades de fluxo.

Modos participantes são modos ativos que têm amplitude de tensão relevante em um, ou ambos os lados, de um ponto na coordenada x ao longo do duto. Para que um modo j seja considerado participante no vão, é necessário que a seguinte condição (presente no item 4.3.3) seja atendida:

$$|A_{IL/CF,j}(x)| \geq \frac{A_{IL/CF}^{\max}}{10} \text{ para algum } x \in (x_{\text{start},j}, x_{\text{end},j})$$

sendo

$$A_{IL/CF,j}(x) = (1 + CSF) D \kappa_j(x) Er$$

onde

CSF	fator de rigidez do concreto
$\kappa_j(x)$	curvatura do modo na posição x
E	módulo de elasticidade
r	coordenada radial da seção transversal do duto
$(x_{\text{start},j}, x_{\text{end},j})$	intervalo de influência do modo

Modos contribuintes são modos participantes que deve satisfizer um dos seguintes critérios:

- direção *cross-flow*: $(A_Z/D)_j \geq 0,1(A_Z/D)_{\text{max}}$
- direção *in-line*: $S_{IL,j}^P(x) \geq 0,1S_{IL}^{\text{max}}(x)$

onde $(A_Z/D)_j$ é a amplitude VIV normalizada para o j-ésimo modo, $(A_Z/D)_{\text{max}}$ é a amplitude VIV normalizada para o modo *cross-flow* dominante, $S_{IL,j}^P(x)$ é a amplitude de tensões de reposta preliminar para o j-ésimo modo *in-line* e $S_{IL}^{\text{max}}(x)$ é a amplitude de tensões de resposta associadas ao modo *in-line* dominante.

Baseado nos modelos de resposta *single-mode*, pode-se calcular as amplitudes do VIV para todos os modos (Equação 1.2.2). Assim, precisamos calcular VIV *cross-flow* e *in-line* para cada velocidade de corrente, estado de mar e em cada ponto com se os seguintes procedimentos:

- VIV *cross-flow*

1. Identifica-se todos os modos participantes (*single* ou *multi location*)
2. Com o modelo de resposta *cross-flow*:
 - a) Calcula-se a amplitude VIV normalizada para cada modo $(A_Z/D)_j$
 - b) Identifica-se o modo dominante, isto é, $(A_Z/D)_{\text{max}}$
 - c) Identificam-se os modos fracos $0,1(A_Z/D)_{\text{max}} \leq (A_Z/D)_j \leq (A_Z/D)_{\text{max}}$
 - d) Desconsidera-se os modos irrelevantes: $(A_Z/D)_j < 0,1(A_Z/D)_{\text{max}}$
3. Usando o modelo de resposta para baixos valores de Keulegan-Carpenter (*low Keulegan Carpenter flow regime*–LKCR), calcula-se $(A_Z/D)_j$ para cada modo.
4. Determina-se a resposta de tensão combinada:

$$S_{\text{comb},CF} = \max(S_{\text{comb},CF}^{RM}, S_{\text{comb},CF}^{LKCR})$$

5. Determina-se a frequência de contagem de ciclos.

- VIV *in-line*

1. Identifica-se todos os modos participantes (*single* ou *multi location*)
2. Com o modelo de resposta *in-line*:

- a) Calcula-se a amplitude VIV normalizada para cada modo $(A_Y/D)_j$
 - b) Identifica-se o modo dominante, isto é, o modo com $S_{IL}^{\max}(x)$
 - c) Identificam-se potenciais modos fracos: $0,1 S_{IL}^{\max}(x) \leq S_{IL,j}^P(x) \leq S_{IL}^{\max}(x)$
 - d) Desconsideram-se os modos irrelevantes: $S_{IL,j}^P(x) < 0,1 S_{IL}^{\max}(x)$
3. Reduzir os modos fracos. Para VIV *in-line*, dois modos adjacentes podem competir se suas frequências forem próximas, ou agir de forma independente se estiverem distantes. A DNVGL-RP-F105 define que os modos competem se a razão entre as frequências é menor que 2, isto é, $\frac{f_{n+1}}{f_n} < 2$. Em modos que estão competindo, considera-se que apenas o “vencedor” da competição (maior valor de $S_{IL}^P(x)$) pode ter máxima amplificação, enquanto a amplificação do modo “perdedor” é reduzida à metade. É interessante ressaltar que modos que não competem não têm redução.
 4. Calcular o intervalo de tensões *in-line* excitados pelo modo *cross-flow* dominante $S_{cross-flow-IL}(x)$.

Para cada ponto e cada modo, calcula-se o intervalo de tensões induzido por VIV *in-line* para os modos contribuintes:

$$S_{IL,j}^{RM}(x) = S_{IL,j}^P \cdot 0,5^{\beta_j(x)}$$

Assume-se que apenas o modo *cross-flow* dominante é capaz de contribuir para o movimento *in-line* induzido pelo modo transversal. Desta forma, o modo *in-line* participante cuja frequência natural é próxima a duas vezes a resposta *cross-flow* dominante é escolhido como candidato a VIV *in-line* induzido por *cross-flow*.

A amplitude de tensões *in-line* excitados pelo modo *cross-flow* dominante é dado por:

$$S_{CF-IL}(x) = 0,8 \cdot A_{IL,k}(x) \cdot \left(\frac{A_z}{D} \right)_{\max} \cdot R_k \cdot \gamma_s$$

5. Escolher o maior $S_{IL}^{RM}(x)$ e $S_{CF-IL}(x)$ para cada modo;
6. Determinar a faixa de resposta de tensão combinada e a frequência de contagem de ciclos.

REFERÊNCIAS

- BAI, Q.; BAI, Y. *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation*. [S.l.]: Elsevier Inc., 2014. ISBN 978-0-12-386888-6. Citado 6 vezes nas páginas 2, 3, 4, 5, 6 e 11.
- BATCHELOR, G. K. *An Introduction to Fluid Dynamics*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1967. (Cambridge Mathematical Library). ISSN 9780521663960. Citado na página 9.
- CURRIE, I. G. *Fundamental Mechanics of Fluids*. Fourth. [S.l.]: Taylor & Francis, 2012. (Civil and Mechanical Engineering). ISSN 9781439874608. Citado na página 8.
- Dassault Systèmes Simulia. *Abaqus Unified FEA - SIMULIA by Dassault Systèmes®*. 2018. Disponível em: <<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abacus/>>. Citado na página 3.
- Det Norske Veritas. *DNV GL-RP-F105 Free Spanning Pipelines 2017*. [S.l.], 2017. Citado 3 vezes nas páginas 10, 12 e 13.
- FYRILEIV, O.; MØRK, K. Assessment of free spanning pipelines using the DNV guideline. In: *The Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference*. Montreal, Canada: International Society of Offshore and Polar Engineers, 1998. Citado na página 9.
- MØRK, K. et al. Assessment Of VIV Induced Fatigue In Long Free Spanning Pipelines. In: *Proceedings of OMAE 2003*. Cancun, Mexico: International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engineering, 2003. p. 1–7. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9 e 10.
- NIELSEN, F. G.; SØREIDE, T. H.; KVARME, S. O. VIV Response of Long Free Spanning Pipelines. In: *21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Volume 1*. Oslo, Norway: ASME, 2002. p. 121–129. ISBN 978-0-7918-3611-8. Citado na página 8.
- SIMULIA. *Nonlinear Solution Methods in Abaqus/Standard*. 2018. https://help.3ds.com/2018/English/DSSIMULIA_Established/SIMACAETHERefMap/simathec-nonlinearsol.htm?ContextScope=all&id=f6d8fd0953f64ef794cf56a8990a3493#Pg0. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 7.
- SUMER, B. M.; FREDSOE, J. M. A Review On Vibrations Of Marine Pipelines. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, International Society of Offshore and Polar Engineers, 1995. Citado na página 9.
- TURA, F. et al. Guidelines for free spanning pipelines: The GUESP project. In: *13th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. United States: American Society of Mechanical Engineers, New York, NY (United States), 1994. Citado na página 10.
- Van den Abeele, F.; BOËL, F.; HILL, M. Fatigue Analysis of Free Spanning Pipelines Subjected to Vortex Induced Vibrations. In: *Volume 7: CFD and VIV*. Nantes, France: American Society of Mechanical Engineers, 2013. p. V007T08A039. ISBN 978-0-7918-5541-6. Citado na página 9.