

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

WEVERTON MARQUES DA SILVA

**MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA INTEGRADA  
PARA ANÁLISE DE FADIGA EM DUTOS SUBMARINOS EM VÃO-LIVRE**

Maceió-AL  
Setembro de 2019

WEVERTON MARQUES DA SILVA

**MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA INTEGRADA  
PARA ANÁLISE DE FADIGA EM DUTOS SUBMARINOS EM VÃO-LIVRE**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Cen-  
tro de Tecnologia da Universidade Federal de  
Alagoas.

Orientador: Adeildo Soares Ramos Júnior  
Coorientador: Eduardo Setton S. da Silveira

Maceió-AL

Setembro de 2019

## RESUMO

A segurança no transporte de hidrocarbonetos e outros fluidos em óleo é um dos tópicos de maior atenção na indústria de petróleo e gás. Recentemente, essa indústria tem tido grandes preocupações sobre como o fenômeno da Vibração Induzida por Vórtice (VIV) afeta a vida à fadiga dos componentes e dutos submarinos, especialmente os dutos em vãos livre. Mundialmente, há várias dessas estruturas instaladas que já chegaram ao final ou metade de sua vida de projeto, o que torna imperativo revisitar as previsões iniciais e avaliar a necessidade de intervenção no sentido de estender a vida útil das mesmas, em especial no que diz respeito à VIV.. O início destas e de outras análises se baseiam no comportamento in-loco do duto. O Método dos Elementos Finitos é amplamente empregado na modelagem desse comportamento. No entanto, essa não é uma tarefa trivial, uma vez que depende da utilização de vários softwares para etapas intermediárias. Além disso, essas análises envolvem manipulação de grandes quantidades de dados relacionados à batimetria do fundo marinho e propriedades dos materiais, geometria do duto, correnteza, entre outros. Dessa forma, todo esse processo costuma ser demorado e passível de erros. Concomitantemente, a indústria de óleo e gás tem passado por uma transformação digital nos anos recentes. Este cenário trouxe novas oportunidades para o desenvolvimento de novas ferramentas para dia-a-dia do profissional responsável por estas análises. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta para agilizar o fluxo de análise de fadiga em dutos submarinos sujeitos a vãos livres.

**Palavras-chaves:** Dutos Submarinos; Modelagem Numérica; Modelagem Computacional; Fadiga.

## ABSTRACT

Safe transportation of hydrocarbons and other oil fluids is one of the most important topics in the oil and gas industry. This industry has recently had major concerns about how the Vortex Induced Vibration (VIV) phenomenon affects the fatigue life of subsea components and pipelines, especially free span pipelines. Worldwide, there are several of these installed structures that have reached the end or half of their lifespan, which makes it imperative to revisit the initial forecasts and assess the need for intervention to extend their lifespan, especially with regard to VIV. The onset of these and other analyzes is based on in situ pipeline behavior. The Finite Element Method is widely employed in modeling this behavior. However, this is not a trivial task as it depends on using various softwares for intermediate steps. Moreover, these analyze involve manipulation of large amounts of data related to seabed bathymetry and material properties, pipeline geometry, current, among others. This whole process is often time-consuming and error prone. At the same time, the oil and gas industry has undergone a digital transformation in recent years. This scenario brought new opportunities for the development of new day-to-day tools of the professional responsible for these analyze. This paper presents the development of a tool to speed up the flow of fatigue analysis in subsea pipelines subjected to free spans.

**Keywords:** Subsea Pipeline; Numerical Modeling; Computacional Modeling; Fatigue.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esteira de Von Kármán. . . . .	10
Figura 2 – Duto em Vão livre e direções das oscilações. . . . .	11
Figura 3 – Configurações típicas para vãos. . . . .	12
Figura 4 – Curva de modelo de resposta <i>in-line</i> . . . . .	17
Figura 5 – Curva de modelo de resposta <i>cross-flow</i> . . . . .	19
Figura 6 – Modelo de elementos finitos durante o lançamento. . . . .	23
Figura 7 – Modelo com o duto vazio (acima) e alagado (abaixo). . . . .	24
Figura 8 – Tipos de elementos usados no modelo. . . . .	25
Figura 9 – Elemento PIPE31. . . . .	26
Figura 10 – Elemento rígido R3D4 (a), e suavização da superfície de elementos (b). . . . .	27
Figura 11 – Exemplo de superfície analítica rígida. . . . .	28
Figura 12 – Fluxo de operação proposto para a ferramenta. . . . .	29
Figura 13 – Amostra das principais bibliotecas científicas em Python. . . . .	32
Figura 14 – Aspecto de arquivo principal de entrada no formato JSON . . . . .	33
Figura 15 – Diagrama UML dos módulos e classes. . . . .	34

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Histórico de carga típico em uma análise de dutos no ABAQUS. . . . .	24
---	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>7</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos . . . . .</b>	<b>8</b>
<b>1.2</b>	<b>Organização do Trabalho . . . . .</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>	<b>10</b>
<b>2.1</b>	<b>Vibração induzida por vórtices em vãos livres . . . . .</b>	<b>10</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Modelo de resposta <i>in-line</i> . . . . .</b>	<b>15</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Modelo de resposta <i>cross-flow</i> . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Resposta <i>multi-mode</i> . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Modelagem numérica de dutos submarinos . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Análise estática . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Procedimentos e etapas de carregamento na análise de elementos finitos</b>	<b>24</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Tipos de elementos . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>2.2.3.1</b>	<b>Elemento PIPE31/PIPE32 . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>2.2.3.2</b>	<b>Elemento R3D4 . . . . .</b>	<b>26</b>
<b>2.2.3.3</b>	<b>Superfície analítica rígida . . . . .</b>	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>MODELAGEM DO SISTEMA COMPUTACIONAL . . . . .</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Computação científica . . . . .</b>	<b>30</b>
<b>3.2</b>	<b>Implementação . . . . .</b>	<b>31</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Linguagem de programação . . . . .</b>	<b>31</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Estrutura de módulos e classes . . . . .</b>	<b>32</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>35</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, à medida que novos campos de petróleo e gás foram descobertos em águas profundas e distantes da costa, surgiu a necessidade de utilização de sistemas de coleta e exportação submarinos utilizando dutos rígidos cada vez mais extensos. Com uma maior extensão, aumentou-se a propensão à ocorrência de vãos livres devido à irregularidades do leito marinho, sejam elas pré-existentes durante a instalação ou devido a subsequentes movimentos horizontais de *scouring* de dutos durante a operação.

A configuração de dutos no fundo do mar depende das características topográficas do leito marinho, solo, tensão residual, rigidez do duto e seu peso submerso. Seções de duto não suportadas pelo fundo do mar são chamadas de vãos livres. Se o fundo do mar for muito irregular, os dutos tendem a formar vãos em vez de seguir as características topográficas do leito marinho.

A presença de trechos do duto em vão livre exige uma avaliação para determinar a necessidade de ações corretivas para evitar danos aos mesmos. Ainda na fase de projeto, uma avaliação do perfil do fundo do mar ao longo da rota proposta pode ser realizada para identificar se é esperado que haja trechos do duto em vão livre. Na existência de tais trechos, será necessária uma análise que forneça previsões dos números e tamanhos dos vãos esperados, que são indicadores da necessidade de possíveis alterações na rota ou ações corretivas.

Devido aos elevados custos (ambientais, financeiros, e à imagem da empresa), associados aos acidentes, o transporte seguro de hidrocarbonetos e outros fluidos nos oleodutos é uma das principais prioridades da indústria de petróleo e gás. A vibração livre é uma grande preocupação na análise de fadiga de componentes de dutos submarinos, incluindo dutos em vãos livres (GAMINO; ABANKWA; PASCALI, 2013).

Sendo assim, o comportamento estático e dinâmico do duto deve ser investigado para garantir a segurança, combatendo o dano estrutural por fadiga, mantendo-o em um estado aceitavelmente seguro. Se as condições necessárias à segurança não puderem ser garantidas, as ações corretivas na forma de mudança de rota, correção de vãos, supressão do VIV e similares são usadas para garantir que os critérios de projeto relativos aos níveis de tensão e possíveis danos por fadiga devido ao VIV não sejam excedidos. No entanto, devido à quantidade de fatores envolvidos, o projeto do processo de lançamento de dutos é uma das tarefas mais desafiadoras, mesmo quando a rota ideal já está definida. A análise requer o uso de métodos numéricos robustos para seu tratamento, e o Método dos Elementos Finitos (MEF) é amplamente usado nessa tarefa.

Para que as condições de contorno e características do problema simulado reproduzam comportamento in-loco, é necessário modelar desde a etapa de instalação até a operação do duto, assim como considerar efeito de carregamentos dos diferentes valores de pressões internas e externas nas respectivas etapas. Modelar a instalação de dutos em um *software* de elementos



finitos para uso geral pode ser um trabalho demorado e tedioso, principalmente devido a grandes quantidades de dados da batimetria. Na maioria das vezes, são necessárias técnicas avançadas de *script* para definir o perfil do leito marinho, selecionar a rota ideal do duto e simular o processo de assentamento (Van den Abeele; BOËL; HILL, 2013).

Nesse cenário, são essenciais ferramentas que auxiliem no pré e pós-processamento de dados e na automação de procedimentos. Uma ferramenta com essas características traz ganhos significativos para a produtividade e reduzem a probabilidade de erro humano. Além disso, uma ferramenta que integre *softwares* de uso específico (para análise e visualização, por exemplo), pode reduzir atritos do fluxo de trabalho, em comparação ao uso isolado destes *softwares*.

Atualmente, existem diversos sistemas submarinos em operação nas Bacias de Campos e Espírito Santo que estão no final ou já ultrapassaram a metade de sua vida útil de projeto, o que torna ainda mais relevante uma ferramenta auxiliar para a reavaliação de integridade e extensão de vida operacional com critérios de cálculo validados.

Por outro lado, no cenário mundial existe a tendência da indústria de óleo e gás de abraçar a transformação digital em todas as áreas da cadeia, com desenvolvimento de práticas e ferramentas para análise, visualização, predição e resultados (MITTAL; SLAUGHTER; BANSAL, 2017).

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma ferramenta para a análise de fadiga em dutos submarinos em vãos livres, que integre um *software* de análise de elementos finitos e o estudo de vida a fadiga. Além disso, este trabalho tem como objetivos específicos:

- Modelar e implementar a ferramenta utilizando o paradigma da programação orientada a objetos, através da linguagem *Python*;
- Contribuir para a metodologia de análise de fadiga em dutos por meio da criação de uma metodologia de seleção de modos de vibração;
- Criar um ambiente interativo de visualização de resultados da simulação com ferramentas que garantam maior liberdade e eficiência para o projetista;
- Validar a ferramenta com aplicação de casos.

## 1.2 Organização do Trabalho

O seção 2.1: apresenta os conceitos e as formulação por trás da Vibração Induzida por Vórtice (VIV), e as recomendações dados pela referência técnica DNVGL-RP-F105. O seção 2.2: apresenta a modelagem computacional do comportamento de duto submarinos, os passos de carga, e os tipos de elementos empregados para modelar os elementos necessários a simulação.

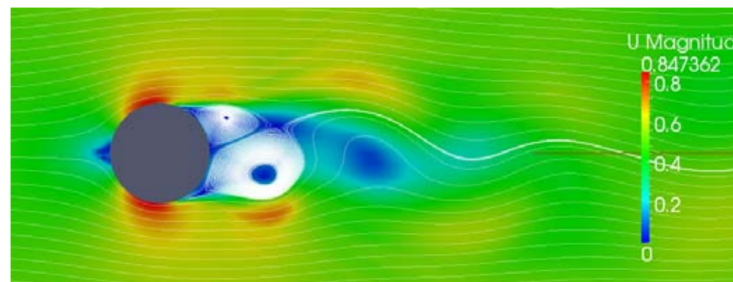
O Capítulo 3: apresenta os aspectos da implementação computacional da ferramenta, bem como os princípios norteadores de algumas escolhas da, a escolha da linguagem e paradigma de programação, a estrutura proposta para os módulos e classe.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 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 1. 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).

Figura 1 – Esteira de Von Kármán.



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

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

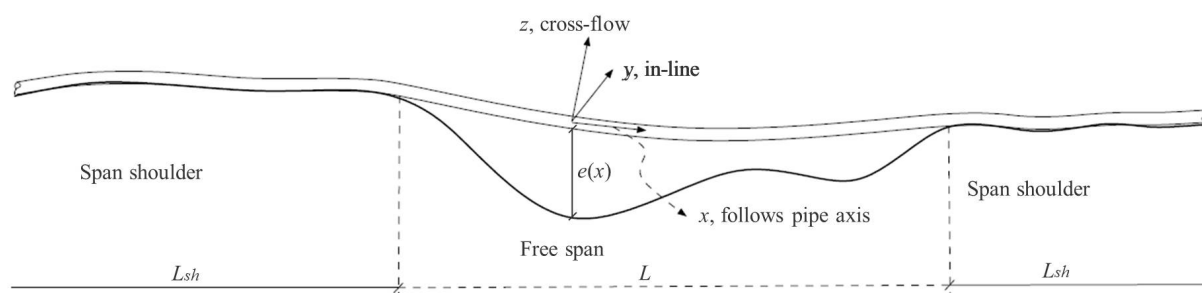
Como os dutos são geralmente modelados como cilindros, é importante entender como funciona o comportamento do fluxo de fluido ao redor dessa estrutura. Segundo Sumer e Fredsoe (1995 apud BATCHELOR, 1967), ao estudar vibrações de cilindros em corrente constante, inicia-se o desprendimento de vórtices quando o número de Reynolds,  $R_e = (U \cdot D)/\nu$ , é maior que 40, onde  $U$  é a velocidade do fluxo,  $D$  é o diâmetro do cilindro e  $\nu$  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). Estas 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 2.

Figura 2 – Duto em Vão livre e direções das oscilações.



Fonte: Det Norske Veritas (2017a)

Porém, vãos livres não aparecem apenas quando os dutos são instalados em leito irregular, mas também quando ocorre erosão posterior (*scouring*<sup>1</sup>), devido, por exemplo, a suportes artificiais. Com o duto exposto à 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.

A DNVGL-RP-F105 utiliza uma metodologia baseada em modelos de resposta a fim de avaliar a fadiga causada por VIV em dutos em vão livre. Estes modelos representam relações empíricas entre a velocidade reduzida (Equação 2.17) 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, 2017a). 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, 2017a). 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.

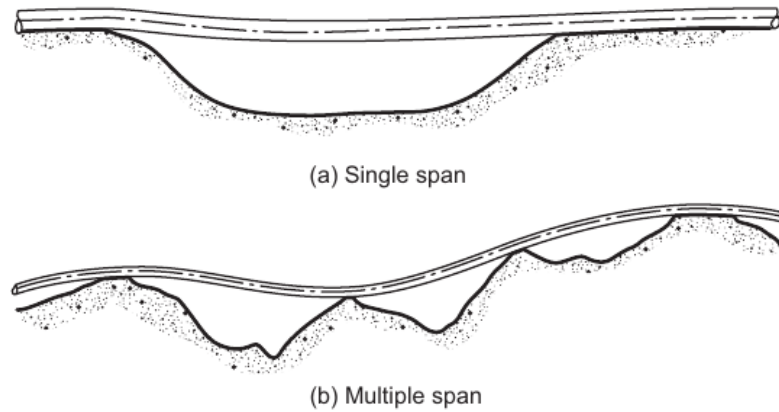
A DNVGL-RP-F105 considera dois modelos para estimar a resposta dinâmica em um vão livre: Modelo de Resposta (*Response Model* - RM) e Modelo de Força (*Force Model* -

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

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 3. 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*).

Figura 3 – Configurações típicas para vãos.



Fonte: Bai e Bai (2014)

A primeira etapa do cálculo das frequências de vibração dos dutos em vão livre é o cálculo da força axial efetiva,  $S_{eff}$ , e os parâmetros de rigidez do solo  $K_v$ ,  $K_l$  calculados por meio das Equações 2.7 e 2.8, sendo  $K_{v,s}$  um valor tabelado de acordo com o tipo de solo escolhido.

Com o intuito de demonstrar a formulação do modelo de resposta para o caso *single mode* de um duto totalmente restringido, tem-se que a tensão axial efetiva é dada por

$$S_{eff} = H_{eff} - \Delta p_i A_i (1 - 2\nu) - A_s E \Delta T \alpha_E \quad (2.1)$$

onde

- $H_{eff}$  tensão efetiva de lançamento  
 $\Delta p_i$  diferencial de pressão interna em relação ao lançamento  
 $A_i$  área da seção transversal interna do duto de aço  
 $\nu$  coeficiente de Poisson  
 $A_s$  área da seção transversal externa do duto de aço  
 $E$  módulo de elasticidade  
 $\Delta T$  diferencial de temperatura em relação ao lançamento  
 $\alpha_E$  coeficiente de expansão de temperatura

Em seguida, calcula-se a carga crítica de flambagem, definida como

$$P_{cr} = (1 + CSF)C_2\pi^2 EI / L_{eff}^2 \quad (2.2)$$

com

$$CSF = k_c \left( \frac{EI_{conc}}{EI} \right)^{0,75} \quad (2.3)$$

onde

- $CSF$  fator de rigidez do concreto  
 $C_2$  coeficiente das condições de contorno  
 $EI$  rigidez à flexão do aço  
 $L_{eff}$  comprimento efetivo do vão  
 $k_c$  constante empírica para a rigidez do concreto  
 $EI_{conc}$  rigidez à flexão do concreto

A constante empírica  $k_c$  considera a deformação/deslizamento no revestimento anti-corrosão e as fraturas no revestimento de concreto.

O comprimento efetivo do vão, dado pelo produto do comprimento do vão por um fator de escala, é necessário visto que as condições de contorno nos ombros (*shoulders*) que o duto se apoia estão entre *pinned-pinned* e *fixed-fixed*<sup>2</sup>. Logo, temos que

$$\frac{L_{eff}}{L} = \begin{cases} 4,73 / (-0,066\beta^2 + 1,02\beta + 0,63) & \text{para } \beta \geq 2,7 \\ 4,73 / (0,036\beta^2 + 0,61\beta + 1) & \text{para } \beta < 2,7 \end{cases} \quad (2.4)$$

com

$$\beta = \log_{10} \left( \frac{KL^4}{(1 + CSF)EI_{conc}} \right) \quad (2.5)$$

onde  $L$  é o comprimento real do vão e  $K$  é a rigidez estática ou dinâmica do solo por unidade de comprimento.

Pode-se encontrar o módulo de Young do concreto a partir da expressão

$$E_{conc} = 10000 f_{cn}^{0,3} \quad (2.6)$$

<sup>2</sup> Valores dos fatores  $C_1$  a  $C_6$  estão dispostos na Tabela 6-1 cite[p. 111]DNV2017, e só devem ser utilizados apenas para cenários *single-span*.

onde  $f_{cn}$  é a resistência de fabricação do concreto.

Os parâmetros de rigidez do solo são calculado com base na DNVGL-RP-F114 (Det Norske Veritas, 2017b). A rigidez dinâmica do solo por metro na direção vertical (*cross-flow*) é dada por

$$K_v = \frac{C_v}{1 - \nu_{soil}} \left( \frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D} \quad (2.7)$$

e a rigidez dinâmica do solo por metro na direção lateral (*in-line*) por

$$K_l = C_l(1 + \nu_{soil}) \left( \frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D} \quad (2.8)$$

onde

- $C_v$  fator de rigidez dinâmica do solo na direção vertical
- $C_l$  fator de rigidez dinâmica do solo na direção longitudinal
- $\nu_{soil}$  coeficiente de Poisson do solo
- $\rho_s$  massa específica do duto
- $\rho$  massa específica da água deslocada
- $D$  diâmetro externo do duto (incluindo revestimento)

Caso não seja um dado advindo das medições, ou estimado analiticamente, é necessário calcular a deflexão estática *mid-span*, que é dada por

$$\delta = C_6 \frac{q L_{eff}^4}{EI(1 + CSF)} \frac{1}{S_{eff}/P_{cr}} \quad (2.9)$$

onde  $C_6$  é um coeficiente da condição de contorno e  $q$  é o peso submerso.

A frequência natural fundamental, a ser definida para as direções *in-line* e *cross-flow*, pode ser aproximada a partir de

$$f_1 \approx C_1 \sqrt{1 + CSF} \sqrt{\frac{EI}{m_e} L_{eff}^4} \left( 1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}} + C_3 \left( \frac{\delta}{D} \right)^2 \right) \quad (2.10)$$

onde  $C_1$  e  $C_3$  são coeficientes de condições de contorno e  $m_e$  é a massa efetiva, incluindo a massa estrutural, massa do fluido interno e massa adicional.

Desta forma, o efeito da massa adicional pode ser modelado a partir do coeficiente de massa adicional ( $C_a$ ), que pode ser aplicado para superfícies suaves ou rugosas do duto e deve ser aplicada para frequência natural da água parada, sendo calculado da seguinte forma

$$C_a = \begin{cases} 0,68 + \frac{1,6}{1+5(e/D)} & \text{para } e/D < 0,8 \\ 1 & \text{para } e/D \geq 0,8 \end{cases} \quad (2.11)$$

onde  $e$  corresponde ao *gap* do vão, isto é, a distância entre o duto e o solo marinho.

Além disto, podem-se calcular também a amplitude máxima de tensão para o diâmetro unitário para os modos fundamentais *in-line* (*IL*) e *cross-flow* (*CF*) assim

$$A_{IL/CF,1}^{\max} = 2C_4(1 + CSF) \frac{DEr}{L_{eff}^2} \quad (2.12)$$

em que  $r$  é uma coordenada radial da seção transversal do duto e  $C_4$  é um coeficiente de condição de contorno.

Por fim, finaliza-se esta etapa com o cálculo do fator de redução para corrente,  $R_C$ , que será aplicado na velocidade de referência, sendo calculado assim

$$R_C(z) = R_c \frac{\ln(z) - \ln(z_0)}{\ln(z_r) - \ln(z_0)} \quad (2.13)$$

com o fator de referência dado por

$$R_c = \sin(\theta_{rel})$$

onde  $z$  é a altura acima do solo,  $z_0$  é o parâmetro de rugosidade,  $z_r$  é a altura de medição de referência e  $\theta_{rel}$  é o ângulo formado entre a corrente e o duto.

Podemos utilizar os resultados das equações acima para a construção dos modelos de resposta relacionando a velocidade do fluxo com a amplitude de vibração. Pela DNVGL-RP-F105, as vibrações *in-line* e *cross-flow* devem ser consideradas em modelos de resposta separados.

### 2.1.1 Modelo de resposta *in-line*

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

$$K_S = \frac{4\pi m_e \zeta_T}{\rho_w D^2} \quad (2.14)$$

em que  $\rho_w$  é a densidade da água e  $\zeta_T$  é a taxa de amortecimento modal total. Aplica-se um fator de segurança ao parâmetro de estabilidade,  $K_{Sd} = K_S/\gamma_k$ , sendo  $\gamma_k$  o fator de segurança no parâmetro de estabilidade.

Em seguida, deve-se calcular os fatores de correção para considerar a turbulência e o ângulo de ataque do fluxo

$$\begin{aligned} R_{I\theta,1} &= 1 - \pi^2 \left( \frac{\pi}{2} - \sqrt{2\theta_{rel}} \right) (I_c - 0,03) & 0 \leq R_{I\theta,1} \leq 1 \\ R_{I\theta,2} &= 1 - \frac{I_c - 0,03}{0,17} & 0 \leq R_{I\theta,2} \leq 1 \end{aligned} \quad (2.15)$$

onde  $I_c$  é a intensidade de turbulência.

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 no duto pode ser aproximada a partir da equação

$$U_c = R_c U(z_r) \frac{\ln(e + D/2) - \ln(z_0)}{\ln(z_r) - \ln(z_0)} \quad (2.16)$$



em que  $U(z_r)$  é a velocidade da corrente na altura de referência.

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

$$V_R = \frac{U_c + U_w}{f_n D} \quad (2.17)$$

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

A amplitude de resposta *in-line* depende da (Equação 2.17),  $V_R$ , do parâmetro de estabilidade,  $K_{Sd}$ , da intensidade da turbulência,  $I_c$ , e do ângulo do fluxo,  $\theta_{rel}$ . O modelo de resposta pode então ser construído através do conjunto de equações a seguir

$$\frac{A_{Y,1}}{D} = \max \left( 0, 18 \left( 1 - \frac{K_{Sd}}{1,2} \right) R_{I\theta,1}, \frac{A_{Y,2}}{D} \right) \quad (2.18)$$

$$\frac{A_{Y,2}}{D} = 0, 13 \left( 1 - \frac{K_{Sd}}{1,8} \right) R_{I\theta,2} \quad (2.19)$$

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_{on,IL}} & \text{para } K_{Sd} < 0,4 \\ \frac{0,6+K_{Sd}}{\gamma_{on,IL}} & \text{para } 0,4 \leq K_{Sd} < 1,6 \\ \frac{2,2}{\gamma_{on,IL}} & \text{para } K_{Sd} \geq 1,6 \end{cases} \quad (2.20)$$

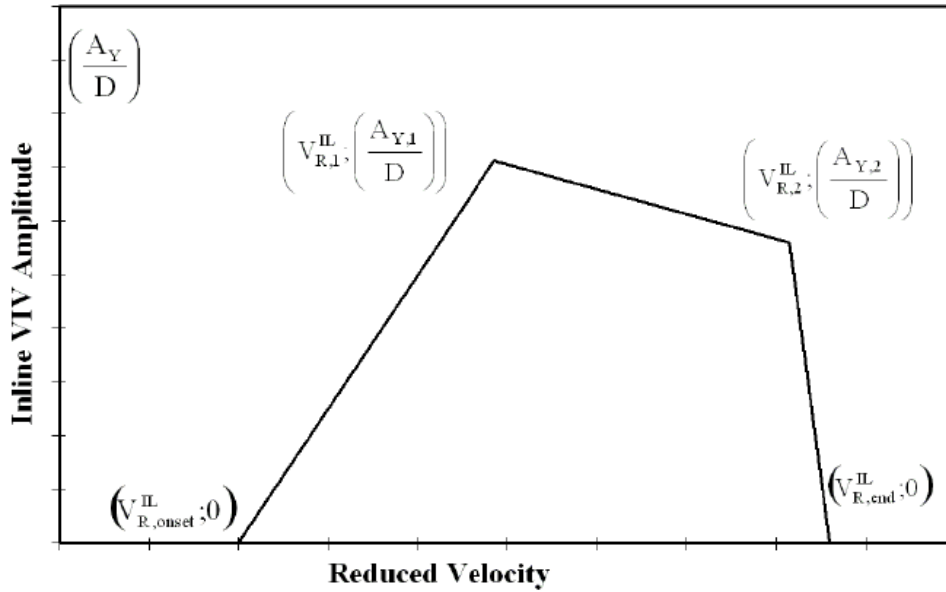
$$V_{R,end}^{IL} = \begin{cases} 4,5 - 0,8K_{Sd} & \text{para } K_{Sd} < 1,0 \\ 3,7 & \text{para } K_{Sd} \geq 1,0 \end{cases} \quad (2.21)$$

$$V_{R,1}^{IL} = 10 \left( \frac{A_{Y,1}}{D} \right) + V_{R,onset}^{IL} \quad (2.22)$$

$$V_{R,2}^{IL} = V_{R,end}^{IL} - 2 \left( \frac{A_{Y,2}}{D} \right) \quad (2.23)$$

onde  $\gamma_{on,IL}$  é o fator de segurança para velocidade de corrente inicial *in-line* e  $\frac{A_Y}{D}$  é a amplitude *in-line* normalizada. Com esses valores calculados, pode-se construir a curva que relaciona velocidade reduzida e amplitude de vibração para diâmetro unitário, semelhante a Figura 4.

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. Temos 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 em

Figura 4 – Curva de modelo de resposta *in-line*.

Fonte: Det Norske Veritas (2017a)

que o parâmetro de estabilidade aumenta, a amplitude de resposta tende à diminuir, uma vez que este é proporcional ao amortecimento do sistema (Equação 2.14).

### 2.1.2 Modelo de resposta *cross-flow*

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

$$\Psi_{proxi,onset} = \begin{cases} \frac{1}{5} (4 + 1,25 \frac{e}{D}) & \text{para } \frac{e}{D} < 0,8 \\ 1 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.24)$$

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

$$\Psi_{trench,onset} = 1 + 0,5 \frac{\Delta}{D} \quad (2.25)$$

onde  $\Delta$  é a profundidade da trincheira.

O número de Keulegan-Carpenter é definido como

$$KC = \frac{U_w}{f_w D} \quad (2.26)$$

onde  $f_w = \frac{1}{T_u}$  é o período de cruzamento da frequência de onda.

A razão de velocidade de fluxo de corrente é dada por

$$\alpha = \frac{U_c}{U_c + U_w} \quad (2.27)$$

A partir dessas equações, se pode construir o modelo de resposta *cross-flow* através do conjunto de equações a abaixo

$$\frac{A_{Z,1}}{D} = \begin{cases} 0,9 & \alpha > 0,8 & \frac{f_{n+1,CF}}{f_{n,CF}} < 1,5 \\ 0,9 + 0,5 \left( \frac{f_{n+1,CF}}{f_{n,CF}} - 1,5 \right) & \alpha > 0,8 & 1,5 \leq \frac{f_{n+1,CF}}{f_{n,CF}} \leq 2,3 \\ 1,3 & \alpha > 0,8 & \frac{f_{n+1,CF}}{f_{n,CF}} > 2,3 \\ 0,9 & \alpha \leq 0,8 & KC > 30 \\ 0,7 + 0,01(KC - 10) & \alpha \leq 0,8 & 10 \leq KC \leq 30 \\ 0,7 & \alpha \leq 0,8 & KC < 10 \end{cases} \quad (2.28)$$

$$\frac{A_{Z,2}}{D} = \frac{A_{Z,1}}{D} \quad (2.29)$$

$$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3 \cdot \Psi_{proxi,onset} \cdot \Psi_{trench,onset}}{\gamma_{on,CF}} \quad (2.30)$$

$$V_{R,end}^{CF} = 16 \quad (2.31)$$

$$V_{R,1}^{CF} = 7 - \frac{7 - V_{R,onset}^{CF}}{1,15} \left( 1,3 - \frac{A_{Z,1}}{D} \right) \quad (2.32)$$

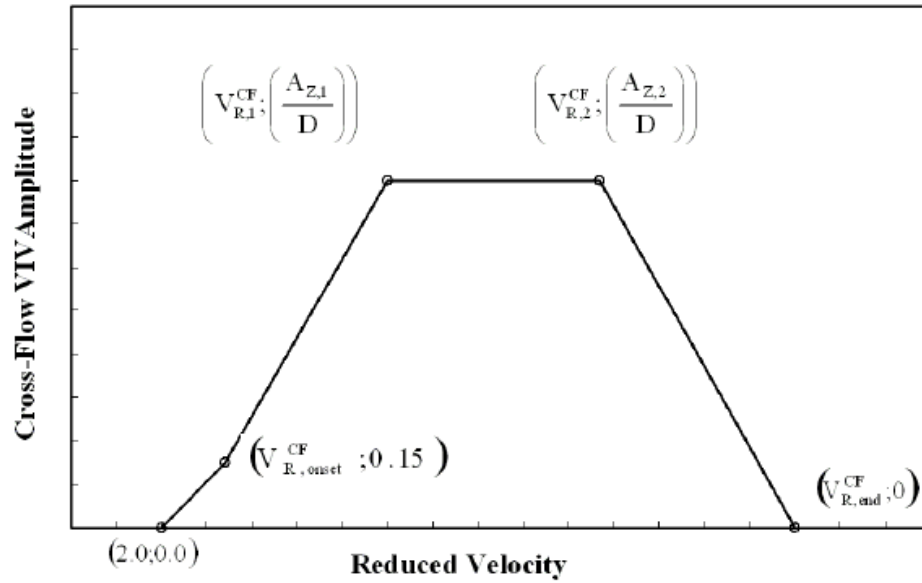
$$V_{R,2}^{CF} = V_{R,end}^{CF} - \frac{7}{1,3} \frac{A_{Z,1}}{D} \quad (2.33)$$

Com esses valores calculados, pode-se construir a curva que relaciona velocidade reduzida e amplitude de vibração para diâmetro unitário, semelhante a Figura 5.

### 2.1.3 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 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:

Figura 5 – Curva de modelo de resposta *cross-flow*.

Fonte: Det Norske Veritas (2017a)

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

$$\begin{aligned} f_{IL,j} &\leq \frac{U_{\text{extreme}} \gamma_{f,IL}}{V_{R,onset}^{IL} D} \\ f_{CF,j} &\leq \frac{U_{\text{extreme}} \gamma_{f,CF}}{2D} \end{aligned} \quad (2.34)$$

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

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

Baseado nos modelos de resposta *single-mode*, podemos calcular as amplitudes do VIV para todos os modos (Equação 2.1.3). 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,  $(A_Z/D)_{\max}$
    - c) Identificam-se os modos fracos  $0,1(A_Z/D)_{\max} \leq (A_Z/D)_j \leq (A_Z/D)_{\max}$
    - d) Desconsidera-se os modos irrelevantes:  $(A_Z/D)_j < 0,1(A_Z/D)_{\max}$
  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:

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

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

$$f_{cyc,CF} = \begin{cases} f_{cyc,CF}^{LKCR}, & S_{comb,CF}^{RM}(x) < S_{comb,CF}^{LKCR}(x) \\ f_{cyc,CF}^{RM}, & S_{comb,CF}^{RM}(x) \geq S_{comb,CF}^{LKCR}(x) \end{cases}$$

- 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 adjacentes considera-se que apenas o “vencedor” da competição 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,

$$S_{comb,IL}(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^{m_{sig}} (S_{IL,j}(x))^2}$$

e a frequência de contagem de ciclos,

$$f_{cyc,IL}(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^{m_{sig}} \left( f_{IL,j}^{con} \cdot \frac{S_{IL,j}(x)}{S_{comb,IL}(x)} \right)^2}$$

## 2.2 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 então 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 seu 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 de análise do comportamento *in-loco* desses duto através do MEF, que será detalhado a seguir.

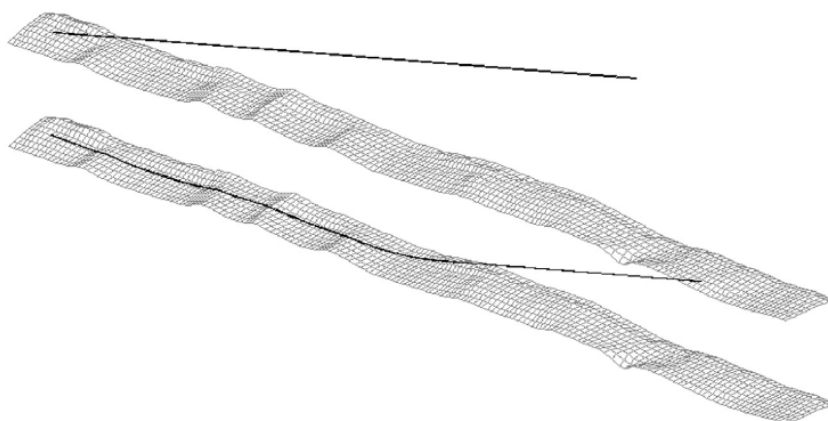
### FLUXOGRAMA

#### 2.2.1 Análise estática

A modelagem da instalação do duto é o primeiro passo para o estudo do comportamento *in-situ* do duto, e visa reproduzir a configuração indeformada do duto assim que lançado sobre a leito marinho. Esta configuração serve como 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, será assumido que o ângulo entre o duto e a horizontal o será nulo, isto é, o duto estará num plano horizontal que desce em direção a superfície batimétrica.

Figura 6 – Modelo de elementos finitos durante o lançamento.



Fonte: Bai e Bai (2014)

Desse modo, o modelo permitirá 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 6 mostra o duto antes e durante o processo de instalação.

A medida que o duto se assenta é necessário garantir um equilíbrio estável entre o duto 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 para representar as diferenças entre os atritos nas direções longitudinal e transversal.

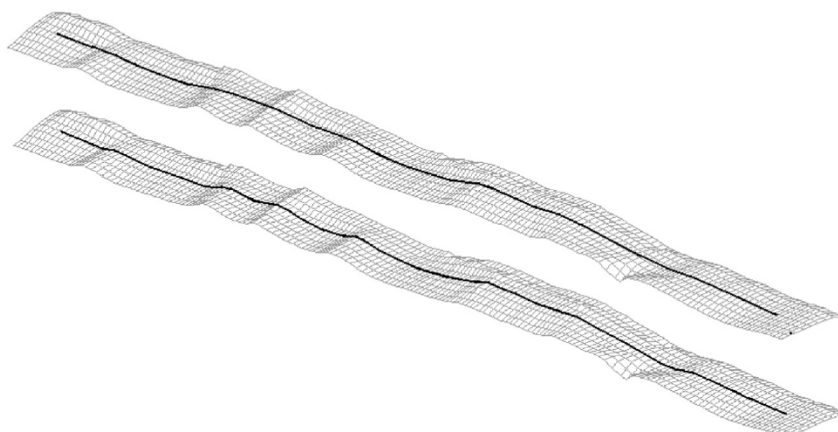
Após a descida do duto, têm-se os processos de alagamento e desalagamento, que acarreta em mudanças no peso submerso do duto e, conseqüentemente, altera na sua configuração. Esses processos podem ser facilmente modelados por uma variação numa carga vertical atuando no duto. Mas, um duto sujeito a essa 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, como mostra a Figura 7.

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 de material seja capaz de representar o comportamento plástico da seção do duto. No trabalho aqui proposto, não serão contempladas nas análises envolvendo 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 estática do conteúdo na extremidade pode ser incluído.



Figura 7 – Modelo com o duto vazio (acima) e alagado (abaixo).



Fonte: Ose et al. (1999)

### 2.2.2 Procedimentos e etapas de carregamento na análise de elementos finitos

Um conceito base no ABAQUS é a divisão do histórico do carregamento 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 análise 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 6)	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 (ver Figura 7)	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 essenciais na análise de fadiga.

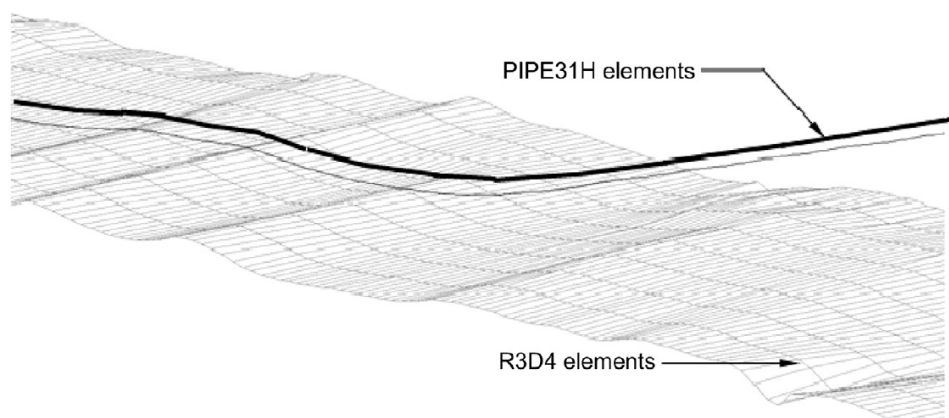
É válido de nota que a análise estática disponível no ABAQUS usada no modelo lida com respostas não lineares de efeitos de grandes deslocamentos, não-linearidade do material e não-linearidades de contorno, como contato, deslizamento e atrito (interação solo-duto). O ABAQUS usa o método de Newton para 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).

### 2.2.3 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 8:

- 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 8 – Tipos de elementos usados no modelo.



Fonte: Bai e Bai (2014)

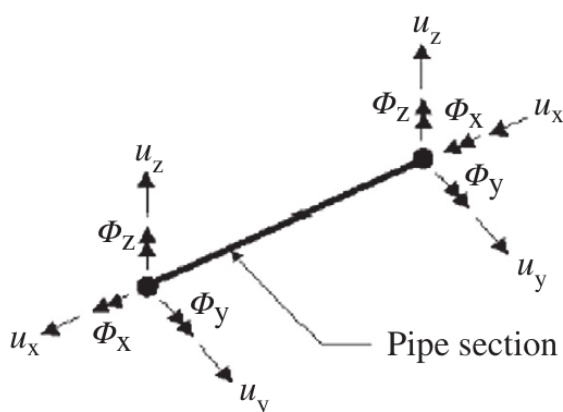
#### 2.2.3.1 Elemento PIPE31/PIPE32

A Figura 9 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 9 – Elemento PIPE31.



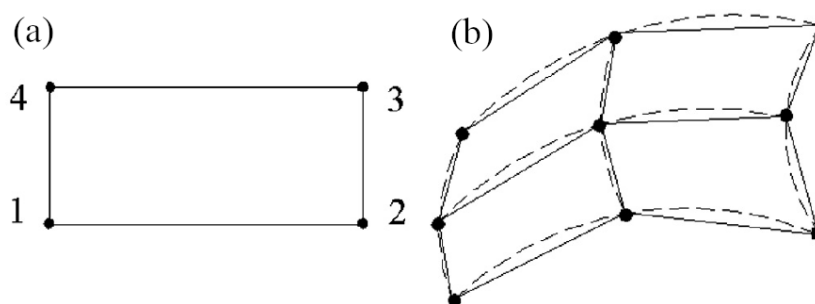
Fonte: Bai e Bai (2014)

### 2.2.3.2 Elemento R3D4

O elemento rígido R3D4 de quatro nós, como mostrado na Figura 10, 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.

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

Figura 10 – Elemento rígido R3D4 (a), e suavização da superfície de elementos (b).



Fonte: Bai e Bai (2014)

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.

### 2.2.3.3 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. Estes 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.

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.

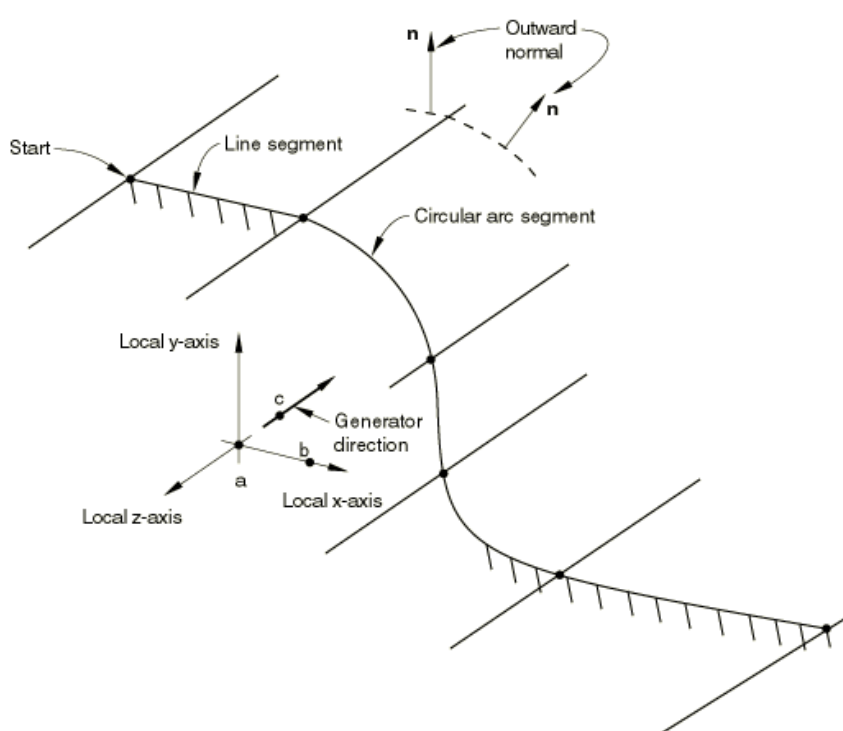
Por outro lado, como desvantagens do uso deste tipo de superfície:

- 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, conforme Figura 11. Para criação desta superfície é necessário fixar os pontos que definem um sistema de coordenadas locais, **a**, **b** e **c**. As coordenadas destes pontos,  $(X_a, Y_a, Z_a)$ ,  $(X_b, Y_b, Z_b)$  e  $(X_c, Y_c, Z_c)$ , são dadas em relação ao sistema de coordenadas global. O ponto **a** define a origem do sistema de coordenadas local; o ponto **b** define o eixo-*x* local e o ponto **c**, que se refere ao eixo-*z* local negativo, define o vetor de geração. Portanto, os segmentos que formam o perfil da superfície rígida são definidos no eixo *x-y* local e a superfície rígida tridimensional, de acordo com o vetor de geração.

Figura 11 – Exemplo de superfície analítica rígida.

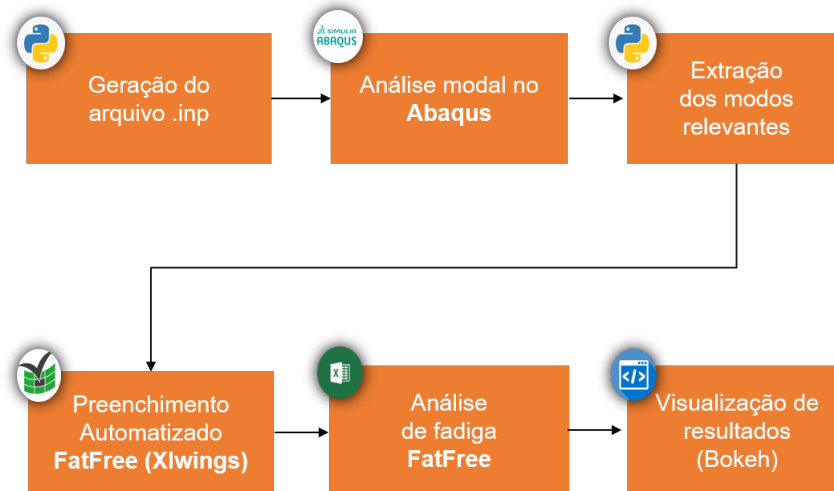


Fonte: SIMULIA (2018)

### 3 MODELAGEM DO SISTEMA COMPUTACIONAL

O levantamento dos requisitos de um sistema é o elemento que fornece elementos que dever nortear uma série de decisões a serem tomadas no seu desenvolvimento. A ferramenta proposta visa agilizar o fluxo de trabalho do profissional que realiza análises de vida a fadiga, ou seja, propõem-se o seguinte fluxo padrão:

Figura 12 – Fluxo de operação proposto para a ferramenta.



De forma mais detalhada, a ferramenta deve:

1. A partir de um arquivo de entrada com informações do modelo, criar arquivos de entrada para o ABAQUS (.inp) que simulem todo o processo de simulação do comportamento do duto apresentado (seção 2.2).
2. Submeter o arquivo gerado para análise no ABAQUS.
3. Processar os arquivos de saída do ABAQUS (.odb) extraíndo os informações relevantes como a configuração deformada, modos de vibração, etc., gerando arquivos em outros formatos de fácil leitura para pós-processamento, tanto por esta ferramenta, quando por outro *softwares*.
4. Pós-processar as as informações gerando gráficos e relatórios relevantes para as tomadas de decisão do usuário quanto ao projeto. Esse é o requisito mais crítico, uma vez que é fundamental o entendimento sobre a análise de tudo em vão livre. Entre as tarefas que fazem parte deste item está a automação da escolha dos modos de vibração ativos e relevantes e para cada vão de interesse – a qual deve ser norteadada pelos aspectos discutidos na subseção 2.1.3 – e a manipulação da FatFree<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Planilha Microsoft Office Excel desenvolvida pela DNV-GL focada no cálculo de vida a fadiga de dutos submarinos.

5. Apresentar os resultados finais na forma de gráficos e relatórios.

### 3.1 Computação científica

Embora o uso e desenvolvimento de softwares de cunho científico seja uma atividade extremamente importante para pesquisadores, nem sempre são observadas boas práticas são observadas no seu desenvolvimento (HANNAY et al., 2009). Wilson et al. (2014) apresenta um conjunto de boas práticas a serem adotadas no desenvolvimento desse tipo de. A seguir é apresentado o resumo do autor sobre essas práticas:

#### **Boas práticas para computação científica**

##### **1. Escreva programas para pessoas, não para computadores.**

- a) Um programa não deve exigir que seus leitores mantenham mais de um punhado de fatos na memória de uma só vez.
- b) Torne os nomes consistentes, distintos e significativos.
- c) Tornar consistente o estilo e a formatação do código.

##### **2. Deixe o computador fazer o trabalho.**

- a) Faça o computador repetir tarefas.
- b) Salve comandos recentes em um arquivo para reutilização.
- c) Use uma ferramenta de construção para automatizar fluxos de trabalho.

##### **3. Faça alterações incrementais.**

- a) Trabalhe em pequenos passos com feedback frequente e correção de rumo.
- b) Use um sistema de controle de versão.
- c) Coloque tudo o que foi criado manualmente no controle de versão.

##### **4. Não se repita (ou repita outros).**

- a) Todos os dados devem ter uma única representação oficial no sistema.
- b) Modularize o código em vez de copiar e colar.
- c) Reutilize o código em vez de reescrevê-lo.

##### **5. Planeje erros.**

- a) Adicione asserções aos programas para verificar seu funcionamento.
- b) Use uma biblioteca de testes unitários pronta para uso.

c) Transforme erros em casos de teste.

d) Use um depurador simbólico.

#### 6. **Otimize o software somente depois que ele funcionar corretamente.**

a) Use um *profiler* para identificar gargalos.

b) Escreva o código na linguagem de nível mais alto possível.

#### 7. **Documente design e finalidade, não a mecânica.**

a) Documente interfaces e razões, não implementações.

b) Refatore o código, em vez de explicar como ele funciona.

c) Incorpore a documentação do software no próprio software.

#### 8. **Colabore.**

a) Use revisões de código de *pré-merge*.

b) Use a programação em pares ao interar alguém novo e ao lidar com problemas particularmente difíceis.

c) Use uma ferramenta de acompanhamento de problemas.

## 3.2 Implementação

Em observância a estas práticas, algumas decisões relativas ao desenvolvimento da ferramenta foram tomadas, e serão apresentadas a seguir.

### 3.2.1 Linguagem de programação

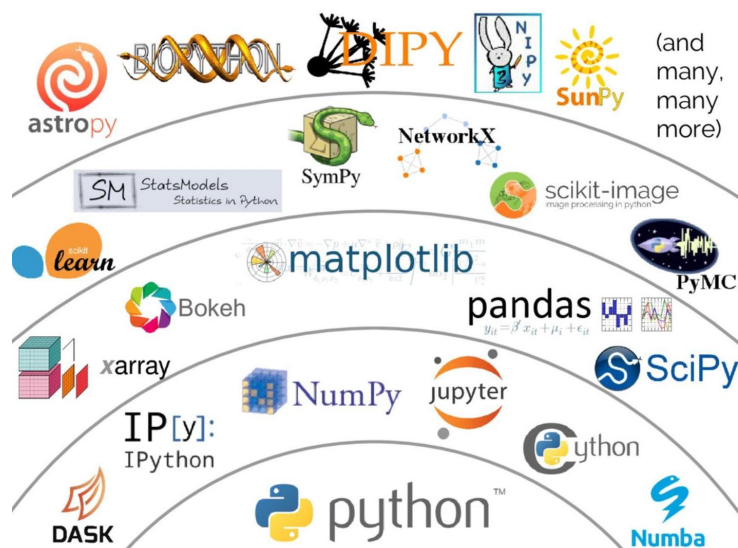
A linguagem adotada será Python<sup>2</sup>. Além de ser uma linguagem interpretada de alto nível Orientada a Objeto – que permite um alto índice de reaproveitamento de código – e da sintaxe simples, Rao (2018) apresenta algumas das principais vantagens que destaca a linguagem para este tipo de aplicação:

- Disponibilidade de bibliotecas para aplicações científicas contemplando manipulação de matrizes (Numpy), funções matemáticas (SciPy), manipulação de dados em forma tabular (Pandas), criação de gráficos interativos (Matplotlib e Bokeh);
- Suporte para automação de tarefas. Os recursos de *script* internos do Python e vários pacotes têm um forte suporte à automação de tarefas. A automação de tarefas repetitivas e a realização do registro de dados são fáceis e requerem pouco esforço.

<sup>2</sup> <https://www.python.org>



Figura 13 – Amostra das principais bibliotecas científicas em Python.



Fonte: Bowne-Anderson (2017)

- Pacotes Python como Django e Flask tornam possível desenvolver e usar o Python como uma API<sup>3</sup> com um *front-end* da web. Essa funcionalidade é particularmente útil ao usar uma infraestrutura baseada em nuvem como plataforma para acessar *back-ends* de computação de alto desempenho (HPC).

### 3.2.2 Estrutura de módulos e classes

Para implementação do fluxo de trabalho proposto para a ferramenta, prevê-se a implementações de módulos para lidar com cada contexto específico. São eles:

- `model_generator`: módulo principal responsável orquestrar o fluxo de trabalho da ferramenta desde o processamento dos dados de entrada, geração dos arquivos para o ABAQUS e os pós-processamentos.
- `odb_handler`: responsável por lidar com os arquivos de saída do ABAQUS (odb) e guardar os dados relevantes em arquivos com formatos de fácil manipulação (CSV, JSON, etc...).
- `mode_selector`: módulo responsável pela estratégia de seleção automática de modos de vibração para cada vão e manipulação dos dados associados vãos e seus respectivos modos.
- `dnv`: módulo que implementa os cálculos do modelos de resposta da DNVGL-RP-F105 e manipula a planilha FatFree por meio da biblioteca xlwings.

<sup>3</sup> Na programação de computadores, uma Interface de Programação de Aplicativos (*Application Programming Interface* – API) é um conjunto de definições de sub-rotinas e ferramentas para a criação de software. Em termos gerais, é um conjunto de métodos de comunicação claramente definidos entre vários componentes.

- `plots`: módulo responsável por agregar as funções de geração de gráficos dos resultados.

Já dentre as principais classes estão:

- `Model`: classe que contém as informações do modelo do problema. A classe armazena todas as informações para construção dos arquivos `.inp`, isto é, dados de batimetria, material, geometria do duto, coeficientes de segurança, entre outros. A instanciamento dessa classe deve ocorrer mediante o processamento de um arquivo principal de entrada com esses dados, possivelmente em formato JSON (Figura 14).

Figura 14 – Aspecto de arquivo principal de entrada no formato JSON

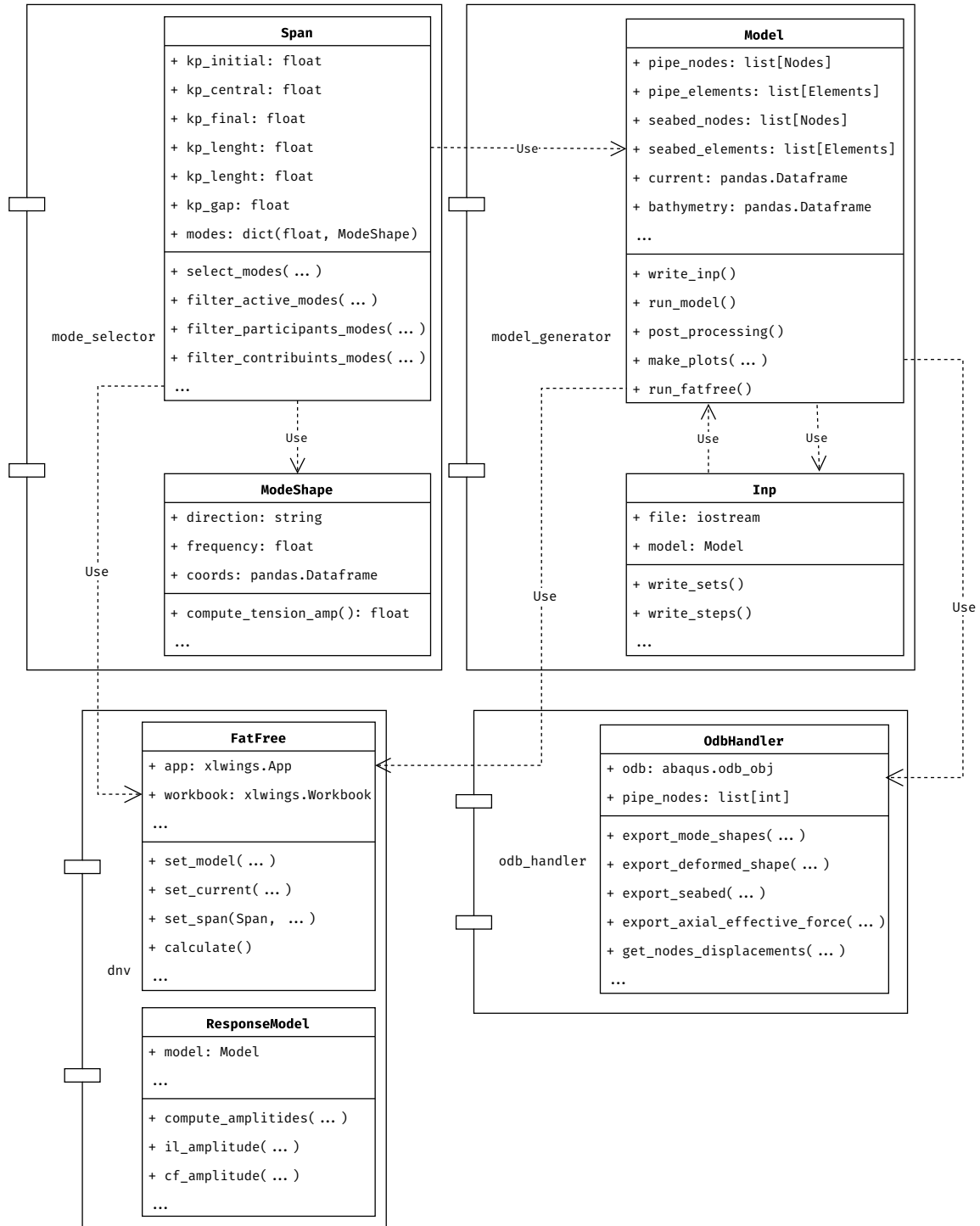
```
{
  "MODEL": {
    "NAME": "Duto_1",
    "BATIMETRIA": "C:/Batimetria/batimetria.csv",
    "RESULTS_FOLDER": "C:/Resultados",
    "SPRING_PIPE_EXTREMITY": 0
  },
  "FILE_BAT": {
    "N_CPU": 12,
  },
  "CONDITIONS": {
    "TYPE_SEABED": "ANALYTICAL",
    "SUPPORTS": true,
  },
  "MODE_SELECTOR": {
    "NODESET": "PIPE",
    "ELEMENTSET": "PIPE",
    "SEABEDSET": "M_FUNDO",
    "SPANS": [
      {
        "kp_inicial": 9958.2,
        "kp_final": 9975.2,
        "azimute": 60.00
      }
    ],
    "N_MODES_IN_LINE": 4,
    "N_MODES_CROSS": 3
  },
  ...
}
```

Fonte: Autor (2019)

- `Inp`: lida com a escrita modularizada de arquivos de entrada para o ABAQUS. A proposta é que se crie um arquivo principal que terá inclusão de outros arquivos acessórios que terão as informações específicas de cada aspecto da modelagem: batimetria, passos de carga, etc.
- `Span`: classe que representa um vão do duto. Dentre os métodos da classe estão os métodos responsáveis pela seleção dos modos de vibração.
- `ModeShape`: classe que representa um modo de vibração (*mode shape*).

A Figura 15 exibe um diagrama UML com esses módulos e classes, suas relações de pertencimento e dependência, e os principais métodos e atributos das classes.

Figura 15 – Diagrama UML dos módulos e classes.



Fonte: Autor (2019)

## REFERÊNCIAS

- BAI, Q.; BAI, Y. *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation*. [S.l.]: Elsevier Inc., 2014. ISBN 978-0-12-386888-6. Citado 7 vezes nas páginas 12, 22, 23, 24, 25, 26 e 27.
- BATCHELOR, G. K. *An Introduction to Fluid Dynamics*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1967. (Cambridge Mathematical Library). ISSN 9780521663960. Citado na página 10.
- BOWNE-ANDERSON, H. *Why Use Python in Scientific Computing?* 2017. Disponível em: <<https://www.datacamp.com/community/blog/python-scientific-computing-case>>. Citado na página 32.
- CURRIE, I. G. *Fundamental Mechanics of Fluids*. Fourth. [S.l.]: Taylor & Francis, 2012. (Civil and Mechanical Engineering). ISSN 9781439874608. Citado na página 10.
- Dassault Systèmes Simulia. *Abaqus Unified FEA - SIMULIA by Dassault Systèmes®*. 2018. Disponível em: <<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>>. Citado na página 23.
- Det Norske Veritas. *DNV GL-RP-F105 Free Spanning Pipelines 2017*. [S.l.], 2017. Citado 3 vezes nas páginas 11, 17 e 19.
- Det Norske Veritas. *DNV GL-RP-F114 Pipe-Soil Interaction for Submarine Pipelines 2017*. [S.l.], 2017. Citado na página 14.
- 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 11.
- GAMINO, M.; ABANKWA, S.; PASCALI, R. FSI methodology for analyzing VIV on subsea piping components with practical boundary conditions. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, v. 7, 2013. Citado na página 7.
- HANNAY, J. E. et al. How do scientists develop and use scientific software? In: *2009 ICSE Workshop on Software Engineering for Computational Science and Engineering*. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2009. p. 1–8. ISBN 978-1-4244-3737-5. Citado na página 30.
- MITTAL, A.; SLAUGHTER, A.; BANSAL, V. *From bytes to barrels: The digital transformation in upstream oil and gas*. 2017. 1–28 p. Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/oil-and-gas/digital-transformation-upstream-oil-and-gas.html><https://www2.deloitte.com/insights/us/en/industry/oil-and-gas/digital-transformation-upstream-oil-and-gas.html><https://dupress.deloitte.com/dup->>. Citado na página 8.
- 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 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- 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 10.

OSE, B. A. et al. A finite-element model for In-Situ behavior of offshore pipelines on uneven seabed and its application to on-bottom stability. *Proceedings of the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference*, II, p. 132–140, 1999. Citado na página 24.

RAO, V. R. *Here's Why You Should Use Python for Scientific Research*. 2018. <https://developer.ibm.com/dwblog/2018/use-python-for-scientific-research/>. Citado na página 31.

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](https://help.3ds.com/2018/English/DSSIMULIA_Established/SIMACAETHERefMap/simathec-nonlinearsol.htm?ContextScope=all&id=f6d8fd0953f64ef794cf56a8990a3493#Pg0). Citado 2 vezes nas páginas 25 e 28.

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 2 vezes nas páginas 10 e 11.

TURA, F. et al. Guidelines for free spanning pipelines: The GUDESP 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 12.

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 2 vezes nas páginas 8 e 10.

WILSON, G. et al. Best Practices for Scientific Computing. *PLOS Biology*, v. 12, n. 1, p. e1001745, jan. 2014. ISSN 1545-7885. Citado na página 30.