

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

WEVERTON MARQUES DA SILVA

**FERRAMENTA INTEGRADA PARA ANÁLISE DE FADIGA EM DUTOS
SUBMARINOS EM VÃO-LIVRE**

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 – Fluxo de avaliação de vida à fadiga em dutos em vão livre.	8
Figura 2 – Modelo de elementos finitos durante o lançamento.	13
Figura 3 – Tipos de elementos usados no modelo.	15
Figura 4 – Elemento PIPE31.	16
Figura 5 – Elemento rígido R3D4 (a), e suavização da superfície de elementos (b). . . .	16
Figura 6 – Exemplo de superfície analítica rígida.	17
Figura 7 – Esteira de Von Kármán.	18
Figura 8 – Duto em Vão livre e direções das oscilações.	19
Figura 9 – Configurações típicas para vãos.	20
Figura 10 – Curva de modelo de resposta <i>in-line</i>	21
Figura 11 – Curva de modelo de resposta <i>cross-flow</i>	22
Figura 12 – Fluxo de operação proposto para a ferramenta.	25
Figura 13 – Diagrama UML dos módulos e classes.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Histórico de carga típico em uma análise de dutos no ABAQUS.	14
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.0.1	Ferramentas existentes	8
1.1	Fluxo de avaliação de vida à fadiga em dutos em vão livre	8
1.1.1	Objetivos	10
2	METODOLOGIA	11
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
3.1	Modelagem numérica de dutos submarinos	12
3.1.1	Análise estática	12
3.1.2	Procedimentos e etapas de carregamento na análise de elementos finitos	13
3.1.3	Tipos de elementos	14
3.1.3.1	Elementos para representação do duto	15
3.1.3.2	Elementos para representação do fundo do mar	15
3.1.3.2.1	Elemento R3D4	15
3.1.3.2.2	Superfície analítica rígida	16
3.2	Vibração induzida por vórtices em vãos livres	18
3.2.1	Modelos de respostas	20
3.2.2	Resposta <i>multi-mode</i>	22
4	MODELAGEM DO SISTEMA COMPUTACIONAL	25
4.1	Linguagem de programação	26
4.1.1	Estrutura de módulos e classes	26
4.1.2	Arquivo de entrada (JSON)	27
	REFERÊNCIAS	37

,

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 seções de duto não suportadas, chamadas de vãos livres, devido à irregularidades do leito marinho, sejam elas pré-existentes durante a instalação ou devido a subsequentes movimentos horizontais de *scouring*¹ de dutos durante a operação.

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.

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. A análise requer o uso de métodos numéricos robustos para seu tratamento, e o Método dos Elementos Finitos (MEF) é amplamente usado nessa tarefa. A configuração de dutos no fundo do mar depende das características topográficas do leito marinho, características do solo, tensão residual de lançamento, rigidez do duto e seu peso submerso.

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 e simular o processo de assentamento (Van den Abeele; BOËL; HILL, 2013).

¹ retirada de solo que suporta o duto devido às intensas correntes de fundo.

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*.

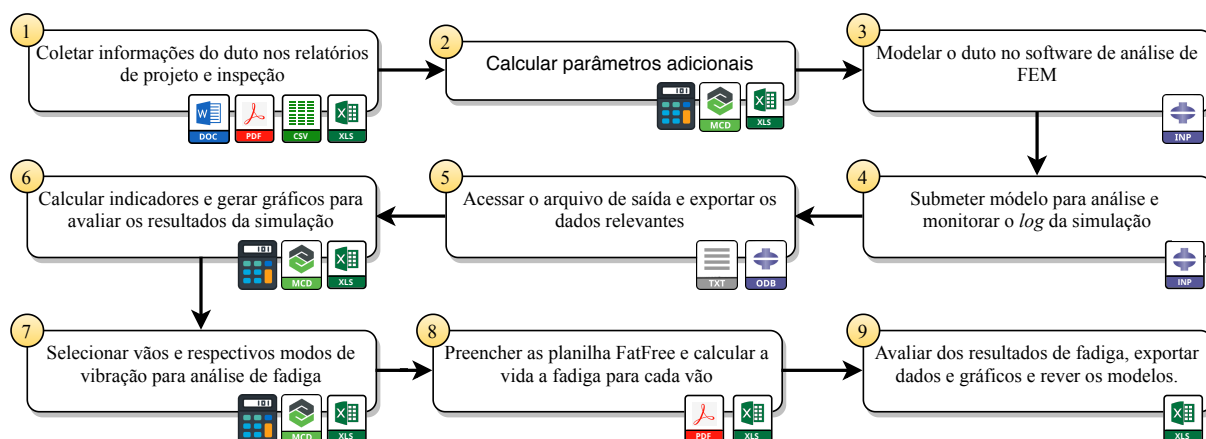
1.0.1 Ferramentas existentes

No cenário mundial existe a tendência da indústria de óleo e gás de investimento em transformação digital em todas as áreas da cadeia, com desenvolvimento de práticas e ferramentas. Esse movimento levou ao surgimento de ferramentas específicas para análise, visualização, predição e resultados de VIV em dutos em vão-livre (MITTAL; SLAUGHTER; BANSAL, 2017).

1.1 Fluxo de avaliação de vida à fadiga em dutos em vão livre

Baseado nos estudos e oficinas realizados para o desenvolvimento deste trabalho. Pôde-se estabelecer que a análise de vida a fadiga em dutos em vão livre compreende o fluxograma apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxo de avaliação de vida à fadiga em dutos em vão livre.



Fonte: Autor (2020)

A seguir, uma breve descrição de cada item:

- (1) Nesta etapa, o profissional reúne as informações básicas para construção dos modelos e outros dados usados em cálculos posteriores. Citadamente, temos aqui: as cotas do perfil do duto e batimetria obtidas na inspeção, geometria e propriedades dos materiais das camadas que compõem sessão do duto, parâmetros do solo, coeficientes de segurança e outras constantes físicas, posição e tipos de suportes ao longo do duto. Essa tarefa envolve olhar uma série de documentos (.doc, .pdf, etc) em busca desses valores, dispostos de forma não estruturada. Quando estruturados, em forma de arquivos CSV ou planilhas, por exemplo, é necessário ainda manipular esses dados a fim de extrair somente a informação necessária e/ou convertê-las no formato apropriado. Um exemplo disso são os dados de batimetria, que precisam convertidos nas coordenadas dos nós de uma malha de elementos

finitos no formato de um arquivo `.inp`. – no caso do Abaqus. De posse desses dados, pode-se então, iniciar a fase de pré-processamento.

- (2) Uma vez que nem todos os dados a serem utilizados estão de acordo com as especificações dos softwares a serem empregados nas análises numéricas, ainda é necessários manipular alguns desses valores, seja calculando constantes ou convertendo unidades. Para isso, geralmente utiliza-se softwares de planilhas e/ou folhas de cálculos (Microsoft Excel, MathCad, Maple, etc.). Esta etapa inicia o pré-processamento dos dados.
- (3) Com todos os dados em mãos, é necessário transformá-los em um modelo no software de elementos finitos, via interação com mouse e teclado (GUI²), ou criando arquivos de entrada. Embora a reutilização de arquivos de entrada previamente criados facilite esse tarefa, nem todos os trechos desses arquivos são suficientes ou podem ser reaproveitados. Estas limitações são frequentes em trechos do arquivo que precisam ser repetidos a depender da quantidade de certas entidades no modelo – suportes, por exemplo. Ao fim desta etapa, encerra-se o pré-processamento dos dados.
- (4) Por mais simples que seja submeter o modelo para análise na maioria dos softwares de análise de elementos (alguns cliques via GUI, ou um comando via CLI³), as análises costumam levar horas e envolver execuções sucessivas a fim de realizar intervenções no modelo que não podem ser modeladas previamente. Dessa forma, torna-se necessário o monitoramento do progresso da simulação. Esta etapa compreende a primeira parte do processamento propriamente dito.
- (5) Uma vez concluída a simulação Análise de Elementos Finitos (AEF), é necessário analisar os resultados antes do pós-processamento. Por vezes, é preciso extrair os resultados que estão armazenados em arquivos proprietários (como `.odb`, no caso do Abaqus), utilizando as funcionalidades das ferramentas dos próprios pacotes de software de elementos finitos para isso. Esta tarefa, geralmente feita via GUI, costuma ser repetitiva e pode levar de alguns minutos ou horas. Esta etapa inicia parte do pós-processamento da AEF.
- (6) De posse dos resultados em formatos acessíveis a outros software (MS Excel e MathCad, por exemplo), é necessário calcular (e muitas vezes visualizar em gráficos) alguns indicadores a fim de avaliar a validade dos resultados. Embora poderosos, estes softwares ainda carecem de gráficos mais interativos, como possibilidades de ampliar e transladar os gráficos com o mouse. Esta etapa encerra o pós-processamento da AEF.
- (7) Na metodologia presente na DNVGL-RP-F105 – que será abordada adiante no subseção 3.2.2 – o cálculo de fadiga é baseada em modelos de resposta, portanto, é necessário calcular a resposta de cada modo para as várias condições de carregamento ambiental, o que a torna impraticável sem automação. Para solucionar este problema, foi criada a FatFree, um planilha de cálculo comercial que realiza estas operações. No entanto, dentre as dezenas de modos obtidos por solução modal na AEF costumam aparecer modos espúrios. Dessa forma, antes de realizar a análise na FatFree, é necessário escolher dentre os modos de vibração obtidos na simulação numérica aqueles que mais contribuem para fadiga. Esta tarefa pode ser feita via inspeção visual, observando a forma dos modos, mas é uma prática mas pouco precisa e subjetiva.

² Graphical User Interface

³ Command Line Interface

- (8) Um vez selecionados os modos a serem usados para cálculo de fadiga, é necessário o preenchimento da planilhas com os dados de deflexão normalizada de cada modos, o que consiste uma centenas de valores. Além disso, é necessário preencher muitas outras informações referentes geometria e propriedades dos materiais da sessão do duto, parâmetros do solo, coeficientes de segurança e condições de carregamento em várias páginas diferentes. Com todos os dados preenchidos e opções selecionadas nos controles da planilha, pode-se apertar o botão que calcula os resultados de fadiga.
- (9) Finalmente, os dados de fadiga pode ser analisados e exportados para outras ferramentas a fim de gerar relatórios.

1.1.1 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:

- Contribuir para a metodologia de análise de fadiga em dutos por meio da criação de uma metodologia de seleção de modos de vibração;
- Modelar e implementar a ferramenta utilizando o paradigma da programação orientada a objetos, através da linguagem *Python*;
- 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.

2 METODOLOGIA

Uma vez que o trabalho pretende desenvolver uma ferramenta que facilite o fluxo de trabalho do profissional que avalia a vida a fadiga de dutos em vão live, foi necessário, como etapas iniciais do trabalho, realizar:

- Revisar a literatura acerca dos temas nos quais esse profissional lida nesta tarefa – modelagem do assentamento de dutos e vibração induzida por vórtice – a fim de nivelar os conhecimentos básicos necessário para o próximo item.
- Entender o fluxo básico de trabalho de profissional, desde o acesso às informações até chegar nos resultados de fadiga. Nessa etapa, é que foram identificados os principais gargalos do processo, destacando aqueles de maior potencial de automatização.
- Inteirar-se das funcionalidades e formas de manipulação das ferramentas usadas nas tarefas de análise, como o Abaqus e a planilha FatFree.

Inicialmente, a revisão da literatura foi feita por meio de leitura de livros, artigos e referências/recomendações técnicas. Aqui se destacaram a DNVGL-RP-F105, em matéria de VIV, e o livro de Bai e Bai (2014), na parte de modelagem. Ambos os textos são referências mundiais no assunto, como milhares de citações em outros trabalhos, sendo a DNVGL-RP-F105 a principal referência no assunto que se propõe.

A etapa de análise do fluxo de trabalho, e parte da etapa de revisão da literatura, foram realizadas por meio de reuniões e oficinas ministrados pelos próprios profissionais no decorrer do desenvolvimento do projeto IntegriSpan. Cada encontro foi uma oportunidade de diagnosticar novos itens a serem trabalhados, definindo assim os requisitos da ferramenta a ser desenvolvida, e chegando ao modelo de fluxo de trabalho apresentado mais adiante.

Superada esta fase de revisão da literatura e algumas oficinas, houve o desenvolvimento de uma série de *scripts* em linguagem Python para automação de algumas tarefas. Essa fase, de caráter exploratório, permitiu o desenvolvimento de pequenas ferramentas que podiam ter feedback mais rápido, melhorando o entendimento dos requisitos e compressão da visão geral do fluxo de trabalho. Essa forma de trabalho, com *loops* de desenvolvimento com feedbacks rápidos, influenciou fortemente a adoção de uma linguagem dinâmica para desenvolvimento (ver Capítulo 4).

Tendo em mãos um conjunto inicial de *scripts*, fez-se então a modelagem dos módulos da aplicação com base nas diferentes funcionalidades previstas para a ferramenta. Os códigos dos *scripts* foram, então, reagrupados nesses módulos, e que se comunicam por meio da utilização das diversas classes e respectivos métodos. Paralelamente a esta etapa, deu-se a elaboração da especificação do arquivo de entrada para facilitar a passagem de informações à aplicação.

Finalmente, fez-se a validação da ferramenta usando dados de dutos reais da PETROBRAS. No entanto, devido à confidencialidade destes dados, neste trabalho não serão apresentados os casos usados à validação, mas casos com dados fictícios para exemplificar as funcionalidades da ferramenta.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 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.

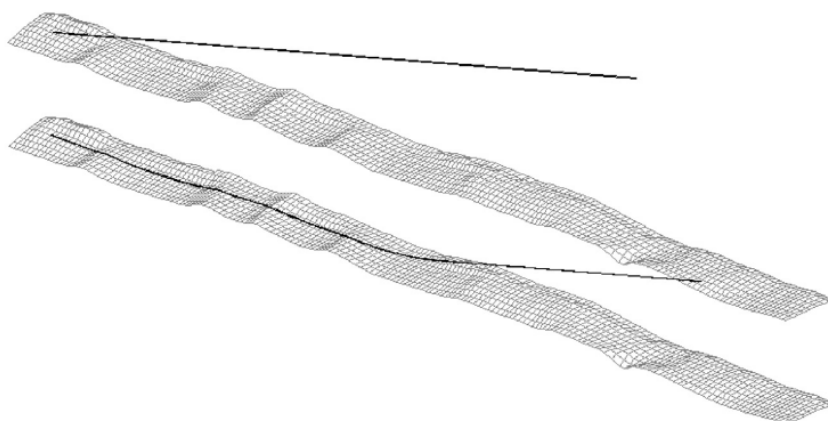
FLUXOGRAMA

3.1.1 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

Figura 2 – Modelo de elementos finitos durante o lançamento.



Fonte: Bai e Bai (2014)

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 2 mostra o duto antes e durante o processo de instalação.

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.

3.1.2 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 2)	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.

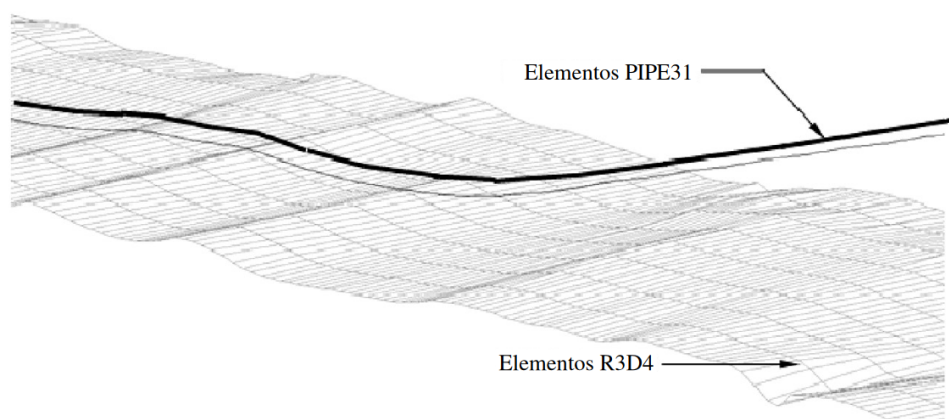
É válido de nota que a análise estática disponível no ABAQUS usada no modelo lida com respostas não lineares de efeitos de grandes deslocamentos, não-linearidade do material e não-linearidades de contorno, como contato, deslizamento e atrito (interação solo-duto). O ABAQUS usa o método de Newton para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

3.1.3 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 3:

- 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 3 – Tipos de elementos usados no modelo.



Fonte: Bai e Bai (2014)

3.1.3.1 Elementos para representação do duto

A Figura 4 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.

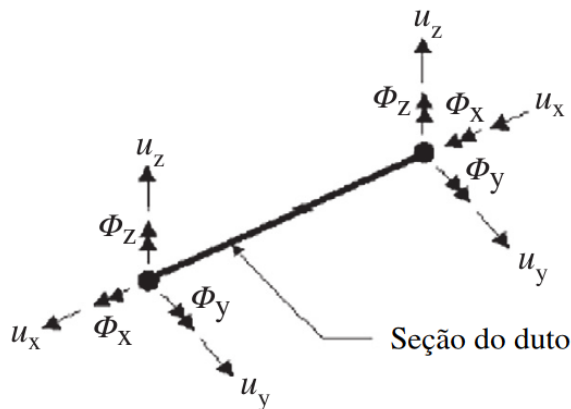
O elemento está disponível com uma seção circular vazada de paredes finas e suporta a possibilidade de o usuário especificar pressão externa ou interna. Elementos de paredes espessas também estão incluídos no ABAQUS. O elemento também pode considerar alterações na área da seção do duto devido ao alto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

3.1.3.2 Elementos para representação do fundo do mar

3.1.3.2.1 Elemento R3D4

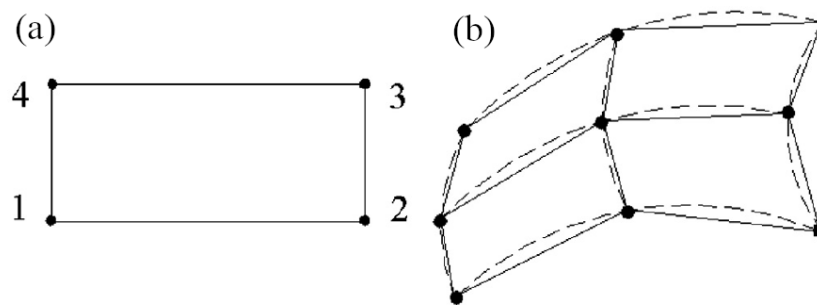
O elemento rígido R3D4 de quatro nós, como mostrado na Figura 5, possibilita modelar superfícies complexas com geometria arbitrária e é geralmente escolhido ao modelar a topografia do fundo do mar. Uma característica muito importante do ABAQUS ao modelar o fundo do mar tem sido a possibilidade de suavizar 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 PIPE31.



Fonte: Bai e Bai (2014)

Figura 5 – 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.

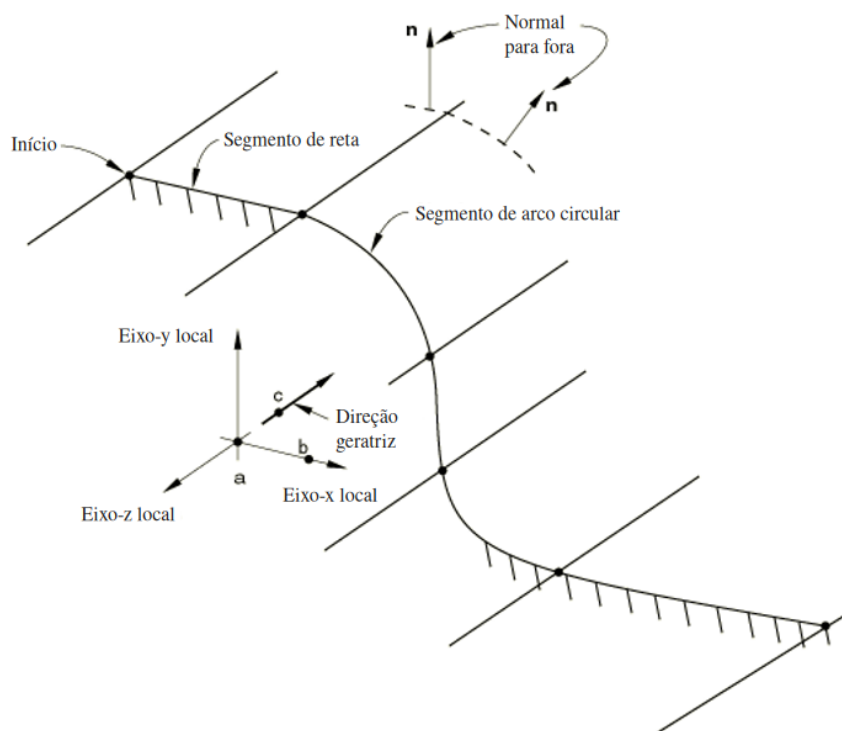
Um conjunto de elementos R3D4 que definem o fundo do mar é usado como a superfície principal chamada para aplicações de contato com os elementos do duto. Isso significa que um par de contatos (solo-duto) é definido e um modelo de interação é especificado. Esse modelo de interação geralmente consiste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

3.1.3.2.2 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 6. 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 6 – 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:

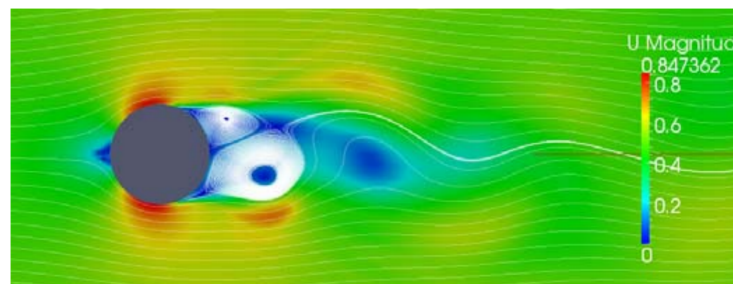
- Uma superfície analítica rígida sempre agirá como superfície *master* em uma interação de contato, impossibilitando que se modele o contato entre duas superfícies rígidas analíticas.
- Forças de contato e pressões não podem ser plotadas em uma superfície rígida analítica, apenas na superfície *slave*.
- 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.

3.2 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 7. 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 7 – 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

$$S_t = (fL)/V \quad (3.1)$$

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 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,

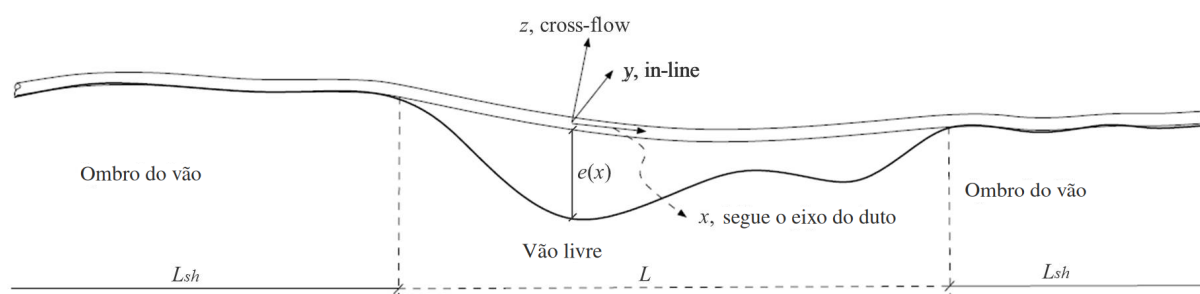
$$Re = (UD)/\nu \quad (3.2)$$

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 8.

Figura 8 – Duto em Vão livre e direções das oscilações.



Fonte: Adaptado de Det Norske Veritas (2017)

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.

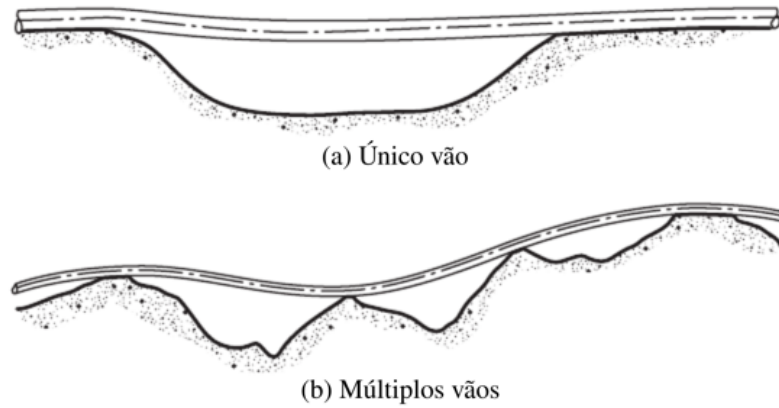
A DNVGL-RP-F105 é uma referência técnica adotada mundialmente no estudo de dutos em vão livre. Nele está presente uma metodologia baseada em modelos de resposta a fim de avaliar a fadiga causada por VIV. Estes modelos representam relações empíricas entre a velocidade reduzida (Equação 3.4) e a amplitude 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.

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

A DNVGL-RP-F105 pode ser aplicada para vãos únicos e múltiplos onde um modo de vibração é predominante (*single-mode*), conforme a Figura 9. 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 9 – Configurações típicas para vãos.



Fonte: Adaptado de Bai e Bai (2014)

3.2.1 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 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

$$U_c = R_c U(z_r) \frac{\ln(e + D/2) - \ln(z_0)}{\ln(z_r) - \ln(z_0)}, \quad (3.3)$$

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

$$V_R = \frac{U_c + U_w}{f_n D}, \quad (3.4)$$

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

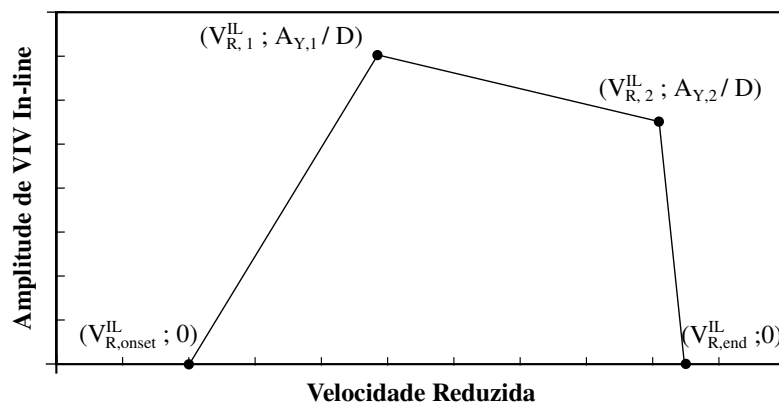
O parâmetro de estabilidade K_S , representa o amortecimento para uma dada forma modal, sendo obtido a partir da equação

$$K_S = \frac{4\pi m_e \zeta_T}{\rho_w D^2}, \quad (3.5)$$

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 10, onde as coordenadas dos pontos são dados nas equações do item 4.6.4 da DNVGL-RP-F105.

Figura 10 – 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 3.5).

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

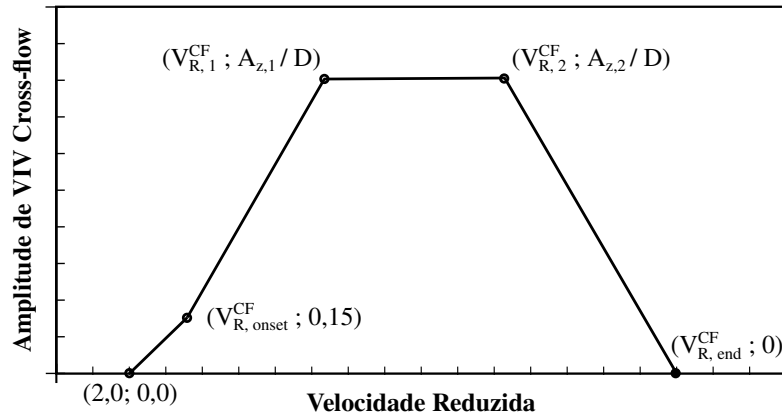
$$\Psi_{proxi,onset} = \begin{cases} \frac{1}{5} \left(4 + 1,25 \frac{e}{D} \right) & \text{para } \frac{e}{D} < 0,8 \\ 1 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.6)$$

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

$$\Psi_{trench,onset} = 1 + 0,5 \frac{\Delta}{D} \quad (3.7)$$

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 11, onde as coordenadas dos pontos são dados nas equações do item 4.6.4 da DNVGL-RP-F105.

Figura 11 – Curva de modelo de resposta *cross-flow*.

Fonte: Adaptado de Det Norske Veritas (2017)

3.2.2 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 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:

$$\begin{aligned} f_{IL,j} &\leq \frac{U_{extreme} \gamma_{f,IL}}{V_{R,onset}^{IL} D} \\ f_{CF,j} &\leq \frac{U_{extreme} \gamma_{f,CF}}{2D} \end{aligned} \quad (3.8)$$

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

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

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. 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 $S_{IL}^{\text{max}}(x)$

- c) Identificam-se potenciais modos fracos: $0,1S_{IL}^{\max}(x) \leq S_{IL,j}^P(x) \leq S_{IL}^{\max}(x)$
 - d) Desconsideram-se os modos irrelevantes: $S_{IL,j}^P(x) < 0,1S_{IL}^{\max}(x)$
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:

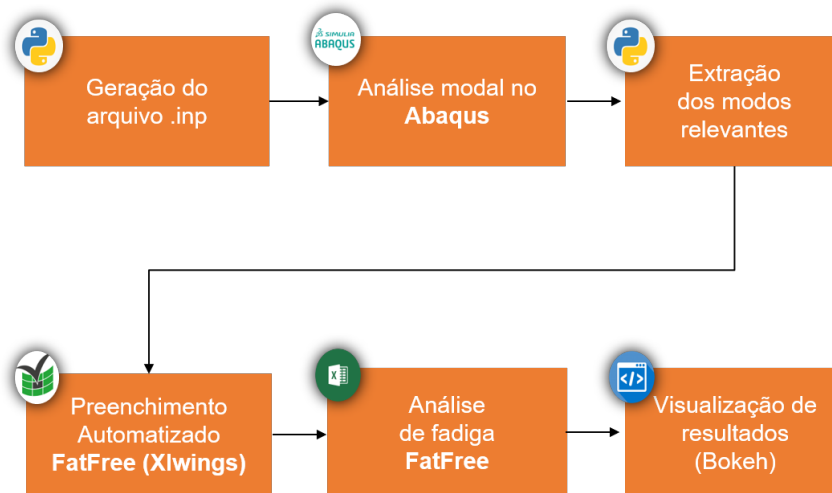
$$S_{CF-IL}(x) = 0,8 \cdot A_{IL,k}(x) \cdot \left(\frac{A_z}{D} \right)_{\max} \cdot R_k \cdot \gamma_s$$

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.

4 MODELAGEM DO SISTEMA COMPUTACIONAL

O levantamento dos requisitos de um sistema é o elemento que fornece elementos que deve 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 reproduza todo o processo de simulação do comportamento do duto apresentado (seção 3.1).
2. Submeter o arquivo gerado para análise no Abaqus.
3. Processar os arquivos de saída do Abaqus (.odb) extraindo 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, quanto por outro *softwares*.
4. Pós-processar 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 duto 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 3.2.2 – e a manipulação da FatFree¹.
5. Apresentar os resultados finais na forma de gráficos e relatórios.

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

4.1 Linguagem de programação

Python² foi a linguagem de programação adotada. 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. O Abaqus, por exemplo, permite modelagem e acesso a informações em arquivos de saída via Python. A biblioteca xlwings permite manipulação planilhas Excel, a exemplo da FatFree.
- Pacotes Python como Django e Flask tornam possível desenvolver e usar o Python como uma API³ com um *front-end* da web. Essa funcionalidade é particularmente útil para reaproveitamento da ferramenta em outras aplicações.

4.1.1 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.
- `plots`: módulo responsável por agregar as funções de geração de gráficos dos resultados.

Já dentre as principais classes estão:

² <https://www.python.org>

³ 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.

- **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 instânciação dessa classe deve ocorrer mediante o processamento de um arquivo principal de entrada com esses dados, em formato JSON (subseção 4.1.2).
- **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 mode de vibração (*mode shape*).

A Figura 13 exibe um diagrama UML com esses módulos e classes, suas relações de pertencimento e dependência, e os principais métodos e atributos das classes.

4.1.2 Arquivo de entrada (JSON)

JSON é um formato de arquivo em texto puro que representa informações atribuindo um nome (ou rótulo) que descreve o seu significado e a seguir, o seu valor. Esta sintaxe de representação é derivada da forma utilizada pelo JavaScript para representar informações. Muito mais que um formato de arquivo, é um modelo para armazenamento e transmissão de informações no formato texto e que é bastante utilizado por aplicações *Web*. A representação de informações utilizada em arquivos `json` é muito simples e sua forma de estruturação é bem mais compacta do que a que normalmente é feita em arquivos XML, o que torna o processamento das informações muito mais rápido.

A seguir descreve-se brevemente a estruturação do arquivo de entrada, apresentado nas listagens abaixo. O arquivo foi feito pensando na facilidade do usuário em reconhecer os rótulos e preenchê-los de forma fácil e prática. O arquivo compreende informações que servirão tanto para a análise do Abaqus(construindo um ou mais arquivos `.inp`) quanto para a FatFree.

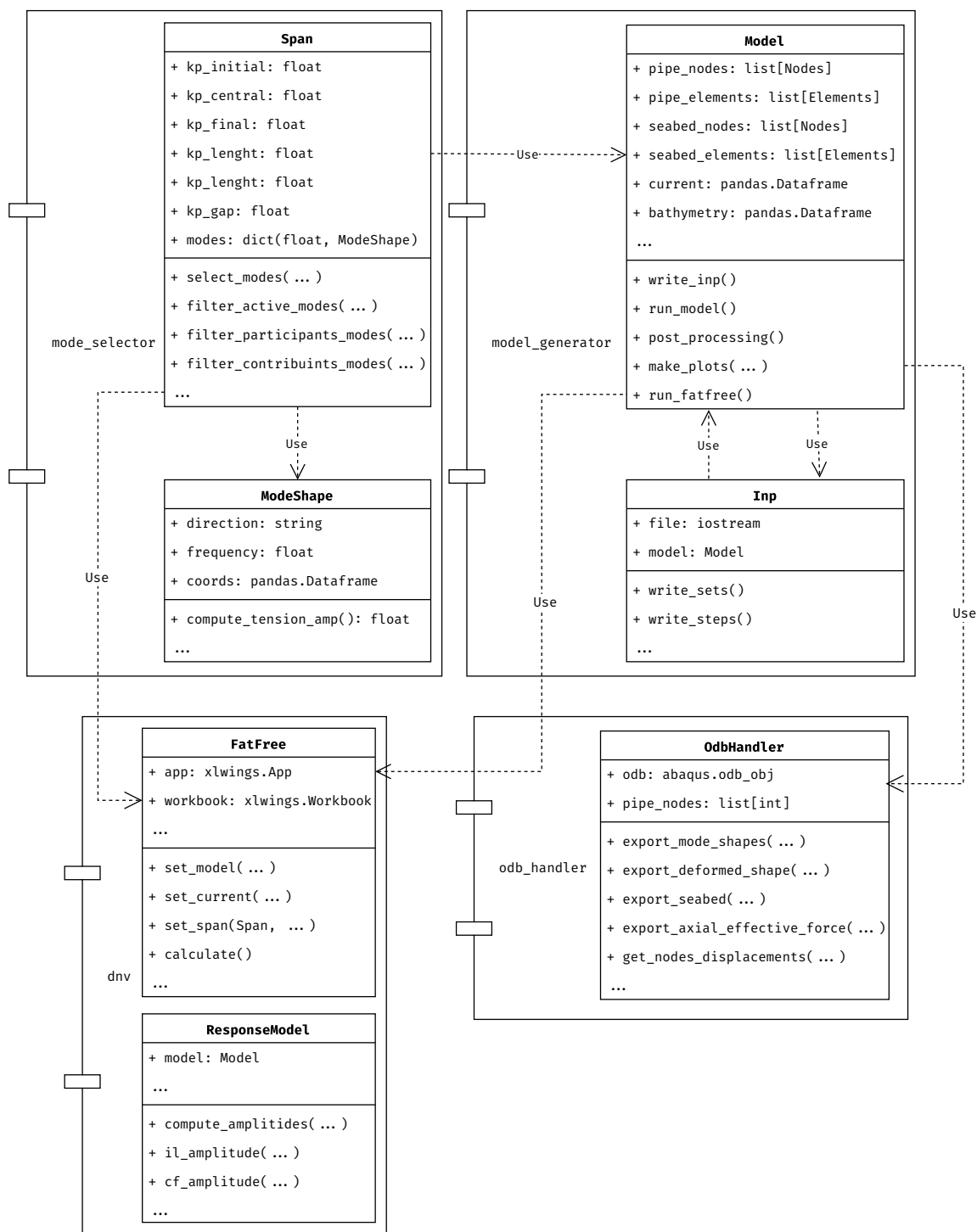
Listing 4.1 – Exemplo de arquivo de entrada de dados - Parte 1/7

```

1 {
2   "MODEL": {
3     "NAME": "Duto_Piloto_X",
4     "BATIMETRIA": "C:/Batimetria/batimetria.csv",
5     "RESULTS_FOLDER": "C:/Resultados",
6     "SPRING_PIPE_EXTREMITY": 0
7   },
8   "FILE_BAT": {
9     "CPU": 12,
10    "GPU": 12,
11    "INTERACTIVE": 0
12  },
13  "CONDITIONS": {
14    "TYPE_SEABED": 1,
15    "CURTAIN_SPRINGS": 0,

```

Figura 13 – Diagrama UML dos módulos e classes.



Fonte: Autor (2019)

```

16     "RUN_MODEL": 1,
17     "POST_PROCESSING": 1,
18     "ISIGHT": 0,
19     "SUPPORTS": true,
20     "DELETE_FOLDER": false
21 },
22 "MODE_SELECTOR": {

```

```

23     "NODESET": "PIPE",
24     "ELEMENTSET": "PIPE",
25     "SEABEDSET": "M_FUNDO",
26     "SPANS": [
27         {
28             "kp_inicial": 9958.2,
29             "kp_final": 9975.2,
30             "azimute": 60.00
31         }
32     ],
33     "N_MODES_IN_LINE": 4,
34     "N_MODES_CROSS": 3
35 },
36 \dots

```

1. "MODEL": dados gerais do modelo, como:
 - a) "NAME" (string): nome do arquivo;
 - b) "BATIMETRIA" (string): indicação do arquivo de batimetria;
 - c) "RESULTS_FOLDER" (string): indicação do caminho para armazenamento dos resultados;
 - d) "SPRING_PIPE_EXTREMITY" (int): indicação da extremidade onde será colocada a mola, a mesma na qual foi aplicada a tração residual de lançamento.
2. "FILE_BAT": para ser usado na performance da simulação.
 - a) "CPU": número de núcleos disponíveis para simulação;
 - b) "GPU": número de núcleos da placa gráfica disponíveis para simulação;
 - c) "INTERACTIVE": garante que as simulações ocorram sequencialmente, e não simultaneamente.
3. "CONDITIONS": configurações gerais do modelo:
 - a) "TYPE_SEABED": 0 - Batimetria modelada com elementos do tipo R3D4. 1 - Batimetria modelada como superfície analítica,
 - b) "CURTAIN_SPRINGS": 0 - A rigidez do solo é prescrita. 1 - A rigidez vertical é modelada como molas do tipo *spring*.
 - c) "RUN_MODEL": 0 - Utilizar o programa apenas para pós-processamento. 1 - rodar o modelo no Abaqus.
 - d) "POST_PROCESSING": 0 - Rodar apenas a simulação no Abaqus. 1 - Após a simulação, iniciar diretamente o pós processamento.
 - e) "ISIGHT": chama diretamente o iSight caso seja necessário um processo de otimização ou DOE.
 - f) "SUPPORTS": false - não há suportes no modelo. true - indica que o modelo contém suportes.
 - g) "DELETE_FOLDER": true - apaga a pasta de resultados e cria uma nova com os dados da nova simulação. false - não apaga a pasta de resultados.

4. "MODE_SELECTOR": indica os dados necessários para o módulo de seleção de frequências.
- a) "NODESET": indica o *nodeset* referente ao duto;
 - b) "ELEMENTSET": indica o *elset* referente ao duto;
 - c) "SEABEDSET": indica o set referente à batimetria;
 - d) "SPANS": indica os vãos que serão submetidos ao pós-processamento.
 - e) "N_MODES_IN_LINE": indica o número de nós que serão extraídos na direção *in-line*.
 - f) "N_MODES_CROSS": indica o número de nós que serão extraídos na direção *cross-flow*.

Listing 4.2 – Exemplo de arquivo de entrada de dados - Parte 2/7

```

36  "ISIGHT": {
37      "EXTRACTION_POINTS": [
38          1431.8,
39          1775.7
40      ]
41  },
42  "PIPE_GEOMETRY": {
43      "INITIAL_KP": 0,
44      "END_KP": 1000,
45      "LAUNCH_HEIGHT": -100,
46      "LENGTH_ELEMENT": 0.25
47  },
48  "AUXILIARY_NODE": {
49      "OFFSET_NODE_SPRING": 3,
50      "INCREASE_FICTION_PLAN_X": 100,
51      "INCREASE_FICTION_PLAN_Y": 10
52  },
53  "CURTAIN_SPRINGS": {
54      "HEIGHT": -60,
55      "STIFFNESS": [
56          [
57              -207904,
58              -1
59          ],
60          [
61              0,
62              0
63          ],
64          [
65              0,
66              1
67          ]
68      ]
69  },

```

1. "ISIGHT": fornece os dados para pós-processamento no iSight.

- a) "EXTRACTION_POINTS": indica os pontos que serão analisados no iSight.
- 2. "PIPE_GEOMETRY": indica as informações relativas ao duto, como: comprimento, altura de lançamento e tamanho do elemento.
 - a) "INITIAL_KP": ponto de início do duto a ser modelado;
 - b) "END_KP": ponto final do duto modelado;
 - c) "LAUNCH_HEIGHT": altura de lançamento do duto, sob o qual será modelado a superfície fictícia;
 - d) "LENGTH_ELEMENT": comprimento do elemento do tipo PIPE31 utilizado na modelagem do duto.
- 3. "AUXILIARY_NODE": fornece os dados para a criação de nós auxiliares.
 - a) "OFFSET_NODE_SPRING": define o *offset* para a alocação da mola;
 - b) "INCREASE_FICTION_PLAN_X": aumento lateral do plano fictício na extremidade inicial;
 - c) "INCREASE_FICTION_PLAN_Y": aumento lateral do plano fictício na extremidade final;
- 4. "CURTAIN_SPRINGS": caso o modelo seja simulado com cortina de molas, é necessário passar os dados para sua modelagem.
 - a) "HEIGHT": cota vertical inicial das molas;
 - b) "STIFFNESS": dados de rigidez das molas.

Listing 4.3 – Exemplo de arquivo de entrada de dados - Parte 3/7

```

70  "PIPE_MATERIAL": {
71      "DENSITY": 9850.0,
72      "ELASTICITY_MODULE": 2.07e11,
73      "POISSON": 0.3,
74      "COEFFICIENT_EXPANSION": 1.17e-5,
75      "YIELD_STRESS": 4.15e8,
76      "PLASTIC_DEFORMATION": 0.00,
77      "EXTERNAL_RADIUS": 0.200,
78      "THICKNESS": 0.0150
79  },
80  "SPRING_STIFFNESS": {
81      "INITIAL": [
82          [
83              -1.0001e9,
84              -10.0
85          ],
86          [
87              1.0001e9,
88              10.0
89          ]
90      ],
91      "END": [
92          [

```



```

93         -1.0001e9,
94         -10.0
95     ],
96     [
97         1.0001e9,
98         10.0
99     ]
100 ]
101 },

```

1. "PIPE_MATERIAL": fornece as propriedades do duto.

- a) "DENSITY": densidade;
- b) "ELASTICITY_MODULE": módulo de elasticidade;
- c) "POISSON": coeficiente de *Poisson*;
- d) "COEFFICIENT_EXPANSION": coeficiente de expansão térmica;
- e) "YIELD_STRESS": limite de escoamento do aço;
- f) "PLASTIC_DEFORMATION": limite de escoamento;
- g) "EXTERNAL_RADIUS": raio externo do duto;
- h) "THICKNESS": espessura da parede duto.

2. "SPRING_STIFFNESS": fornece os dados da rigidez das molas nas extremidades do duto.

- a) "INITIAL": dados da mola da extremidade inicial;
- b) "END": dados da mola da extremidade final.

Listing 4.4 – Exemplo de arquivo de entrada de dados - Parte 4/7

```

102 "CONTACT_PIPE_SEABED": {
103     "HCRIT": 10000,
104     "ELASTIC_SLIP": 0.001,
105     "FRICTION_COEFF_1": 0.6,
106     "FRICTION_COEFF_2": 0.8,
107     "STABILIZE": 1e-8,
108     "STIFFNESS": [
109         [
110             0,
111             0
112         ],
113         [
114             1000,
115             1
116         ]
117     ]
118 },
119 "CONTACT_PIPE_PLAN": {
120     "HCRIT": 10000,
121     "ELASTIC_SLIP": 0.001,
122     "EXTENSION_ZONE": 0.2,

```

```

123     "FRICTION_COEFF_1": 0,
124     "FRICTION_COEFF_2": 0.8,
125     "STABILIZE": 1e-8,
126     "STIFFNESS": [
127         [
128             0,
129             0
130         ],
131         [
132             1000,
133             0.1
134         ]
135     ]
136 },

```

1. "CONTACT_PIPE_SEABED": fornece as propriedades do contato entre o duto e a superfície referente à batimetria.
 - a) "HCRIT": define quanto a superfície *slave* pode penetrar na superfície *master* antes que o Abaqus abandone o incremento atual e tente novamente com um incremento menor;
 - b) "ELASTIC_SLIP": escoamento elástico permissível a ser usado no método de rigidez para aderência à fricção
 - c) "FRICTION_COEFF_1": coeficiente de atrito;
 - d) "FRICTION_COEFF_2": coeficiente de atrito;
 - e) "STABILIZE": parâmetro de estabilidade do contato;
 - f) "STIFFNESS": dados de rigidez do solo, para interação duto-solo.
2. "CONTACT_PIPE_PLAN": fornece as propriedades do contato entre o duto e a superfície fictícia.

Listing 4.5 – Exemplo de arquivo de entrada de dados - Parte 5/7

```

137     "STEPS_DEFAULTS": {
138         "MAXIMUM_INCREMENT_NUMBER": 10000,
139         "AUTOMATIC_STABILIZATION": 1.0e-8,
140         "INITIAL_SIZE_INCREMENT": 0.0001,
141         "TOTAL_STEP_TIME": 0.01,
142         "MINIMUM_INCREMENT_SIZE": 1.0e-30,
143         "MAXIMUM_INCREMENT_SIZE": 0.01
144     },
145     "STEP_1": {
146         "EMPTY_SUBMERSE_WEIGHT": 1.4
147     },
148     "STEP_2": {
149         "INITIAL_SIZE_INCREMENT": 0.1,
150         "TOTAL_STEP_TIME": 2.1,
151         "MAXIMUM_INCREMENT_SIZE": 2.1,
152         "EXTERNAL_PRESSURE": 103542.25,
153         "EFFECTIVE_DIAMETER": 0.4523
154     },

```

```

155 "STEP_3": {
156     "INITIAL_SIZE_INCREMENT": 0.001,
157     "RELEASE_TRACTION": 35000.00
158 },
159 "STEP_4": {
160     "MAXIMUM_INCREMENT_NUMBER": 100000,
161     "DISPLACEMENT_FICTITIOUS_PLANE": -200.00
162 },
163 "STEP_5": {},
164 "STEP_6": {},
165 "STEP_7": {},
166 "STEP_8": {
167     "INITIAL_SIZE_INCREMENT": 0.1,
168     "TOTAL_STEP_TIME": 24.93,
169     "MAXIMUM_INCREMENT_SIZE": 5.00,
170     "INTERNAL_PRESSURE": 3654453.0,
171     "WEIGHT_SUBMERGED_FLOODED": 2.62
172 },

```

1. "STEPS_DEFAULTS": reúne as informações recorrentes em todos os passos de carga (*steps*) no arquivo *.inp.
 - a) "MAXIMUM_INCREMENT_NUMBER": define o máximo de incrementos para o *step*;
 - b) "AUTOMATIC_STABILIZATION": parâmetro de estabilização para casos onde há contato;
 - c) "INITIAL_SIZE_INCREMENT": valor inicial do incremento;
 - d) "TOTAL_STEP_TIME": tempo total no *step*;
 - e) "MINIMUM_INCREMENT_SIZE": número mínimo de incrementos para o *step*;
 - f) "MAXIMUM_INCREMENT_SIZE": número máximo de incrementos para o *step*.
2. "STEP_X": informação específica para cada *step* conforme os passos de carga anteriormente citados. Caso existam informações específicas do suporte, essas informações devem ser passadas respectivamente. Caso contrário, são utilizadas as informações do "STEP_DEFAULTS".

Listing 4.6 – Exemplo de arquivo de entrada de dados - Parte 6/7

```

173 "STEP_9": {
174     "INITIAL_SIZE_INCREMENT": 0.1,
175     "TOTAL_STEP_TIME": 24.93,
176     "MAXIMUM_INCREMENT_SIZE": 5
177 },
178 "STEP_10": {
179     "INITIAL_SIZE_INCREMENT": 0.1,
180     "TOTAL_STEP_TIME": 15.12,
181     "MAXIMUM_INCREMENT_SIZE": 5,
182     "WEIGHT_SUBMERGED_OPERATIONAL": 0.85,
183     "OPERATION_PRESSURE": 1265413
184 },
185 "STEP_11": {
186     "NUMBER_MODES": 100,

```

```

187     "MAXIMUM_NUMBER_INTERACTIONS": 200
188 },
189 "SUPPORTS": {
190     "FILE_DEFORMED_IN_LOCO": "D:/Batimetria/arquivo_survey.eff",
191     "SHIFT_SURFACE": 10,
192     "STEP": 7,
193     "LIST": [
194         [
195             [
196                 845,
197                 1
198             ]
199         ],
200         [],
201         [],
202         []
203     ],
204 },
205 "STEP_NODAL_FIX": {},
206 "STEP_SURFACE_SUPPORTS": {},

```

1. "SUPPORTS": reúne as informações referentes à posição dos suportes.
 - a) "FILE_DEFORMED_IN_LOCO": caminho para o arquivo de *topping*. O arquivo é utilizado como base de comparação para alocação dos suportes;
 - b) "SHIFT_SURFACE":
 - c) "STEP": *step* a partir do qual serão alocados os suportes;
 - d) "LIST": lista de suportes de acordo com o tipo implementado. São passados o KP centro do suporte e o comprimento do mesmo.
 - i. No primeiro conjunto de colchetes são passados suportes do tipo *grout bag*, posicionados abaixo do duto;
 - ii. Em seguida, suportes do tipo *manta*, posicionados acima do duto;
 - iii. No terceiro colchete, suportes mecânicos do tipo pino (restrição de deslocamentos transversais ao eixo do duto e as rotações nodais).
 - iv. Por fim, suportes mecânicos do tipo livre (restrição de deslocamento transversal ao eixo do duto)
2. "STEP_NODAL_FIX": *Step* no qual serão aplicadas as restrições nodais, relacionadas aos diferentes tipos de suporte. Chave vazia refere-se aos valores passados na *keyword* STEPS_DEFAULTS.
3. "STEP_SURFACE_SUPPORTS": *Step* no qual as superfícies analíticas referentes aos suportes são posicionadas. Pode-se incluir as chaves presentes na chave STEPS_DEFAULTS para modificar os valores .

Listing 4.7 – Exemplo de arquivo de entrada de dados - Parte 7/7

```

207 "FATFREE": {
208     "CURRENT_FILE": "D:/Corrente/arquivo_de_corrente.csv",

```

```

209     "ISIGHT_FILE": "D:/Resultados/DutoX_trecho3/isight.txt",
210     "h": 165,
211     "L": 70,
212     "e": 0.88,
213     "d": 0,
214     "teta_pipe": 0,
215     "z_structure": 0.005,
216     "z_soil_in_line": 0.02,
217     "z_soil_cross_flow": 0.014,
218     "z_hRM": 0,
219     "Kv": 1.33e7,
220     "KL": 1e7,
221     "Kv_s": 2.5e5,
222     "SCF": 1,
223     "kc": 0,
224     "fcu": 42,
225     "k": 0.0033,
226     "p": 124.54,
227     "DT": 0.02062,
228     "Ds": 0.3238,
229     "t_concrete": 0,
230     "t_coating": 0.003,
231     "r_steel": 7850,
232     "r_concrete": 0,
233     "r_coating": 935,
234     "r_cont": 200,
235     "Turbulence_intensity_Ic": 0.04,
236     "Measurement_ref_Height_zr": 5,
237     "On_bottom_roughness_z0": 0.00004,
238     "Time_between_independent_current_events": 1.0,
239     "Flag": false
240 }
241 }

```

1. "FATFREE": passa os dados necessários para preenchimento da FatFreevia *xlwings*.

- a) "CURRENT_FILE": indica caminho para o arquivo de corrente, retirado das ETs fornecidas pela na forma de histograma. A rotina realiza os cálculos necessários para incluir os dados na *sheet Current* da planilha de cálculo;
- b) "ISIGHT_FILE": indica o caminho onde será salvo o arquivo *.txt com os dados que serão utilizados para o pós-processamento no iSight;
- c) "Flag": permite o usuário escolher se os dados de rigidez (Kv, KL e Kv_s) serão os passados pelo usuário acima ou extraídos do Abaqus.

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 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 20.
- BATCHELOR, G. K. *An Introduction to Fluid Dynamics*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1967. (Cambridge Mathematical Library). ISSN 9780521663960. Citado na página 18.
- CURRIE, I. G. *Fundamental Mechanics of Fluids*. Fourth. [S.l.]: Taylor & Francis, 2012. (Civil and Mechanical Engineering). ISSN 9781439874608. Citado na página 18.
- 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 13.
- Det Norske Veritas. *DNV GL-RP-F105 Free Spanning Pipelines 2017*. [S.l.], 2017. Citado 3 vezes nas páginas 19, 21 e 22.
- 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 19.
- 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.
- 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 18 e 19.
- 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 18.
- 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 26.
- 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 14 e 17.

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 18.

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 19.

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 7 e 18.