

WEVERTON MARQUES DA SILVA

**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

# 1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

## 1.1 Modelagem numérica de dutos submarinos

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

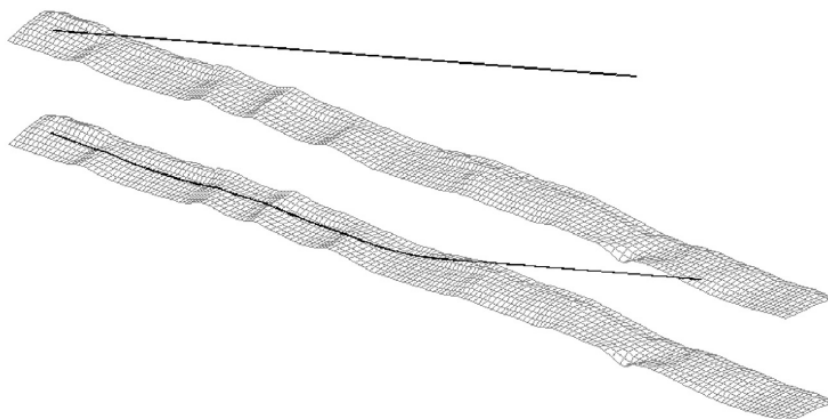
Bai e Bai (2014) apresentam o processo de análise do comportamento *in-loco* desses duto através do MEF, que será detalhado a seguir.

### FLUXOGRAMA

#### 1.1.1 Análise estática

A modelagem da instalação do duto é o primeiro passo para o estudo do comportamento *in-situ* do duto, 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

Figura 1 – Modelo de elementos finitos durante o lançamento.



Fonte: Bai e Bai (2014)

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. Desso 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 1 mostra o duto antes e durante o processo de instalação.

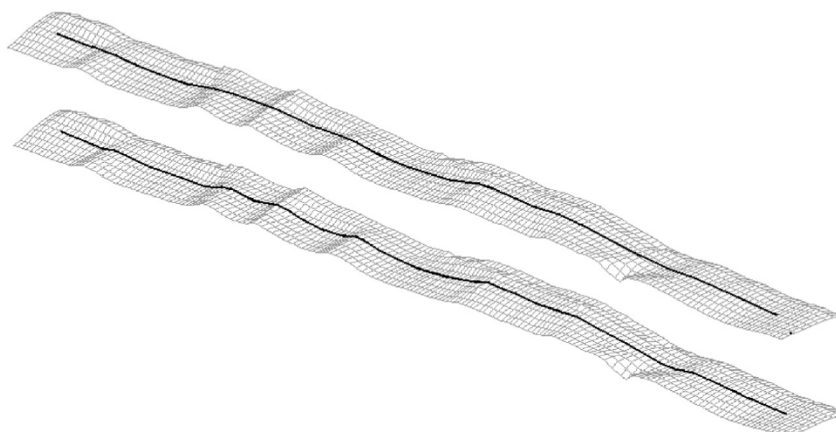
A medida que o duto se assenta é necessário garantir um equilíbrio estável entre o duto e o solo, o que é feito mediante um modelo representativo dessa iteração, no qual deve-se definir o atrito e rigidez do leito marinho. No ABAQUS (Dassault Systèmes Simulia, 2018), pode-ser relacionar a penetração 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 2.

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

Figura 2 – Modelo com o duto vazio (acima) e alagado (abaixo).



Fonte: Ose et al. (1999)

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.

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

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

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).

### 1.1.3 Tipos de elementos

O Abaqus dispõe de alguns tipos de elementos a serem usados no modelo do sistema de solo-duto com elementos finitos, conforme a Figura 3:

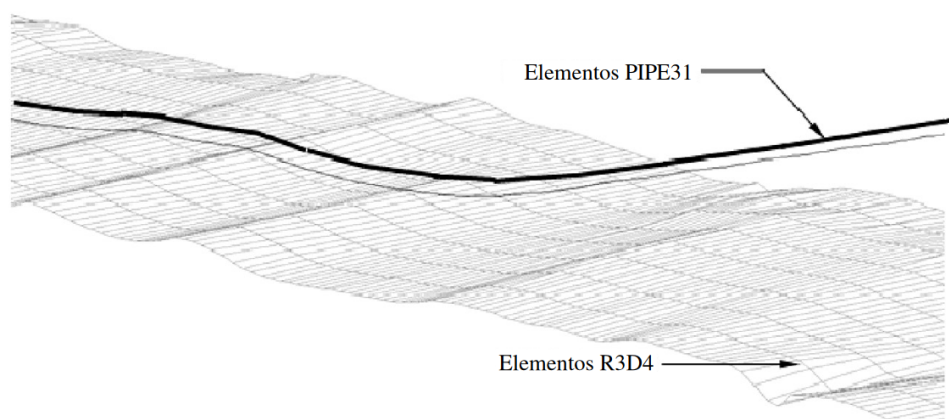
Tabela 1 – Histórico de carga típico em uma análise de dutos no ABAQUS.

Passo	Ação	Análise
1	Aplicação de peso próprio e empuxo do duto	Estática
2	Aplicação de pressão externa hidrostática	Estática
3	Aplicação de tensão leiga	Estática
4	Assentamento do duto no fundo do mar (ver Figura 1)	Estática
5	Remoção dos elementos de guincho	Estática
6	Modificando condições de contorno para a condição de instalação	Estática
7	Enchimento de água para condições alagadas (ver Figura 2)	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).

- 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)

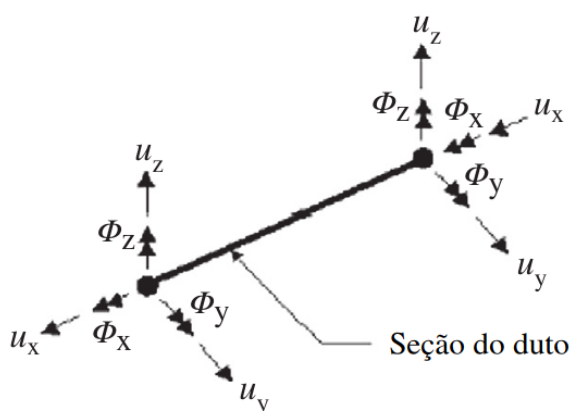
### 1.1.3.1 Elemento PIPE31/PIPE32

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.

Figura 4 – Elemento PIPE31.



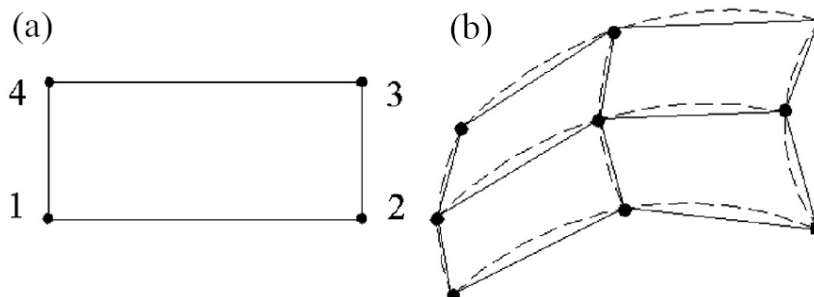
Fonte: Bai e Bai (2014)

### 1.1.3.2 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 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.

### 1.1.3.3 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.

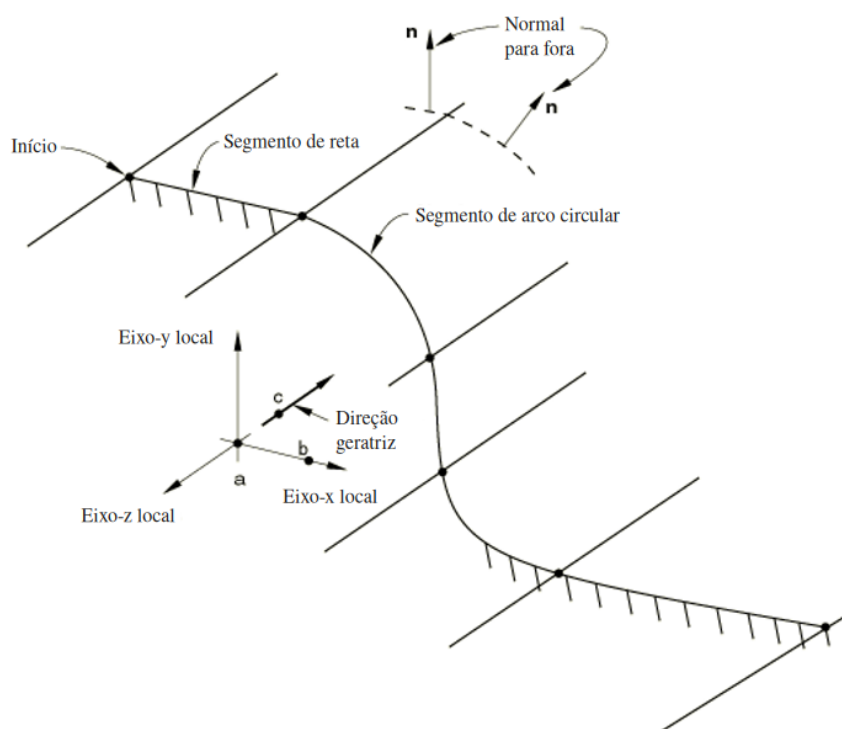
- Menor custo computacional decorrente do algoritmo de contato.

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 6. 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 6 – Exemplo de superfície analítica rígida.





## REFERÊNCIAS

BAI, Q.; BAI, Y. *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation*. [S.l.]: Elsevier Inc., 2014. ISBN 978-0-12-386888-6. Citado 5 vezes nas páginas 2, 3, 5, 6 e 7.

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 3.

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 4.

SIMULIA. *Nonlinear Solution Methods in Abaqus/Standard*. 2018. [https://help.3ds.com/2018/English/DSSIMULIA\\_Established/SIMACAETHERefMap/simathec-nonlinear-sol.htm?ContextScope=all&id=f6d8fd0953f64ef794cf56a8990a3493#Pg0](https://help.3ds.com/2018/English/DSSIMULIA_Established/SIMACAETHERefMap/simathec-nonlinear-sol.htm?ContextScope=all&id=f6d8fd0953f64ef794cf56a8990a3493#Pg0). Citado 2 vezes nas páginas 4 e 8.