

3.01.02 - Engenharia Civil / Estruturas.

## ESTUDO PARAMÉTRICO EM DUTOS RÍGIDOS COM VÃOS LIVRES POR MEIO DE TÉCNICAS DE DOE

Matheus A. Miranda<sup>1</sup>, Emerson A. F. Santos<sup>2</sup>, Josué D. da Silva Neto<sup>3</sup>, Eduardo S. S. da Silveira<sup>4</sup>

1. Estudante de graduação do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas
2. Mestre em Engenharia de Estruturas e pesquisador do LCCV da Universidade Federal de Alagoas
3. Engenheiro de Petróleo e pesquisador do LCCV da Universidade Federal de Alagoas
4. Professor Doutor do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas/Orientador

### Resumo

A extensão dos sistemas de dutos submarinos cresceu proporcionalmente aos avanços e descobertas de novos campos de petróleo e gás em regiões *offshore*. Diante dessa expansão, os dutos apresentaram trechos em vãos livres cada vez maiores, o que representa um risco à integridade estrutural deles, uma vez que estão submetidos às cargas oriundas das vibrações induzidas por vórtices. Sendo assim, simulações numéricas são realizadas visando conhecer os parâmetros mais influentes no problema, acarretando um grande custo computacional. O uso de técnicas de *Design of Experiments* é uma alternativa que possibilita a redução do número de simulações. Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo paramétrico de dutos em vão livre usando procedimentos de DOE, utilizando a modelagem de elementos finitos baseada em uma prática recomendada amplamente utilizada e avaliando as técnicas mais adequadas para a análise do problema.

**Palavras-chave:** VIV; Free-Span; Simulação.

**Apoio financeiro:** Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

**Trabalho selecionado para a JNIC:** UFAL.

### Introdução

Sistemas de dutos são amplamente utilizados no transporte de hidrocarbonetos por se mostrarem confiáveis e econômicos. A descoberta de campos de petróleo e gás em regiões afastadas da costa exigiu dutos cada vez mais extensos (PEREIRA, 2017).

Em projetos de dutos submarinos, deve-se investigar o leito marinho a fim de definir o traçado do duto, o que pode ser realizado por meio de levantamentos e coleta de dados geotécnicos e oceanográficos. As irregularidades presentes no solo provocam situações em que o duto não se encontra totalmente apoiado e esses trechos são chamados vãos livres (LIMA, 2007).

Essa situação gera um risco à integridade estrutural dos dutos, pois pode expô-los ao fenômeno de vibrações induzidas por vórtices (VIV). Quando não é possível evitar trechos em vão livre, verificações são realizadas a partir de normas e práticas recomendadas, principalmente em relação ao comprimento admissível do vão (FU *et al.*, 2018).

Sendo assim, simulações numéricas devem ser realizadas para a concepção de projetos aceitáveis, o que exige um alto custo computacional. Uma alternativa que visa reduzir o número dessas simulações é a utilização de procedimentos de *Design of Experiments* (DOE) ou Planejamento de Experimentos. As técnicas de DOE possibilitam o conhecimento das variáveis mais influentes em um determinado problema, o que pode otimizar processos e reduzir a variabilidade do problema em questão (MONTGOMERY, 2012).

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo paramétrico de dutos rígidos em vão livre utilizando diferentes procedimentos de Planejamento de Experimentos e comparando os resultados obtidos.

### Metodologia

Utilizou-se a prática recomendada DNVGL-RP-F105 (2017) como base para a modelagem em elementos finitos do duto, realizada por meio do programa comercial Abaqus®. Vedeld, Sollund e Fyrileiv (2018) avaliaram as melhorias propostas pela versão mais nova dessa prática recomendada baseados em estudos de caso de projeto e operação de dutos.

Os parâmetros fixos adotados para o duto analisado nesse trabalho encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros fixos do duto analisado.

Parâmetro	Valor
Espessura do revestimento anticorrosivo (mm)	10,0
Espessura de revestimento (mm)	70,0
Coeficiente de Poisson	0,3
Densidade do revestimento anticorrosivo (kg/m <sup>3</sup> )	910,0
Densidade do revestimento (kg/m <sup>3</sup> )	700,0
Densidade da água do mar (kg/m <sup>3</sup> )	1025,0
Densidade do fluido interno (kg/m <sup>3</sup> )	916,0
Pressão de operação (kgf/cm <sup>2</sup> )	150,0
Profundidade (m)	500,0
Altura de referência (m)	10,0

Fonte: Autor (2021).

Os procedimentos de DOE utilizados foram: experimento fatorial completo, experimento fatorial fracionário e amostragem por hipercubo latino. As técnicas foram aplicadas utilizando o programa comercial Isight®. A variável resposta adotada foi o esforço axial efetivo na seção central do trecho do duto em vão livre, que foi modelado como viga e cujas frequências naturais de vibração e demais parâmetros podem ser aproximados por meio da formulação presente no trabalho de Fyrileiv e Mørk (2002) e também na DNVGL-RP-F105 (2017). As variáveis de entrada avaliadas nos procedimentos e os 3 níveis estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis de entrada utilizadas nas técnicas de DOE.

Nível	1	2	3
Densidade do aço (kg/m <sup>3</sup> )	7850,0	10000,0	15000,0
E - Módulo de Elasticidade Longitudinal (GPa)	200,0	250,0	300,0
Diâmetro externo - aço (m)	0,3	0,5	0,8
Espessura - aço (m)	0,03	0,05	0,08
Comprimento do vão (m)	25,0	50,0	100,0

Fonte: Autor (2021).

Como cada variável de entrada possui 3 níveis, ou seja, pode apresentar 3 valores distintos, o total de combinações possível entre essas 5 variáveis resulta em 243, o que representa o número de simulações necessárias para realizar a técnica de experimento fatorial completo, chamado, nesse caso, de experimento fatorial 3k. No procedimento de experimento fatorial fracionário, adotou-se a fração de um terço das combinações, resultando em 81 simulações necessárias. Já na técnica de amostragem por hipercubo latino, adotou-se 122 combinações, aproximadamente metade das simulações necessárias para o experimento fatorial completo.

Com o objetivo de automatizar as simulações, realizou-se a conexão entre o Isight® e o Abaqus® por meio de um *script* escrito na linguagem de programação Python, responsável por gerar os arquivos de entrada para as simulações de elementos finitos do Abaqus® com os dados provenientes do Isight®, assim como extrair os valores do esforço axial efetivo em cada simulação, agrupando-os em um único arquivo para a aplicação dos procedimentos de DOE.

## Resultados e Discussão

Os resultados gerados a partir da utilização de técnicas de DOE normalmente são expressos através de gráficos de efeitos principais e de Pareto. O gráfico de Pareto é uma forma de ordenar os fatores de um experimento de acordo com as suas frequências de ocorrência, o que possibilita identificar quais deles são mais significativos.

O gráfico de Pareto obtido no procedimento de experimento fatorial completo para o modelo analisado é mostrado na Figura 1.

Observa-se que o comprimento se mostrou como o fator mais influente no esforço axial efetivo, o que era esperado, visto que várias normas preconizam um comprimento admissível de vãos livres e até sugerem maneiras de mitigar os efeitos das vibrações induzidas por vórtices como efetuar o calçamento do duto com blocos de rocha ou cimentados (*grout bags*), o entrincheiramento do duto ou a utilização de supressores de vórtices.

Nota-se também que o efeito de interação entre a densidade e o comprimento foi relevante, o que

reforça a importância de utilizar procedimentos que consideram tais efeitos, que podem influenciar significativamente a análise dos resultados (MONTGOMERY, 2012).

Figura 1 – Gráfico de Pareto obtido no procedimento de experimento fatorial completo.



Fonte: Autor (2021).

O gráfico de Pareto obtido no procedimento de experimento fatorial fracionário para o modelo analisado é mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Gráfico de Pareto obtido no procedimento de experimento fatorial fracionário.



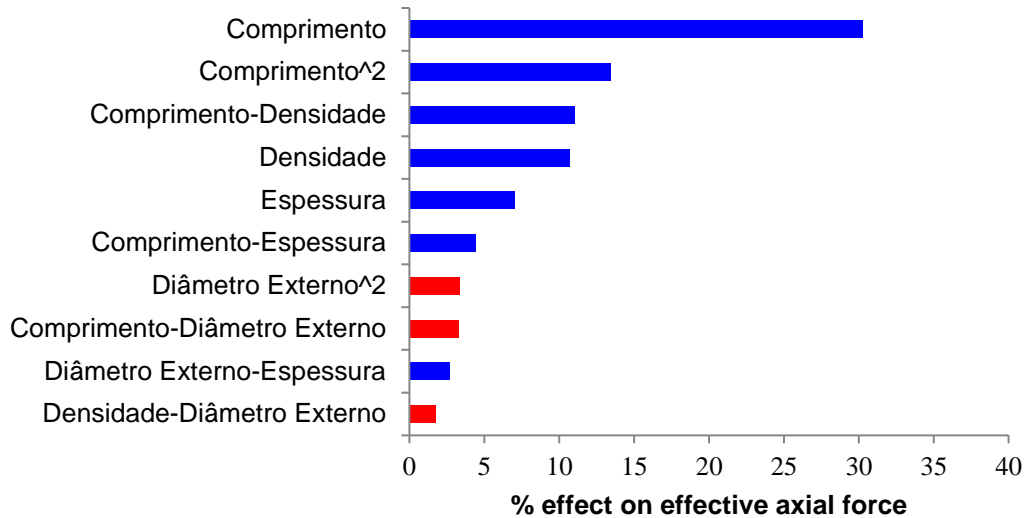
Fonte: Autor (2021).

Observa-se que os resultados obtidos nesse procedimento foram bastante próximos aos resultados da técnica de experimento fatorial completo, o que é positivo, visto que necessitou de um terço a menos de simulações. No entanto, apesar da técnica experimento fatorial fracionário apresentar-se adequada para esse caso, deve-se ter precaução ao aplicá-la com frações menores, podendo dificultar a identificação dos efeitos isolados.

O gráfico de Pareto obtido no procedimento de amostragem por hipercubo latino para o modelo analisado é mostrado na Figura 3.

Apesar de algumas pequenas diferenças, essa técnica também apresentou resultados similares, destacando o comprimento como fator mais influente e considerando os efeitos de interação, que não são incluídos em outras técnicas disponíveis no Isight® como a *parameter study*.

Figura 3 – Gráfico de Pareto obtido no procedimento de amostragem por hipercubo latino.



Fonte: Autor (2021).

### Conclusões

Diante do exposto, conclui-se que técnicas de Planejamento de Experimentos podem ser utilizadas para determinar os parâmetros mais influentes no esforço axial efetivo em dutos rígidos.

Entre os procedimentos avaliados, os experimentos fatoriais completo e fracionado apresentaram resultados muito próximos, enquanto os da técnica de amostragem por hipercubo latino apresentaram algumas diferenças, que podem ser justificadas pela escolha aleatória das combinações utilizadas na análise. No entanto, as três técnicas mostraram que o comprimento é o fator mais influente na variável de resposta.

Portanto, o uso de técnicas de DOE possibilitou o conhecimento sobre os parâmetros mais importantes em projetos de dutos submarinos e notou-se que a escolha de técnicas como a de experimento fatorial fracionado pode reduzir significativamente o número de simulações e, conseqüentemente, o tempo de desenvolvimento de um projeto.

Sugere-se para trabalhos futuros modelos mais refinados de dutos em vão livre, que podem incluir dados batimétricos e elementos de cabo, assim como a avaliação de outros parâmetros de projeto nas técnicas de DOE.

### Referências bibliográficas

DNV GL. **DNVGL-RP-F105 - Free spanning pipelines**. Høvik: DNV GL, 2017.

FU, C. *et al.* Allowable span length of submarine pipeline in shallow water. **Marine Georesources & Geotechnology**, [s. l.], v. 36, n. 5, p. 532–539, 2018.

FYRILEIV, O.; MØRK, K. Structural Response of Pipeline Free Spans Based on Beam Theory. **21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Volume 4**. [S. l.]: ASMECD, 2002. p. 175–183, 2002.

LIMA, A. J. **Análise de dutos submarinos sujeitos a vibrações induzidas por vórtices**. 2007. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8. ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2012.

PEREIRA, M. V. P. **Análise em elementos finitos de dutos submarinos submetidos à flambagem**. 2017. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

VEDELD, K.; SOLLUND, H.; FYRILEIV, O. Free Span Design Development: Experience With the New Revision of DNVGL-RP-F105. **Volume 5: Pipelines, Risers, and Subsea Systems**. [S. l.]: American Society of Mechanical Engineers, 2018.