

Influência da Flambagem Termomecânica na Otimização de Rotas de Dutos Submarinos

Vinicius Cantarino Curcino^{1,2}, Edgar Stonyo Bernardo Micolo^{1,3}, Juliana Souza Baioco⁵, Breno Pinheiro Jacob^{1,4}, Djalene Maria Rocha⁶

¹Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rua Horácio Macedo, Bloco G, 2030 - 101, 21941-450, Rio de Janeiro/RJ, Brasil
viniciuscantarino@lamcso.coppe.ufrj.br², edgar@lamcso.coppe.ufrj.br³, breno@lamcso.coppe.ufrj.br⁴

⁵Departamento de Engenharia Industrial, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Av. Athos da Silveira Ramos, 149 - Bloco A, 21941-909, Rio de Janeiro/RJ, Brasil
jsbaioco@lamcso.coppe.ufrj.br

⁶CENPES/PETROBRAS
Rua Horácio Macedo, 950, 21941-450, Rio de Janeiro/RJ, Brasil
djalene@petrobras.com.br

Abstract. The planning of subsea pipeline routes has great relevance for exploration and production projects, as they ensure a safety operation of subsea systems. With the advance of oil exploration in deep and ultra-deep waters, which means a rise in the operation severity, where the equipment works in an environment with high pressure and temperature levels. These factors can lead the large vertical or lateral displacement in the pipeline initial condition (as laid), that is because the temperature variations leading to the occurrence of the phenomenon of thermomechanical buckling. The aim of this work is to study the weight of buckling in pipelines submitted by HT / HP (high temperature / high pressure) flow in the penalty criteria on submarine pipeline route synthesis and optimization tools, using evolutionary algorithms. In ways to do a better representation of buckling, the pipelines are assumed laid on the seabed, subjected to environmental loading as current and passive soil resistance due the soil mobilization around the pipe, with or without thermal coating, and also with a hot internal fluid. Once the classic formulation of pipeline buckling proposed by Hobbs is based in an infinite rigid soil, in this work a modified Hobbs formulation is considered, so this secure that the resistance and all intrinsic penetration soil properties are represented. Thus, a safety factor indicated in the practical recommendation of DNV-OS-F101 and DNV-RP-F110 is calculated and compared with the limit safety factor pre-established in the project. With the results obtained by the pipeline section defined in the project, a depth profile graph is generated showing the critical sections considering the buckling. In this way, the tool assists the designer in the assessment of submarine pipeline routes considering thermomechanical criteria and environmental factors.

Keywords: Pipeline, Buckling, Routes, Optimization, Subsea.

1 Introdução

A natureza da produção de Óleo e Gás em ambientes *offshore* é caracterizada por alta complexidade operacional. Ainda assim, os avanços tecnológicos na última década têm permitido o alcance de fronteiras exploratórias cada vez mais distantes da costa e sujeitas a maiores profundidades. Estes ambientes normalmente são mais severos proporcionando condições operacionais mais críticas aos equipamentos do sistema de arranjo submarino. Essas severidades estão relacionadas as condições ambientais do campo, bem como as próprias particularidades dos campos, envolvendo poços com altas pressões e altas temperaturas (HP/HT). Portanto, em condições normais de operação, ocorre uma sobreposição de esforços e carregamentos ambientais os quais impactam diretamente nos equipamentos contidos no sistema de arranjo submarino e deve-se garantir que estes atendam as condições operacionais com segurança.

Entre os diversos equipamentos de um arranjo submarino que sofrem com essas severidades, os dutos requerem uma análise criteriosa para o atendimento das condições operacionais. Dutos são equipamentos que escoam os

fluidos de produção, injeção e serviço, fazendo a interligação hidráulica, normalmente, em ambientes submarino, de uma árvore de natal molhada (ANM) à uma unidade de estacionária de produção (UEP). Quando eles interligam equipamentos de um arranjo submarino, são normalmente chamados de *flowline*, e quando fazem interligação, por exemplo, de um campo a outro ou ainda a um terminal, eles são chamados de *pipelines*. Um *pipeline* normalmente possui grande comprimento e por isto seus trechos podem sofrer diferentes tipos de sollicitação, ocasionados pela geologia do solo, pelos próprios fluidos que escoam, do escoamento externo e a sustentação da coluna de água. A interação desses carregamentos podem desencadear fenômenos como colapso hidrostático, vibração induzida por vórtices (VIV) e flambagem, que é muito comum em cenários como em campos do pré-sal.

A flambagem termomecânica, que é um processo de desalinhamento ou expansão de grandes comprimentos em determinadas regiões da sua configuração inicial assumindo um novo estado de equilíbrio de menor energia quando a carga compressiva ou trativa atinge a carga crítica de flambagem, está ligada diretamente às reações de suas configurações, assim, este fenômeno busca preferencialmente ocorrer no plano de menor resistência [1]. Portanto, as condições de um *pipeline* mostram configurações como simplesmente apoiado no solo ou enterrado no leito marinho. Logo, essas condições podem demandar dois tipos de flambagem: lateral ou vertical [1].

A flambagem vertical ocorre quando o deslocamento tende a acontecer, preferencialmente, na direção vertical, e é comum em dutos que possuem restrições laterais, como no caso de dutos enterrados pois o solo restringe-o lateralmente. A flambagem lateral ocorre quando o deslocamento tende a acontecer, preferencialmente, na direção lateral, e é comum em casos em que há imperfeições na forma do duto e possui menor resistência no plano lateral, tendo como restrição vertical o peso próprio do duto e, em caso de dutos enterrados, a resistência do solo. Este processo é mais comum em dutos apoiados e parcialmente enterrados. Este fenômeno foi estudado por Hobbs [1], Benjamin [2], Benjamin [3, 4, 5], Cardoso [6] e na recomendação prática da DNV-RP-F110 [7].

Desses estudos, a formulação apresentada no trabalho de Hobbs [1] mostra que o duto está assentado sobre uma superfície rígida, nesse caso há sempre uma predisposição para flambagem lateral, já que não há nenhuma restrição nesse plano, que naturalmente apresenta uma resistência lateral da vala gerada pela penetração do duto no solo e opõe-se ao movimento lateral do duto. Esse efeito do solo tende a diminuir a amplitude de flambagem. Deste modo, foi considerado, numa primeira fase, a formulação de flambagem termomecânica proposta por Hobbs [1]. E, de modo a diminuir as incertezas sobre a reação do solo do modelo original [1], a formulação modificada de Hobbs [1] apresentada em Benjamin [2] e Cardoso [6] é implementada neste trabalho com o objetivo de verificar os impactos da flambagem em uma rota de um duto submarino sob efeito de penetração e movimento de camada de solo, através de um processo de otimização baseado em algoritmos evolutivos como apresentado em Baioco [8] e Rocha et al. [9].

2 Flambagem Termomecânica

Dutos assentados no leito marinho, em especial HP/HT, são suscetíveis à flambagem, resultando em deflexões que podem levar à deformação plástica da seção transversal. Isso é causado pela força de compressão axial produzida quando o duto tenta expandir-se termicamente, mas é restringido em função da resistência do solo [10]. Assim fenômeno de flambagem de dutos aquecidos, ocorre sob certas condições de contorno, decorrentes do contato solo-duto, e é iniciado por um carregamento térmico produzido pelo deslocamento do fluido em seu interior, transferindo calor para o aço, gerando esforços.

2.1 Flambagem de Dutos Aquecidos

O esforço axial produzido pelo acréscimo na temperatura em um duto axialmente restringido é dado pela equação 1.

$$N = EA\alpha\Delta T \quad (1)$$

Onde: E é o módulo de elasticidade longitudinal; A é a área da seção transversal do duto; α é o coeficiente de dilatação térmica; e ΔT é a variação de temperatura gerada pelo escoamento. Nesse trabalho, a obtenção dessa variação de temperatura surge de uma análise de escoamento ao longo da rota.

A flambagem ocorre quando a força normal N se iguala ao esforço de flambagem N_f , que é a carga mínima de flambagem, produzindo deslocamentos laterais ou verticais ao longo de um determinado trecho do duto. O duto pode assumir várias configurações deformadas, chamadas de modos de flambagem (Figura 1).

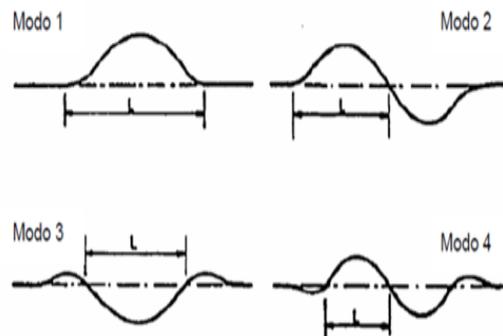


Figura 1. Modos de Flambagem [11].

Dependendo da configuração do duto, parcialmente ou totalmente enterrado, o efeito de flambagem varia. Um duto totalmente enterrado, em geral, flamba verticalmente, devido à contenção lateral exercida pelo solo. Em um duto parcialmente enterrado, a flambagem pode ocorrer tanto verticalmente quanto lateralmente. O peso próprio do duto se opõe à flambagem vertical, enquanto reação lateral do solo se opõe à flambagem lateral, ocorrendo a flambagem no plano de menor contenção [11].

Para valores de penetração do duto no solo maiores ou iguais a meio diâmetro [3], é mais provável que a flambagem vertical ocorra. A flambagem lateral depende de diversas condições como: duto parcialmente enterrado, duto reto, duto submetido a um acréscimo de temperatura, deslocamento axial parcialmente ou totalmente restringido e flambagem vertical impedida pela ação do peso próprio [11].

2.2 Métodos Analíticos para Análise de Flambagem - Método Analítico de Hobbs

Hobbs [1] propôs um método analítico para avaliação da flambagem lateral de dutos aquecidos, no qual a representação da interação solo-duto é feita com base em duas hipóteses. Na primeira, supõe-se que o duto se encontra simplesmente apoiado sobre um solo rígido, que reage aos deslocamentos do duto com uma força de atrito de Coulomb f_s ($f_s = \mu w$). Na segunda hipótese, supõe-se que o coeficiente de atrito entre o duto e o solo (μ) é igual na direção axial e na direção transversal ao duto. Assim, as reações do solo aos deslocamentos axial (R_{axi}) e lateral (R_{lat}) do duto são iguais.

A hipótese de que o duto apoiado sobre um solo rígido corresponde a uma condição muito idealizada, uma vez que o duto tende a penetrar no solo devido ao seu peso próprio. No entanto, como em dutos parcialmente enterrados, as reações R_{axi} e R_{lat} são maiores ou iguais à força de atrito de Coulomb entre o duto e um solo rígido fictício, as hipóteses são conservadoras.

Em uma versão modificada do método analítico de Hobbs, proposto por Benjamin [2, 4, 5], as reações do solo aos deslocamentos axial e lateral do duto são fornecidas como dados do problema, por meio de análises numéricas ou de equações empíricas, e podem assumir valores diferentes entre si. Isto permite representar de forma mais realista o problema, levando-se em consideração o tipo de solo e o grau de penetração do duto no solo.

Portanto, a avaliação do acréscimo de temperatura efetivo de flambagem, através da aplicação do método de Hobbs [1], é feita através das equações 3-7. Para o caso de flambagem lateral o acréscimo de temperatura é definido como [11]:

$$\Delta T_f = \frac{N_f}{EA\alpha} \quad (2)$$

Onde:

$$N_f = N_{frr} + k_3 R_{axi} L \left[\left(1 + k_2 \frac{E A R_{lat}^2 L^5}{R_{axi} (EI)^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (3)$$

$$N_{frr} = k_1 \frac{EI}{L^2} \quad (4)$$

Para o caso de flambagem vertical o acréscimo de temperatura é definido como [11]:

$$\Delta T_f = \frac{N_f}{EA\alpha} \quad (5)$$

$$N_f = N_{frr} + \frac{L}{EI} \left[1.597 \times 10^{-5} + EAW^2 R_{axi} L^5 - 0.25 (R_{axi} EI)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

onde: ΔT_f é o acréscimo de temperatura efetivo; α é o coeficiente de dilatação térmica; L é o comprimento da meia onda da flambagem mais significativa; N_{frr} é o esforço normal de compressão no trecho fletido do duto correspondente ao ΔT_f ; N_f é o esforço normal de compressão no trecho ancorado do duto correspondente ao ΔT_f ; R_{axi} é a reação do solo ao deslocamento axial do duto; R_{lat} é a reação do solo ao deslocamento lateral do duto; E é o módulo de elasticidade longitudinal; I é o momento de inércia; A é a área da seção transversal; k_1, k_2, k_3, k_4 são as constantes que assumem valores diferentes para os 4 modos de flambagem (Figura 1 e Tabela 1); e W é o peso submerso por unidade de comprimento do duto.

Tabela 1. Valores de k para os quatro modos de flambagem

Modo	k1	k2	k3	k4
1	80.76	6.39×10^{-5}	0.5	2.41×10^{-3}
2	39.48	1.74×10^{-6}	1	5.53×10^{-5}
3	34.06	1.67×10^{-4}	1.29	1.03×10^{-2}
4	28.2	2.14×10^{-4}	1.61	1.05×10^{-2}

Vale destacar que o efeito da pressão interna na flambagem do duto não está incluído explicitamente nas equações 3 e 6. Para efeitos práticos pode ser incorporado implicitamente na força de compressão N_f e no acréscimo de temperatura ΔT_f , que é determinado a partir desta força. Desta forma, o acréscimo de temperatura efetivo ΔT_f é constituído por duas parcelas:

$$\Delta T_f = \Delta T_{crit} + \Delta T_p \quad (7)$$

Onde:

$$\Delta T_p = \frac{p(OD - t)}{4tR\alpha} (1 - 2\nu) \quad (8)$$

onde: ΔT_{crit} é o acréscimo de temperatura crítico; ΔT_p é o acréscimo de temperatura equivalente ao efeito do escoamento dos fluidos através do duto; p é a pressão interna do duto; OD é o diâmetro externo do duto; t é a

espessura do duto; ν é o coeficiente de Poisson. Conhecendo-se ΔT_f e ΔT_p determina-se o acréscimo crítico de temperatura ΔT_{crit} , valor a partir do qual o fenômeno de flambagem lateral pode ocorrer. Para determinação da temperatura admissível de operação do duto (T_{oper}), é recomendável a aplicação de um fator de segurança sobre o valor de ΔT_{crit} :

$$\gamma_{SF} = \frac{\Delta T_{crit}}{T_{oper} - T_{mont}} \geq SF_{flamb} \quad (9)$$

onde: T_{oper} é a temperatura admissível de operação do duto; T_{mont} é a temperatura de montagem; SF_{flamb} é o fator de segurança (maior que 1,0); fator de segurança calculado a ser comparado com o SF_{flamb} recomendado.

O fator de segurança γ_{SF} fornece uma margem de segurança em relação ao acréscimo de temperatura crítica ΔT_{crit} , e é importante para absorver pequenos desvios que possam ocorrer em relação às hipóteses básicas estabelecidas pelos modelos analíticos.

3 Otimização de Rotas de Dutos Submarinos

O planejamento de uma rota de dutos submarinos é um aspecto fundamental durante o desenvolvimento de um campo de petróleo, desta maneira, de forma a alcançar a melhor rota possível, aplica-se uma metodologia de otimização baseada em algoritmos evolutivos como o algoritmo genético. E através de uma ferramenta computacional de síntese e otimização de rotas de dutos submarinos é possível modelar o problema proposto, definir as variáveis de projeto, identificar o objetivo da otimização desejada, aplicar as restrições ou penalidades inerentes a rota desejada e, por fim, observar a aptidão, ou seja, um parâmetro que mede a qualidade da rota obtida como resultado da otimização, podendo esta ser através de maximização ou minimização da função objetivo.

A partir da ferramenta de otimização, avalia-se cada rota candidata através de critérios de engenharia na função objetivo, observando-se aspectos relevantes no projeto de uma rota de duto submarino, como: comprimento de linha, custo, estabilidade hidrodinâmica, vãos livres, flambagem termomecânica e etc.

Esta metodologia é apresentada em Rocha et al. [9] onde é apresentado o desenvolvimento da otimização de rotas de dutos submarinos considerando critérios de estabilidade de taludes com a incorporação de critérios críticos na função objetivo. Neste trabalho, são apresentados conceitos da metodologia de algoritmo genético bem como a modelagem do problema proposto, através da parametrização da rota através de pontos de intersecção. Outro fator tratado no artigo é o conceito de função objetivo e de estabilidade de taludes.

Em Baioco [8] são apresentados conceitos relevantes da metodologia de otimização de rotas de dutos considerando critérios de estabilidade hidrodinâmica. Neste trabalho é apresentado a construção de uma abordagem de engenharia com a aplicação do algoritmo genético através de ferramenta computacional de síntese e otimização de rotas de dutos, considerando dutos apoiados em solo marinho sujeitos a condições ambientais. Ainda neste trabalho são apresentados estudos de caso considerando a otimização com a estabilidade como uma restrição (ou penalidade) e a otimização para se determinar o peso de lastro a ser aplicado no duto a fim de garantir sua estabilidade.

3.1 Algoritmo Genético - Conceitos Básicos

A otimização é um processo que tem por objetivo encontrar uma solução do problema dentro de um conjunto de soluções que atenda às restrições impostas na modelagem do problema. Isto, basicamente, envolve determinados conceitos, que formam a base de entendimento dos processos baseados no algoritmo genético. Segundo Rodrigues [12], os conceitos podem ser definidos como:

- Função objetivo: a função a ser otimizada (minimizada ou maximizada), representada em termos das variáveis de projeto.
- Variáveis de projeto: são aquelas para as quais o problema é resolvido, ou seja, são os valores esperados.
- Restrições: funções de igualdade ou desigualdade que descrevem os limites desejáveis de projeto.

- Espaço de busca: espaço definido pelas restrições que compreendem todas as soluções viáveis para o problema
- Aptidão: mede a qualidade de um indivíduo no processo evolutivo.

O algoritmo genético é baseado na teoria evolutiva de Darwin englobando métodos de seleção natural, recombinação e mutação genética [9]. O processo de otimização envolve os processos de seleção, o qual determina a escolha dos indivíduos que irão gerar descendência; o processo de cruzamento, o qual gera novos indivíduos a partir da combinação aleatória de genes de diferentes cromossomos; o processo de mutação, o qual realiza modificações aleatórias do genes de alguns cromossomos a fim de garantir a diversidade entre os indivíduos e o processo de sobrevivência, o qual executa a substituição dos indivíduos depois da geração dos descendentes, configurando uma nova população com os indivíduos mais aptos [8]. O processo é finalizado quando um critério de parada é definido e atingido e o indivíduo com melhor aptidão é escolhido como a solução do problema de otimização proposto.

3.2 Modelagem do Problema

Na modelagem do problema de otimização proposto é necessário definir a função objetivo como uma função no espaço S composta por um vetor $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_r)$ de variáveis do projeto, onde cada componente deve possuir limites máximos e mínimos (l_k, u_k) . O objetivo é minimizar a função objetivo $f(\mathbf{x})$ considerando restrições de igualdade e desigualdade, $g(\mathbf{x})$ e $h(\mathbf{x})$ respectivamente, o que define uma região viável contida no espaço S [13]:

Algoritmo 1 Função Objetivo

minimizar $f(\mathbf{x})$
 sujeito a $g_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, \dots, m$
 $h_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, \dots, p$
 $l_k \leq x_k \leq u_k, k = 1, \dots, q$

No problema de otimização de uma rota de duto submarino, a função objetivo e as restrições são fatores relevantes na escolha da melhor rota, ou rota candidata. O principal objetivo da otimização é a minimização do comprimento total do duto - o que permite uma redução nos custos com material e intervenções na linha. Desta maneira, a função objetivo pode ser definida como uma razão entre o comprimento da rota otimizada e a distância entre os pontos em que se deseja otimizar a rota, conforme a equação 10. Um exemplo de rota com os pontos AB é mostrado na Figura 2.

$$f = \frac{L_{rota}}{dist_{AB}} \tag{10}$$



Figura 2. Exemplo de rota com pontos AB definidos.

As restrições impostas ao problema de otimização são adicionadas a equação da função objetivo através de uma função de custo $c_j(\mathbf{x})$, a qual está associada a violação dos critérios restritivos escolhidos na modelagem do problema, deve-se também considerar um peso r_j associado a cada restrição imposta. Assim, a função objetivo é modelada como:

$$f(\mathbf{x}) = \frac{L_{rota}}{dist_{AB}} + \sum_{j=1}^p (r_j c_j(\mathbf{x})) \quad (11)$$

Tabela 2. Restrições consideradas no problema

Critério	Peso	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Segmento não pode dobrar sobre si mesmo	10	-	-	-	-
Restrição de obstáculo	5	-	-	-	-
Comprimento mínimo entre curvas	1	500m	500m	500m	500m
Declividade longitudinal máxima	2	3°	3°	3°	3°
Comprimento reto mínimo de saída	1	500m	500m	500m	500m
Comprimento reto mínimo de chegada	1	500m	500m	500m	500m
Tração Residual	1	500kN	500kN	500kN	500kN
Distância aos atratores	1	-	-	-	-
Flambagem	1	-	0.5	0.4	0.5

O critério será aplicado caso a rota viole alguma das restrições impostas na formulação do problema de otimização, as restrições consideradas neste trabalho são mostradas na Tabela 2.

Os parâmetros de otimização utilizados para todos os cenários são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Dados de otimização

Propriedade	Valor
Tamanho da população	100
Número máximo de gerações	200
Número de gerações	5
Números de rodadas	1

4 Descrição do Problema e Estudos de Caso

Neste trabalho o objetivo é avaliar a influência da flambagem como penalidade na otimização de uma rota de duto submarino através da ferramenta computacional de síntese e otimização de rotas de dutos submarinos seguindo o fluxograma apresentado na Figura 3, aplicando-se as formulações propostas por Hobbs [1] e modificadas por Cardoso [6], Benjamin [2, 3, 4, 5]. O funcionamento do processo descrito na Figura 3 descreve a rotina de cálculo implementada dividindo o duto em seções com tamanho definido e a partir disto realizam-se os procedimentos de repetição para cada trecho, considerando o cálculo do coeficiente de segurança da flambagem e analisando se penaliza a rota ou não, segundo critérios pré-estabelecidos na modelagem do problema de otimização.

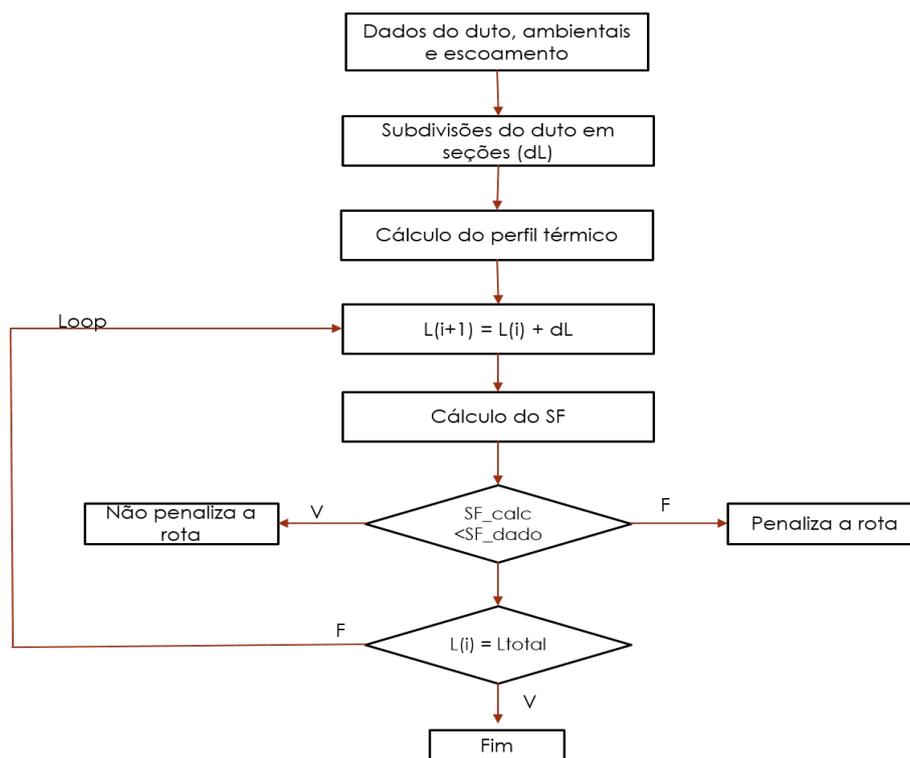


Figura 3. Fluxograma de funcionamento da ferramenta.

O problema proposto avalia o efeito da flambagem na escolha de uma rota de um duto submarino, e para isto são especificados os dados de batimetria do campo, propriedades do duto, informações de obstáculos e faciologia, dados ambientais, parâmetros do escoamento de fluidos através da linha considerada e dados de entrada da flambagem. São formulados quatro cenários de modelagem do problema, um sem considerar o efeito de flambagem e três considerando o efeito de flambagem. Nos cenários com efeito de flambagem, dois são considerados o modelo proposto por Hobbs [1]. O modelo modificado considerando as reações lateral e axial do solo não couberam para presente publicação devido a limitações impostas pelo *software* de síntese e otimização de rotas utilizado como base para rodar os casos estudados.

4.1 Estudos de Caso

Para os quatro cenários considerados no problema são usados o mesmo exemplo de rota, como mostra a Figura 4. A rota original é mostrada na Figura 5 e possui comprimento de 13291.263 m.



Figura 4. Cenário base

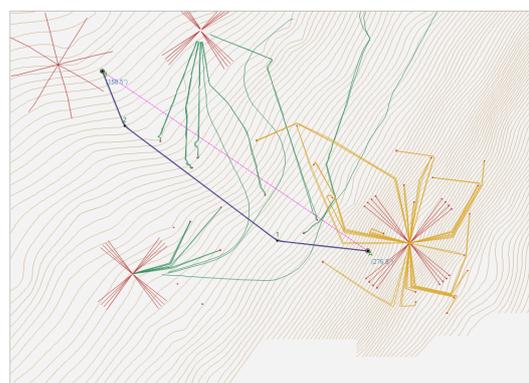


Figura 5. Rota original

Os dados de duto utilizados nos quatro cenários são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Dados do Duto

-	Cenários 1 e 2	Cenário 3	Cenário 4
Propriedade	Valor	Valor	Valor
Diâmetro externo	0.324m	0.406m	0.508m
Peso específico	77000 N/m^3	77000 N/m^3	77000 N/m^3
Módulo de elasticidade	210 GPa	210 GPa	210 GPa
Coefficiente de expansão térmica	$1.1 * 10^{-5}$	$1.1 * 10^{-5}$	$1.1 * 10^{-5}$
Peso específico do fluido interno	9051.538 N/m^3	9051.538 N/m^3	9051.538 N/m^3
Peso específico da água	10051.816 N/m^3	10051.816 N/m^3	10051.816 N/m^3
Revestimento anti-corrosivo	0.006 m	0.006 m	0.006 m
espessura	0.027 m	0.027 m	0.051m

Tabela 5. Dados dos cenários 2,3 e 4 para flambagem

-	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Propriedade	Valor	Valor	Valor
Temperatura máxima de operação do duto	150°C	180°C	125°C
Temperatura de montagem	20°C	20°C	10°C
Raio máximo admissível	1000 m	1000 m	2000m

Tabela 6. Dados dos cenários 2,3 e 4 para escoamento

Propriedade	Valor
Densidade do gás	0.7
Grau API	40
Pressão de entrada	4250 PSIA
Temperatura na cabeça do poço	250 °F

Foram avaliados cenários em que são variados parâmetros do duto e dados de flambagem, a fim de verificar a influências destes na otimização da rota avaliada.

Para o primeiro cenário, a flambagem não é considerada na análise da rota do duto submarino. Os dados de entrada utilizados para o cenários 2 são mostrados nas tabelas 5 e 6.

Os resultados obtidos para os cenários avaliados são mostrados na Tabela 7 e como exemplo para o cenário 2 [é ilustrada a rota candidata com melhor aptidão na Figura 6.

Tabela 7. Resultados

Propriedade	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Aptidão	0.07180	0.07225	0.07223	0.07225
Comprimento da rota	13487.64 m	13366.29 m	13493.06 m	13351.03 m
Aptidão média	0.07739	0.07700	0.07790	0.07362
Desvio padrão	0.01835	0.00100	0.01845	0.00035
Penalização por flambagem	-	0.01527	0.01310	0.02755

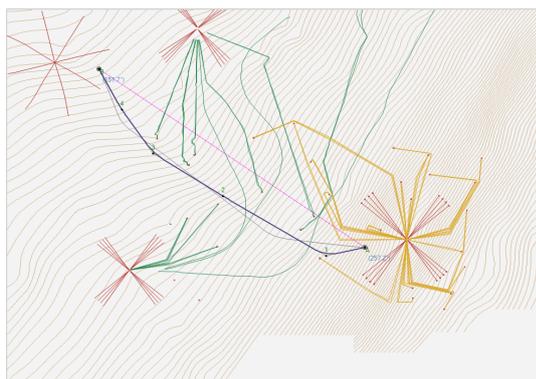


Figura 6. Cenário 2



Figura 7. Cenário 2 - gradação por flambagem

Na Tabela 7 são apresentados os resultados em termos de aptidão, que mede a qualidade da rota gerada, comprimento da rota otimizada, aptidão média (média dentro das 200 gerações avaliadas dentro da otimização), o desvio padrão (variação entre a média e os maiores e menores resultados) e a penalização por flambagem (diferença entre o coeficiente final de flambagem (SF) calculado pela rotina e o coeficiente dado de projeto).

No cenário 1 a rota é calculada sem a presença da flambagem e observa-se um maior comprimento em relação ao duto original, comprando o cenário 1 com o cenário 2 observa-se que ocorre uma redução no comprimento da rota (121.35 m) e um aumento na aptidão, ou seja, a rota otimizada no cenário 2 apresenta uma menor qualidade. Comparando-se os cenários 1 e 3 nota-se um pequeno aumento no comprimento da rota (5.42 m) e um aumento na aptidão, porém comparando-se os cenários 1 e 4 verifica-se uma redução no comprimento da rota (136.61 m) e um aumento na aptidão da rota.

5 Conclusão

O presente artigo investigou a influência da flambagem na síntese de otimização de rota de um duto. A otimização de rota visa a redução de comprimento na ligação de dois pontos em um campo, essa redução traduz-se diretamente em economia dos custos do projeto. Sendo essa uma tarefa que sofre interferência de vários parâmetros inerente às premissas do projeto e as condições ambientais, a melhor rota ou a rota candidata é àquela que apresenta a menor necessidade de intervenção e que, conseqüentemente, gera menor comprimento de linha.

A priori, havia-se definido cinco situações, denominadas de cenário. O quinto cenário era previsto englobar os efeitos lateral e axial do solo pela mobilização deste por um duto em expansão. Esse desiderato não foi concluído a tempo dessa publicação, pois para o efeito o modelo de solo recebe deslocamento lateral e axial como dados de entrada no modelo numérico do solo, gerados pela deformação deste duto devido a carga térmica e pressão do fluido. Esses dados não podem ser gerados pelo software de síntese e otimização de rotas de dutos submarinos, então foi necessário recriar o quinto cenário em um programa de elementos finitos para gerar esses dados. Assim, para permanecer dentro do escopo desse trabalho foi retirado esses resultados para próximos trabalhos para melhor detalhamento.

Assim, para simular uma condição de projeto, esse trabalho usou como estrutura de estudo uma condição

normal, com fraca adversidade ambiental e outra adicionando condições que favorecem o surgimento do fenômeno de flambagem. Esse fenômeno é quantificado em formas de peso na equação objetivo, assim quanto maior for o comprimento de flambagem na rota, maior é o peso no *fitting* da equação objetivo, comparando com a rota normal.

Portanto, analisando os resultados obtidos entre a rota original e o rota candidata avaliada incluindo-se o efeito da flambagem é possível concluir que com os dados utilizados no problema e com o peso definido para a penalização, esse processo de flambagem gerou um aumento de 59.767 m em relação ao melhor cenário e a rota original, e, nota-se que a rota candidata aproxima-se da mesma forma da rota do duto original tanto em comprimento total de duto quanto em aptidão, entretanto enfatiza-se que os cenários foram construídos de modo a induzir o efeito de flambagem, assim a rota gerada é aquela que tem menor comprimento flambado. Porém esse aumento de comprimento pode acarretar custos maiores no projeto do duto, causando influência no projeto como um todo na mitigação dos efeitos desse fenômeno.

Em suma, o cenário criado para o efeito de esforços térmicos que gerassem flambagem, não se verificou um afastamento grande na aptidão da rota gerada, em comparação com a rota original, porém pode-se concluir também que o efeito de flambagem desfavorece a escolha de rotas, pois elas aumentam o comprimento do pipeline.

Agradecimentos. Agradeço a equipe do LAMCSO/COPPE/UFRJ pelo apoio dado neste trabalho, bem como a utilização do software de síntese e otimização de rotas de dutos submarinos e aos autores deste trabalho pela colaboração e ajuda dada na elaboração do texto.

Declaração de autoria. Os autores deste trabalho afirmam que são os únicos responsáveis pela elaboração do texto e que todo o material utilizado neste artigo são de autoria dos citados nas referências bibliográficas e conhecimento próprio dos autores do trabalho, sendo concedida permissão de todos os autores do artigo para a devida publicação.

Referências

- [1] Hobbs, R. E., 1984. In-service buckling of heated pipelines. *Journal of Transportation Engineering*, vol. 110, n. 2, pp. 175–189.
- [2] Benjamin, A. C. e Andrade, E. Q., 2001. Flambagem lateral de dutos aquecidos: Um método analítico clássico revisitado. *3º Seminário de Dutos, IBP04601, Instituto Brasileiro do Petróleo*.
- [3] Benjamin, A. C. e Cunha, D. J. S., 2002a. Flambagem de dutos aquecidos: Resultados numéricos versus resultados analíticos. *3ª CT do Serviço Técnico 702864, CENPES/PDEP/MC*.
- [4] Benjamin, A. C. e Cunha, D. J. S., 2002b. Verificação da flambagem lateral do duto de 16” do terminal de regência usando um método analítico. *Serviço Técnico Petrobras 702864*.
- [5] Benjamin, A. C. e Cunha, D. J. S., 2005. Flambagem vertical de dutos aquecidos: Um estudo comparativo de três métodos analíticos. *Instituto Brasileiro do Petróleo, IBP 1208-05*.
- [6] Cardoso, C. d. O., 2005. *Metodologia para Análise e Projeto de Dutos Submarinos Submetidos a Altas Pressões e Temperaturas Via Aplicação do Método dos Elementos Finitos*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [7] Veritas, D. N., 2007. Global buckling of submarine pipelines, structural design due to high temperature/high pressure. *RP-F110, Oslo, Norway*.
- [8] Baioco, J. S., 2011. Síntese e otimização de rotas de dutos submarinos considerando critérios de estabilidade hidrodinâmica. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ–Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro.
- [9] Rocha, D. M., Cardoso, C. d. O., Borges, R. G., Baioco, J. S., Albrecht, C. H., Jacob, B. P., et al., 2015. Optimization of submarine pipeline routes considering slope stability. In *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference.
- [10] Bai, Yong e Bai, Q., 2018. *Subsea Engineering Handbook*. Gulf Professional Publishing.
- [11] Freitas, S. M. S., 2006. *Ferramentas Numéricas para Análise e Projeto de Dutos e Risers na Exploração de Petróleo*. Tese de D.Sc., Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- [12] Rodrigues, G. d. O., 2004. Ferramentas computacionais para otimização e síntese de sistemas híbridos de risers baseados no conceito de bóia de subsuperfície. *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil*.
- [13] de Lucena, R. R., Baioco, J. S., de Lima, B. S. L. P., Albrecht, C. H., & Jacob, B. P., 2014. Optimal design of submarine pipeline routes by genetic algorithm with different constraint handling techniques. *Advances in Engineering Software*, vol. 76, pp. 110–124.