

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

ANÁLISE TERMOMECAÂNICA DE DUTOS SUBMARINOS ENTERRADOS NA REGIÃO DE *SHORE APPROACH*

Rafael Familiar Solano¹, Murilo Augusto Vaz²

¹ PETROBRAS, Departamento de Engenharia, rsolano@petrobras.com.br

² COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica, murilo@peno.coppe.ufrj.br

Resumo – Frequentemente em projetos de dutos submarinos aquecidos na região de *shore approach*, o recobrimento natural do duto, ou ainda, a utilização do solo desagregado, não são suficientes para garantir a requerida cobertura do duto durante sua vida útil. Para tanto, neste trabalho foi desenvolvido um modelo numérico para simular o fenômeno de flambagem termomecânica de dutos aquecidos enterrados na região de *shore approach*. Uma análise de sensibilidade foi realizada adotando parâmetros geométricos e dados operacionais de um projeto específico da Petrobras, assim como os levantamentos geofísicos, geotécnicos e oceanográficos do local. Contempla-se dessa maneira, a influência da movimentação de sedimentos após a abertura da trincheira para o enterramento do duto, além de uma cobertura (*backfilling*) com um solo mais pesado, isto é, que ofereça uma maior resistência ao movimento do duto. O trabalho foca no desafio do grupo de projeto e instalações de dutos submarinos, devido aos requisitos de enterramento, para encontrar uma solução segura para os processos de abertura e recobrimento da trincheira.

Palavras-Chave: Duto Enterrado; Flambagem Vertical; Flambagem Termomecânica e *Shore Approach*

Abstract – Often in heated pipeline projects in the shore approach area the pipeline is buried with the disturbed soil but a partial natural recovering inevitably takes place once the trench is open. This condition may not be enough to ensure the required pipeline soil support for its design life. This peculiar condition of shallow and insufficient soil support may lead to an upheaval buckling. Hence, this paper intends to develop a numerical model to simulate the thermo-mechanical buckling phenomenon of buried heated pipelines in shore approach areas. Furthermore, a sensibility analysis adopting geometrical, physical and operational data is carried out for a particular Petrobras project. The in situ geophysical survey, geotechnical and oceanographic information are also taken into account. The influence of the sediment transport after opening the trench and required backfilling with a heavier soil is also addressed. The influence of the sediment transport after opening the trench and required backfilling with a heavier soil is also addressed. This paper focuses on the challenges for the design and installation group, due to the burial requirements, in order to find a safe solution for the trenching and backfilling process.

Keywords: Buried pipeline, upheaval buckling, thermo-mechanical buckling and shore approach

1. Introdução

O fenômeno de flambagem de dutos é um assunto que vem sendo estudado extensivamente e ainda não se encontra totalmente esgotado. Devido às diferentes configurações e condições de operação, a flambagem de dutos aquecidos demanda estudos aprofundados, e decorrente dessas peculiaridades, muitas vezes cada caso deve ser analisado separadamente.

A movimentação de sedimentos junto ao solo marinho, devido à influência de correntes marinhas, de ondas e de outras ações do meio, torna a chegada do duto na praia outro assunto que deve ser dada atenção especial. Este fenômeno pode deixar trechos do duto parcial ou totalmente descoberto, tornando-se um fato indesejável, tanto no aspecto técnico-operacional, quanto no aspecto ambiental. Levando também em consideração a preocupação com relação à instabilidade termomecânica de dutos aquecidos, tem-se um tema de grande potencialidade a ser estudado.

Num apanhado do estado da arte com relação à questão da movimentação de sedimentos na região de *shore approach*, importantes trabalhos devem ser citados como os artigos de Mostafa e Mizutami (2002) e Gao et al. (2004) que retratam a influência de ondas, correntes, e enfim, do meio, sob dutos submarinos enterrados. Os trabalhos sobre a resposta de solos não-homogêneos ao redor de dutos submarinos sob a ação do meio, Jeng e Lin (2000) e Jeng et al. (2001), também merecem destaque.

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia de projeto para as análises de flambagem vertical de dutos submarinos, onde uma análise de sensibilidade é realizada para avaliar os deslocamentos do duto submetido à temperatura e pressão máximas de projeto na região de *shore approach*. As análises consideram a movimentação de sedimentos nesta região, modelando o preenchimento ou recobrimento da trincheira aberta na operação de enterramento do duto com diferentes tipos de solo: argila indeformada (agregada), argila desagregada e areia. Além de analisar a sobreposição desses solos, formando duplas camadas sobre a geratriz superior do duto. Uma vez que, entre as operações de entrenchamento e recobrimento do duto, a movimentação de sedimentos inicia um recobrimento natural do duto. Em seguida, através de um recobrimento automatizado previsto na fase de projeto, uma camada de solo (peso) requerido é lançada sobre a rota do duto.

2. Análise Termomecânica

Para o desenvolvimento de uma metodologia e execução de uma análise de sensibilidade de dutos aquecidos enterrados na região de *shore approach*, adota-se parâmetros geométricos e os dados operacionais dos oleodutos de um específico projeto da Petrobras, assim como os levantamentos geofísicos, geotécnicos e oceanográficos do local.

A Tabela 1 apresenta os dados geométricos e do material para o duto de aço, baseado principalmente no projeto mecânico e na análise de estabilidade, e os dados operacionais para assegurar um perfeito escoamento e otimizar a vazão de bombeamento do óleo.

Tabela 1 – Dados do Duto e Dado Operacionais.

Parâmetros	Valores
Diâmetro externo, D	16in
Espessura da parede do duto, t	0,562in
Diâmetro total da seção <i>offshore</i> enterrado, D_t	0,4862m
Peso submerso total da seção <i>offshore</i> enterrado, W_{sub}	2.182kN/m
Módulo de Young do aço, E	200GPa
Coeficiente de Poisson do aço, ν	0,3
Coeficiente de expansão térmica do aço, α	1,17 10 ⁻⁵ /°C
SMYS (<i>Specified minimum yield stress</i>)	241MPa
SMTS (<i>Specified minimum tensile stress</i>)	414MPa
Pressão de projeto, p	2,452MPa
Variação de temperatura, ΔT	70°C

A análise de flambagem termomecânica considera duas camadas sobrepostas de solos, sendo: a primeira camada oriunda da movimentação de sedimentos, e provavelmente, composto por areia ou pelo solo desagregado removido durante a operação de abertura da trincheira; e a segunda camada, composta de um solo requerido para garantir a estabilidade termomecânica do duto, especificada em projeto e sobreposta à primeira camada de solo em operações de recobrimento do duto (*backfilling*).

Baseado nos levantamentos geotécnicos realizados na região de *shore approach* ao longo das diretrizes preliminares dos dutos, apresenta-se na Tabela 2 as características do solo marinho indeformado, da argila desagregada removida durante a operação de abertura da trincheira para o enterramento do duto e as características da areia presente nesta região e que compõem basicamente os sedimentos que são transportados devido à ação do meio.

Tabela 2 – Dados de Solo na Região de *Shore Approach*.

Solo	γ (kN/m ³)	Su (kPa)	ϕ (deg)
Argila Indeformada	16,83	20,22	----
Argila Desagregada	17,03	4,23	----
Areia	15,0	----	22,0

Onde γ é o peso submerso total do solo por unidade de comprimento, S_u é a resistência ao cisalhamento não-drenada do solo e ϕ é o ângulo de fricção interno do solo.

2.1. Análise de Sensibilidade

As análises são realizadas para os três tipos diferente de solo apresentado na Tabela 2 separadamente, e estudadas nos casos 1, 2 e 3, e também através da composição desses solos, formando duplas camadas sobre o duto,

avaliados nos casos 4 (areia e argila indeformada) e 5 (argilas indeformada e desagregada), conforme esquematizados na Figura 1.

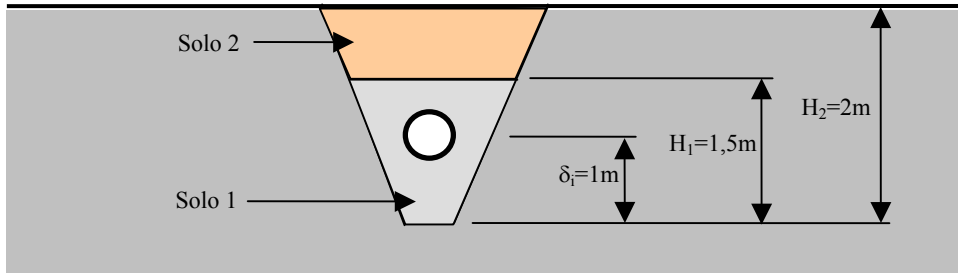


Figura 1 – Alturas de Enterramento para Recobrimento com Dupla Camada.

Onde δ_i é a altura da imperfeição geométrica inicial do duto, H_1 e H_2 são a cota do solo 1 e 2, respectivamente, consideradas no estudo de casos.

Na análise de sensibilidade fixou-se a imperfeição geométrica inicial do duto (prop) em 1%, ou seja, uma imperfeição com altura inicial de $\delta_i = 1\text{m}$ para um comprimento associado de meia onda de $L_i = 100\text{m}$. Da mesma maneira, foi considerada uma cobertura total da trincheira de $H = 2\text{m}$ para todos os casos estudados. E ainda, para os casos com dupla cobertura considerou-se o solo 1, proveniente da movimentação de sedimentos, com uma cota de preenchimento da trincheira de $H_1 = 1,5\text{m}$, enquanto o solo 2, proveniente de um recobrimento automatizado, com uma cota de preenchimento de $H_2 = 0,5\text{m}$. Para realizar adequadamente esta análise de sensibilidade, assumiram-se as características do solo de cobertura proveniente da operação de recobrimento mecânico da trincheira equivalente às características da argila indeformada.

2.2. Modelo Analítico-Numérico

Antes de realizar as análises, calcula-se as reações de solo para os diferentes casos propostos. As reações do solo foram calculadas baseadas no modelo constitutivo do ASCE Guidelines of the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems (2001). As cotas de cada solo sobre o duto nos diferentes casos analisados e as curvas de reação do solo ao movimento ascendente do duto são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Análise de Sensibilidade para Diferentes Coberturas.

Casos	Tipos de Solos	H(m)	q_v (kN/m)	Δ_v (mm)
1	Argila Indeformada	2,0	-40,44	-97,24
2	Argila Desagregada	2,0	-8,46	-97,24
3	Areia	2,0	-2,50	-20,0
4	Solo 1 – Areia	1,5	-0,625	-10,0
	Solo 2 – Argila Indeformada	0,5	-20,22	-97,24
5	Solo 1 – Argila Desagregada	1,5	-4,23	-97,24
	Solo 2 – Argila Indeformada	0,5	-20,22	-97,24

As curvas de reação do solo ao movimento ascendente do duto para os casos 1, 2 e 3 seguem diretamente o modelo constitutivo do ASCE Guideline (2001). Já para os casos 4 e 5, com uma dupla camada de solo sobre a geratriz superior do duto, as curvas de reação de cada solo que compõe a cobertura foram calculadas da mesma maneira e molas de reação equivalentes foram desenvolvidas para modelar numericamente o fenômeno.

A reação do solo equivalente ao movimento ascendente do duto apresenta partes distintas. Num primeiro nível, a força de reação equivalente (Q_{eq}^I) é limitada pela força de reação máxima do solo menos rijo (solo 1), logo:

$$Q_{eq}^I = q_1 \quad (1)$$

Onde q_1 é a força de reação máxima vertical do solo 1.

O deslocamento relativo equivalente (Δ_{eq}^I) neste primeiro nível é calculado considerando molas em série, e dado por:

$$\Delta_{eq}^I = \frac{\delta_1 + \delta_2}{q_1 + q_2} Q_{eq}^I \quad (2)$$

Onde q_2 é a força de reação máxima vertical do solo 2, δ_1 e δ_2 são os deslocamentos relativos dos solos 1 e 2, respectivamente.

Num segundo nível, considera-se que o solo 1 apresenta uma rigidez constante, representada pela resistência ao movimento vertical do duto igual a q_1 . E conservativamente, assume-se que esta força permanece constante até uma deformação ou deslocamento relativo do solo equivalente (Δ_{eq}^2) igual a 10% da cota de cobertura do solo 1, logo:

$$\Delta_{eq}^2 = 0,1H_1 \quad (3)$$

Esta consideração deve-se ao fato de não ser o objetivo desta dissertação aprofundar estudos em grandes deslocamentos do solo. E então, assume-se conservativamente que para os solos considerados na análise de sensibilidade esta hipótese retrata adequadamente as condições de resistência. Dessa maneira, a força de reação equivalente do solo (Q_{eq}^2) é dada por:

$$Q_{eq}^2 = \frac{q_2 \Delta_{eq}^2 + q_1 \delta_2}{2\delta_2} \quad (4)$$

Seguindo o desenvolvimento, o solo 1 passa a não oferecer mais resistência ao movimento do duto e a força de reação equivalente do solo (Q_{eq}^3) é então:

$$Q_{eq}^3 = q_2 \quad (5)$$

E por fim, o deslocamento relativo equivalente associado a este terceiro nível corresponde unicamente à resistência imposta pelo solo 2, e é dado por:

$$\Delta_{eq}^3 = (Q_{eq}^3 - Q_{eq}^2) \frac{\delta_2}{q_2} + \Delta_{eq}^2 \quad (6)$$

A relação entre as curvas de reação vertical do solo ao movimento ascendente e descendente do duto para os casos 1, 2 e 3 são apresentados na Figura 2 e para os casos 4 e 5 na Figura 3.

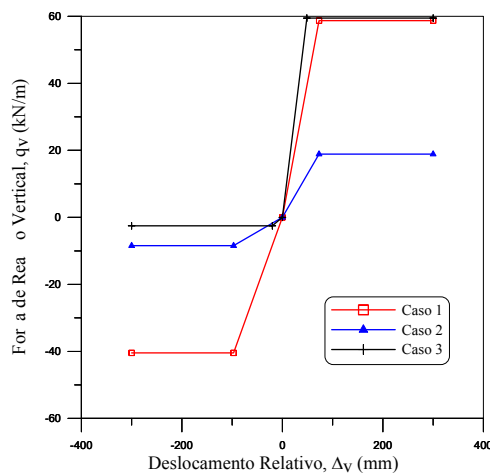


Figura 2 – Relação Força Vertical-Deslocamento Relativo.

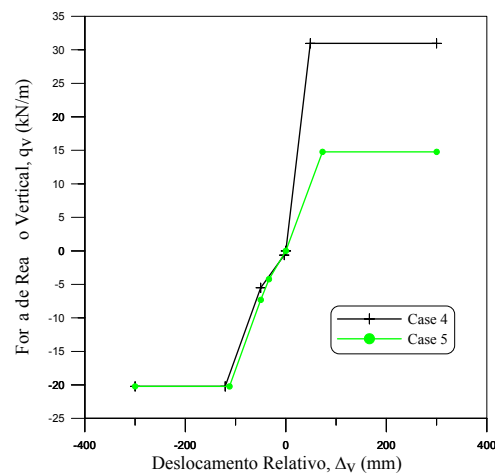


Figura 3 – Relação Força Vertical-Deslocamento Relativo.

A flambagem termomecânica é um fenômeno de instabilidade, e é essencial o uso de uma formulação em elementos finitos que modele corretamente os efeitos das mudanças de geometria nas forças internas no duto. Em particular, o elemento precisa considerar a força resultante da ação da pressão interna sobre o duto quando este flamba.

O software ABAQUS v.6.4 (2003) é empregado nas análises, onde o duto é modelado com uma malha uniforme refinada de elementos PIPE linear. Uma imperfeição geométrica inicial (prop) é aplicada para permitir uma análise carga-deslocamento de pós-flambagem. A forma da imperfeição geométrica inicial do duto foi definida usando uma equação polinomial como perfil do prop. E o comportamento da interação solo-duto é modelado por elementos de mola SPRING 1 e SPRING 2. Nessa modelagem com elementos de mola o modelo constitutivo descrito é utilizado para calcular as curvas de solo, isto é, as curvas da força de reação do solo-deslocamento que modelam a rigidez do mesmo.

Uma comparação entre os modelos analíticos consagrados descritos nas publicações de Maltby e Calladine (1995a,b) e uma modelagem simplificada em elementos finitos foi executada e serviu para validar alguns parâmetros do modelo numérico. O estudo paramétrico apresentado por Solano et al. (2004a,b), completa a análise de parâmetros importantes, como: a geometria da imperfeição geométrica inicial, a altura ou cota de enterramento e as tensões desenvolvidas no duto. E por fim, desenvolveu-se um modelo numérico completo para as análises termomecânicas de dutos aquecidos enterrados na região de *shore approach*, tendo como base a metodologia desenvolvida e adotada por um grupo de engenheiros da Petrobras para análises similares, baseado principalmente nos trabalhos potenciais e de cume prático de Solano et al. (2004a,b), Benjamin et al. (2004), Cardoso et al. (2003) e Junior et al. (2003);

2.3. Análise de Resultados

A Tabela 4 apresenta os resultados da tensão de von Mises (σ) e do deslocamento vertical máximo (Y_{max}) que ocorrem no ápice da imperfeição geométrica do duto, para as diferentes coberturas analisadas. Dois resultados em

particular merecem destaque: Para a trincheira totalmente coberta somente pela areia especificada (caso 3), o duto sofre deslocamentos, e conseqüentemente, deformações excessivas além dos limites estabelecidos por critérios de deformação controlada, implicando também em níveis de tensão muito acima das tensões admissíveis em critérios de carga controlada. Neste caso o deslocamento é tão grande que o duto aflora pela a cobertura de areia. Para a cobertura dupla composta por argilas desagregada e indeformada (caso 5), a tensão de von Mises atinge um valor abaixo de 90% de SMYS [API RP 1111 (1999)], e o duto sofre deslocamentos moderados para a variação de temperatura de 70°C.

Tabela 4 – Tensão de Von Mises e Deslocamento Vertical Máximo para Diferentes Coberturas.

Casos	Tipos de Solos	σ (MPa)	$Y_{\max}$ (mm)
1	Argila Indeformada	189,9	24
2	Argila Desagregada	242,4	264
3	Areia	270,1	3029
4	Solo 1 – Areia Solo 2 – Argila Indeformada	220,3	76
5	Solo 1 – Argila Desagregada Solo 2 – Argila Indeformada	209,2	66

Os resultados gráficos da análise de sensibilidade gerados pelo modelo numérico para as análises de flambagem vertical são apresentados a seguir. A Figura 4 apresenta a tensão de von Mises no ponto de maior tensão no duto, a flecha máxima da imperfeição, para os casos 1, 2, 4 e 5 em função da variação de temperatura de 70°C.

Nas Figs. 4 a 7 não se apresentam os resultados para o caso 3 devido a grande magnitude dos valores obtidos neste caso (Tabela 4), o que dificultaria a observação dos resultados dos demais casos analisados.

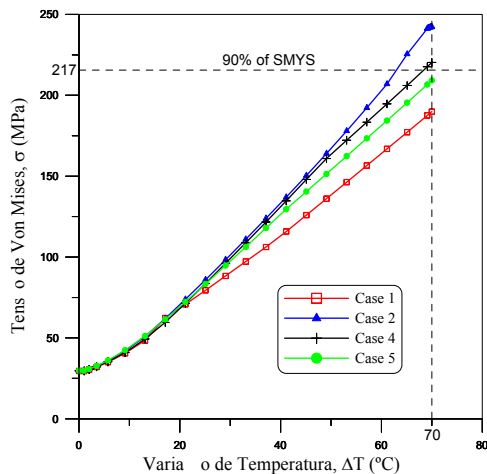


Figura 4 – Tensão de Von Mises como Função da Variação de Temperatura.

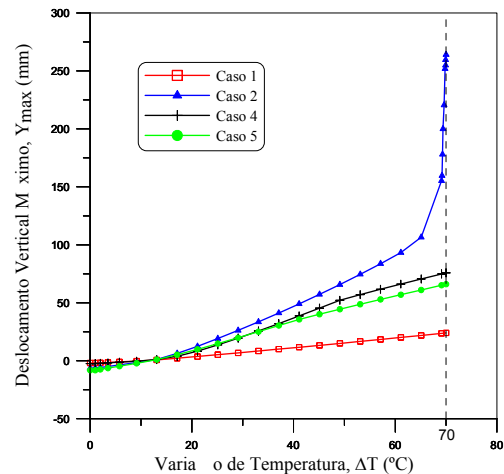


Figura 5 – Deslocamento Vertical como Função da Variação de Temperatura.

As Figuras 6 e 7 apresentam respectivamente os resultados para a coordenada vertical máxima no duto como função da temperatura e o deslocamento axial no duto como função da coordenada horizontal para uma variação de temperatura de (70°C), na qual ocorrem respectivamente no meio e nas extremidades do comprimento de *feed-in* do duto (aproximadamente entre 200 e 1000m dependendo do caso analisado).

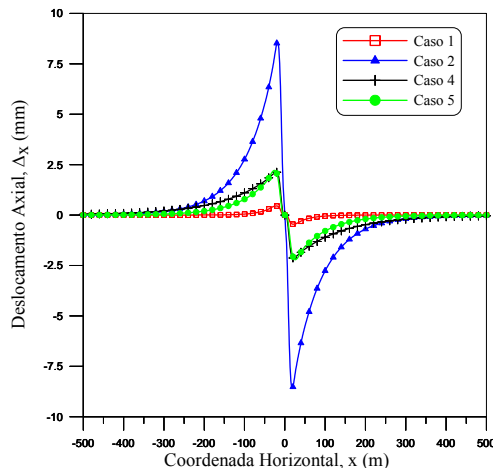


Figura 6 – Deslocamento Axial (“Comprimento de Feed-in”).

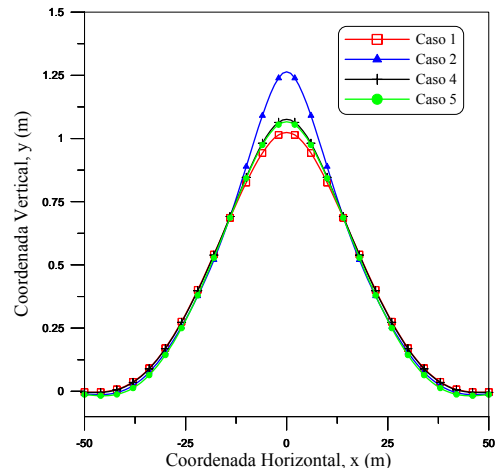


Figura 7 – Configuração Deformada.

A Figura 7 apresenta as configurações deformadas também para os casos 1, 2, 4 e 5 para uma variação de temperatura de 70°C. Para a cobertura com a argila desagregada o duto sofre maiores deformações. Além disso, o solo requerido, considerados nos casos 4 e 5 com as mesmas características da argila indeformada, oferece maior resistência ao movimento vertical ascendente do duto, limitando então, as deformações excessivas.

3. Conclusões

Este trabalho gera como principal produto um modelo numérico que servirá de base para análises de flambagem vertical em novos projetos de dutos, onde será possível investigar o comportamento termomecânico de dutos submarinos enterrados da Petrobras.

A análise de sensibilidade realizada avalia com êxito os deslocamentos do duto submetido à temperatura e à pressão máximas de projeto na região de *shore approach*. As análises consideram a movimentação de sedimentos nesta região, modelando o recobrimento da trincheira com diferentes tipos de solo, e analisam a sobreposição de solos formando duplas camadas sobre o duto.

É recomendado que análises de flambagem termomecânica sejam executadas usando as informações da posição final do duto (*as-laid*). E dessa maneira, é possível se confirmar/determinar qualquer cobertura adicional que possa ser requerida para garantir a estabilidade vertical do duto analisado. Para tal propósito, a passagem de um *pig* inercial como o *geo-pig* pode medir com bastante acurácia o perfil do duto depois de lançado e enterrado.

4. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a PETROBRAS por patrocinar este projeto e dar permissão para publicar esse trabalho. Os autores reconhecem também o suporte da COPPE/UFRJ e do CNPq neste trabalho.

5. Referências

- ABAQUS, Inc., Abaqus, Abaqus Standard User's Manual, version 6.4, 2003.
- API RP 1111, "Design, Construction, Operation and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design)", 3th edition, 1999.
- ASCE, Guidelines of the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, American Lifelines Alliance, appendix B, p. 68-76, July, 2001.
- BENJAMIN, A. C., GUERREIRO, J. N. C., SILVA, R. C. C., LOULA, A. F. D. Study of the Sensitivity of the Guanabara Bay PE-3 Pipeline to Geometric Imperfections. International Pipeline Conference, IPC04-0180, Alberta, Canada, October, 2004.
- CARDOSO, C. O., COSTA, A. M., ANDUEZA, A., AMARAL, C. S. Finite Element Modeling of Coupled Global and Local Buckling of Heat Pipelines in Soft Clay. 3º Rio Pipeline Conference & Exposition, IBP498_03, Rio de Janeiro, 2003.
- GAO, F., WU, Y., JENG, D. S. The Effect of Backfill Soil Properties on Wave-Induced Pore Pressure around a Trenched Pipeline. International Offshore and Polar Engineering Conference, v. 2, p. 44-49, 2004.
- JENG, D. S., LIN, Y. S. Response of Inhomogeneous Seabed around Buried Pipeline under Ocean Waves. Journal of Engineering Mechanics, v. 126, p. 321-332, 2000.
- JENG, D. S., POSTMA, P. F., LIN, Y. S. Stresses and Deformation of Buried Pipeline under Waves Loading. Journal of Transportation Engineering, v. 127, n. 5, p. 398-407, 2001.
- JUNIOR, E. P., COSTA, A. M., AMARAL, C. S., ROCHA, R. S., GUIMARÃES, G. B., SOUZA, P. F. Ensaio Experimental e Modelagem Numérica em Modelo Reduzido com Semelhança Física do Duto com Geometria Zigzag da Baía de Guanabara (PE-3). 3º Rio Pipeline Conference & Exposition, IBP389_03, Rio de Janeiro, 2003.
- MALTBY, T. C., CALLADINE, C. R. An Investigation into Upheaval Buckling of Buried Pipelines – I. Experimental Apparatus and some Observations. International Journal of Mechanics Science, v. 37, n. 9, p. 943-963, 1995a.
- MALTBY, T. C., CALLADINE, C. R. An Investigation into Upheaval Buckling of Buried Pipelines – II. Theory and Analysis of Experimental Observations. International Journal of Mechanics Science, v. 37, n. 9, p. 965-983, 1995b.
- MOSTAFA, A. M., MIZUTANI, N. Nonlinear Waves Force on a Marine Pipeline Buried in a Sand Seabed. International Offshore and Polar Engineering Conference, v. 2, p. 68-75, 2002.
- SOLANO, R. F., AZEVEDO, F. B., VAZ, M. A., CARDOSO, C. O. Design and Installation of Buried Heated Pipelines at the Capixaba North Terminal Offshore Brazil. Proceeding of International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2004-51206, Vancouver, Canada, June, 2004a.
- SOLANO, R. F., AZEVEDO, F. B., VAZ, M. A., CARDOSO, C. O. Unique Approach Developed for Installing Heated Export Lines at Brazilian Terminal. Oil & Gas Journal, v. 102.31, p. 66-72, october, 2004b.