

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Controle de Flambagem Termomecânica em Dutos Submarinos

AUTORES:

Bernardo Torres de Mattos

Orientador: Murilo Augusto Vaz

INSTITUIÇÃO:

Núcleo de Estruturas Oceânicas – NEO

Programa de Engenharia Naval e Oceânica – PENO

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

Controle de Flambagem Termomecânica em Dutos Submarinos

Abstract

As time goes by, oil exploration has become increasingly complex due to the great depths where it is located. In addition to this fact, oil reservoirs are now being found far from the coast, making the process of transporting it very expensive, either by shuttle tankers or pipelines.

In the short term the pipeline solution is more expensive but if the project is done well it can become cheaper in the long term. Because of this a lot of money has been invested in research to make these pipes resistant to these extreme operation conditions. In this work it will be studied the structural behavior of submerged pipelines in the presence of a sleeper, so the thermal induced pipe buckling can be controlled. This instability phenomenon is due to a compressive load caused by the restriction of the thermal expansion when the pipeline operates carrying hot oil.

The sleeper consists of a vertical geometrical imperfection on the pipe so as to induce the buckling process in that region and make the structural response controllable and predictable.

Introdução

Com o passar do tempo a exploração de petróleo tem se tornado cada vez mais complexa devido às grandes profundidades em que este se encontra. Além disso, os poços tem se afastado muito da costa, tornando muito caro o transporte deste óleo, seja por navios aliviadores ou dutos submarinos.

A solução de dutos submarinos é mais cara no curto prazo, porém se o projeto for bem feito ela pode sair bem mais barata no longo prazo. Devido a isso, vem se investindo muito em pesquisa para fazer com que os dutos resistam as complicadas condições de operação. Neste trabalho será estudado o comportamento estrutural de um duto submerso ao ser aquecido e flambar na presença de um *sleeper*, que controlará este efeito. A flambagem é causada pelo carregamento compressivo oriundo da restrição à expansão térmica que ocorre durante a operação de transporte no duto.

O *sleeper* consiste numa imperfeição geométrica vertical dada ao duto de maneira a se induzir a flambagem naquela região e assim controlar sua resposta estrutural. Foi desenvolvido inicialmente por Harrison et al [1] e posteriormente a construção de um modelo numérico representativo foi descrita por Wang et al [2].

Metodologia

Para entender o comportamento estrutural do duto ao ser flambado na presença de *sleeper* foi construído um modelo numérico no software ABAQUS [3] e através de algumas análises foi determinado o comprimento do modelo necessário para que não houvesse efeito de extremidade e como a variação dos atritos solo-duto e *sleeper*-duto influenciaria na deformação do duto.

Modelou-se somente metade do duto a fim de economizar tempo de processamento em cada análise, já que o problema é simétrico em relação ao ponto em que o duto se apóia no *sleeper*.

Considerou-se o eixo x na direção axial do duto, o eixo Y na direção vertical e o eixo Z na horizontal. Toda vez que se for referido a esses eixos nos resultados isso será feito através de números, onde X é 1, Y é 2 e Z é 3.

Na figura 1 se pode visualizar melhor a presença das forças no problema:

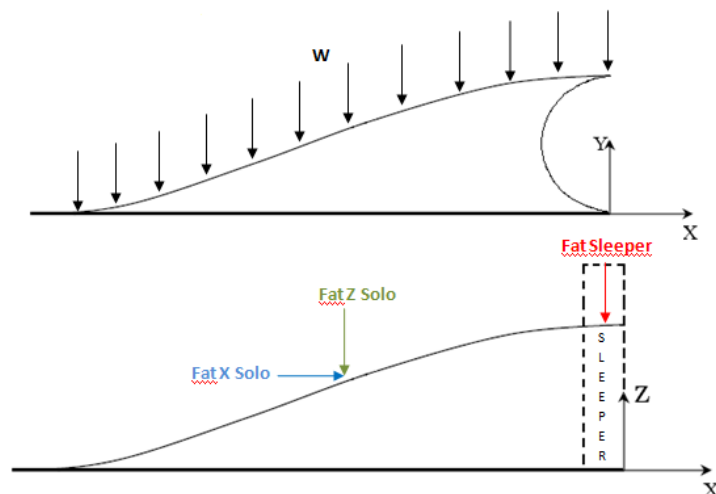


FIGURA 1 – Forças presentes no problema a ser estudado

O modelo consiste basicamente de três partes: solo, duto e *sleeper*. Tanto o solo como o *sleeper* foram modelados como corpos rígidos, ou seja, sem tensões ou deformações. Como o objetivo do trabalho é estudar o comportamento do duto, este não poderia ser modelado da mesma forma que os outros dois. Então o *sleeper* foi construído com elementos de malha “Pipe” que simulam dutos, permitindo que se aplique pressão interna no elemento.

As malhas do solo e *sleeper* não influenciam no resultado já que são construídos como corpos rígidos. Para o duto foi utilizada uma malha com elementos de 1 m de comprimento até uma coordenada superior àquela em que começa a região de *feed-in* para só depois esta malha poder ser menos refinada. Esses valores foram utilizados para os casos de análise e não para os casos de verificação de efeitos de extremidade.

Para modelar os contatos do modelo foi utilizado o modelo de Coulomb em que a força de atrito é um coeficiente de atrito vezes a normal no ponto desejado.

Finalizadas as partes do modelo iniciou-se a criação dos passos envolvidos neste processo:

1. Assentamento do duto: O duto é apoiado sobre o solo, com seu peso aplicado e todos os fatores de atrito ativados;
2. Levantamento do *sleeper*: O fator de atrito axial do solo é desativado para que o *sleeper* seja levantado até a sua posição final, caso esse fator de atrito não seja desativado o duto será tracionado, o que de um modo geral pode ser menos conservativo. Este levantamento pode ser observado na figura 2:

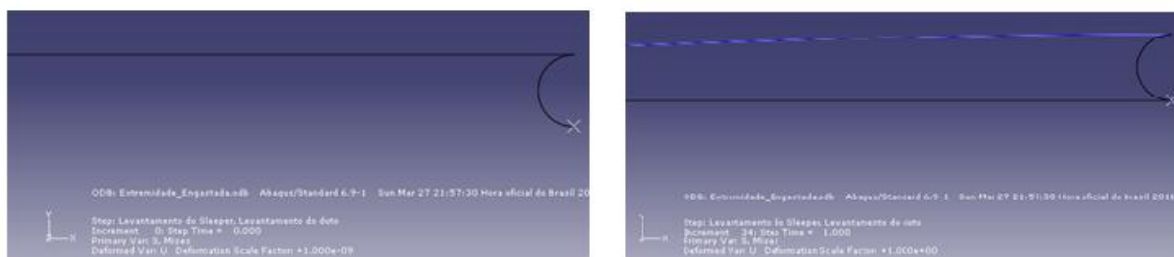


FIGURA 2 – Levantamento do sleeper, na figura da direita ele já está em sua posição final

3. Deslocamento Lateral: É criada uma imperfeição lateral no ponto de simetria do duto. Esta imperfeição serve de gatilho para que a flambagem lateral do mesmo ocorra. A imperfeição consiste em um deslocamento lateral de 1 metro do nó neste ponto. Nesta etapa o fator de atrito axial ainda está desativado pelas mesmas razões apresentadas no passo anterior;
4. Aquecimento: Este passo é responsável pela variação de temperatura no duto. De acordo com a análise em curso podem ser representados até ciclos térmicos de operação. Para este passo o atrito axial do solo é reativado;
5. Aplicação da pressão interna: A pressão interna de operação do duto é aplicada sobre este. Feitos todos estes passos obtêm-se a configuração final do duto, como ilustrado na figura 3:

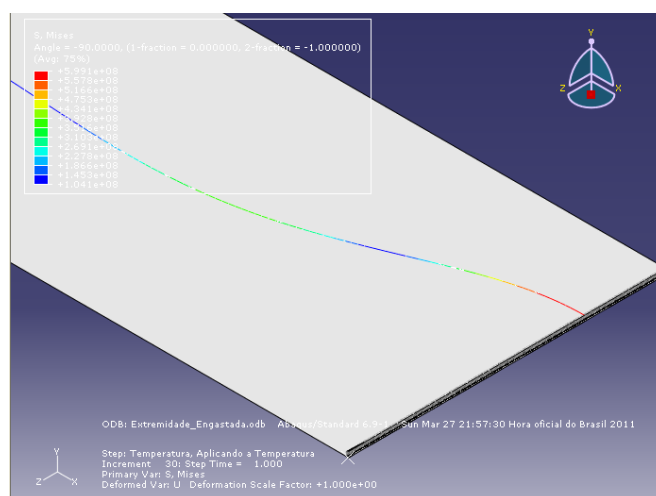


FIGURA 3 – Configuração final do duto

Resultados e Discussão

Antes de qualquer análise ser feita deveria ser determinado o tamanho do duto de maneira que não houvesse efeito de extremidade sobre a flambagem, ou seja, o modelo poderia ser pequeno demais de maneira a não representar o problema físico real, onde se observam grandes comprimentos de *feed-in* no duto. Para todas as análises apresentadas a seguir foram utilizados os seguintes parâmetros no problema:

Diâmetro do Sleeper: 1 m	Coefficiente de expansão térmica: 1.17×10^{-5} m/K
Raio do duto: 0.16195 m	Pressão de projeto: 2.07×10^7 Pa
Espessura do duto: 0.0238 m	Temperatura de projeto: 90 °C
Peso do duto submerso: 1367 N/m	Fator de atrito duto-sleeper: 0.1
Módulo de elasticidade: 2.07×10^{11} N/m ²	Fator de atrito axial do solo: 0.3
Coefficiente de Poisson: 0.3	Fator de atrito lateral do solo: 0.7

Feitas essas definições foram construídos modelos com comprimentos de 2 km, 10 km, 20 km, 30 km e 40 km. Para que a comparação pudesse ser feita, a malha do duto de 2 km foi tomada como base e feita de maneira igual em todos os outros casos. Isso foi feito dividindo a malha de cada caso em duas, um trecho com 2 km e o resto. A malha do trecho de 2 km é do tipo “*Biased*” com *Bias ratio* de 10, com 601 nós e o refinamento próximo ao ponto de simetria. No ponto de simetria o elemento tem o comprimento de 0.852 m e o mais extremo tem 17.02 m. Na figura 4 são apresentados alguns

resultados obtidos com estas análises, só estão apresentadas estas quatro, pois é um número suficiente para decidir qual comprimento do duto a ser utilizado (força axial na seção [SF1], deslocamento lateral [U3], tensão de von Mises [Mises] e tensão na direção axial [S11]):

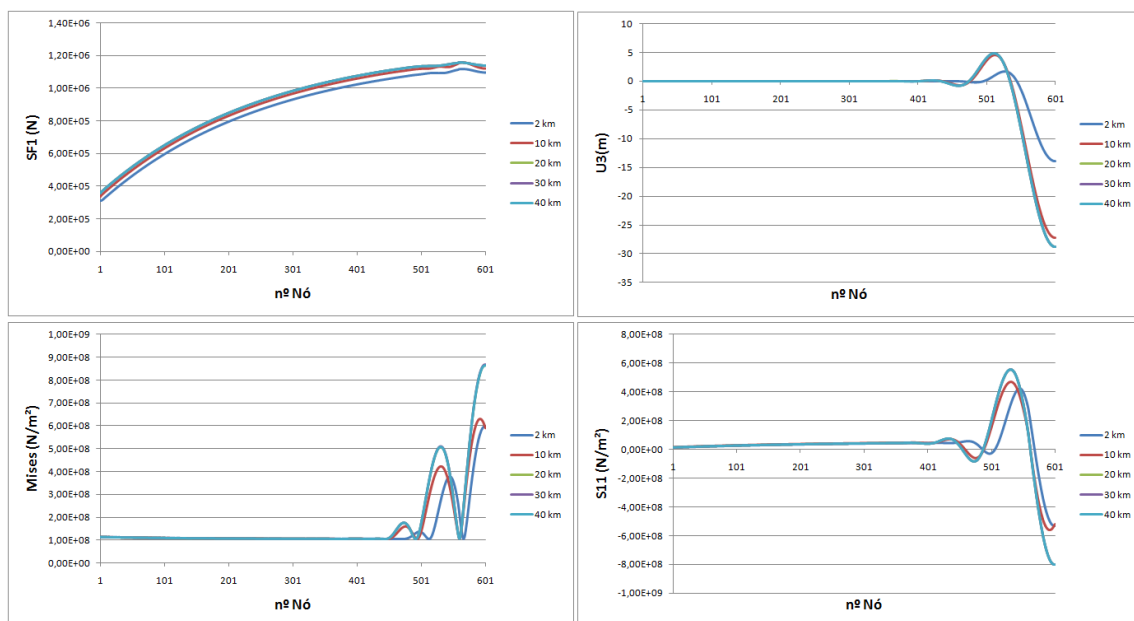


FIGURA 4 – Resultados para os diferentes comprimentos do modelo

Da comparação da força axial na seção (SF1) em cada nó conclui-se que a diferença entre cada modelo é pequena. Porém pode-se notar que o de 2 km forneceu resultados muito diferentes dos outros modelos. Ao se comparar o deslocamento lateral (U3) observa-se que os valores fornecidos pelo modelo de 10 km diferem dos de 20, 30 e 40 km. Neste ponto já estão excluídos os modelos de 2 e 10 km.

Para todas as variáveis não se pode obter diferenças significativas nos gráficos dos modelos de 20, 30 e 40 km. Para então decidir o tamanho do modelo foi comparado o valor de todas as variáveis nó a nó nestes três valores de comprimento. A diferença percentual dos valores obtidos dos dutos de 20 e 30 km para alguns pontos não foi satisfatória, com diferenças de mais de 10%. Entre os dutos de 30 e 40 km a diferença entre os valores foi menor que 1%, sendo assim se concluiu que o tamanho do modelo para análises reais deveria ser 30 km.

De posse dessa informação, optou-se por dois estudos, um de ciclos térmicos e outro da influência do coeficiente de atrito *sleeper*-duto. Primeiramente serão mostrados os resultados obtidos para a variação do coeficiente de atrito entre duto e *sleeper*. Na figura 5 estão apresentados os gráficos da posição do duto na alça de flambagem sendo vista lateralmente e superiormente.

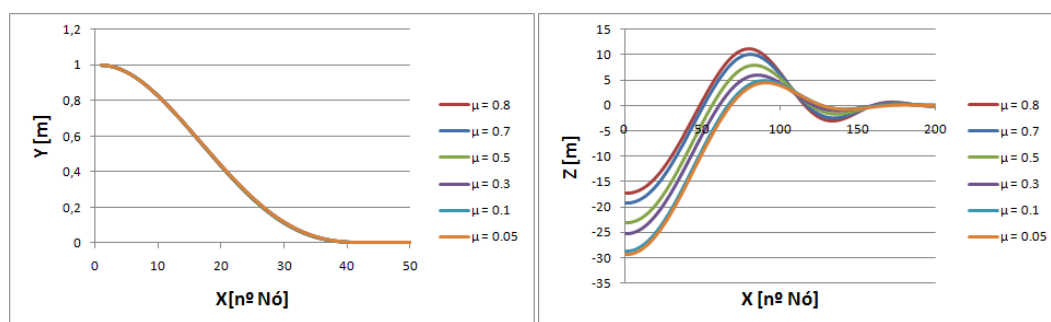


FIGURA 5 – Deslocamentos lateral e vertical do duto para diferentes coeficientes de atrito

Em seguida foram feitas análises do efeito de ciclos de reaquecimento do duto de maneira a representar o duto durante o transporte de óleo aquecido e em um momento fora de operação. Na figura 6 está o resultado obtido para 10 ciclos de reaquecimento e a sua influência sobre o deslocamento lateral do nó sobre o *sleeper* (ponto de simetria).

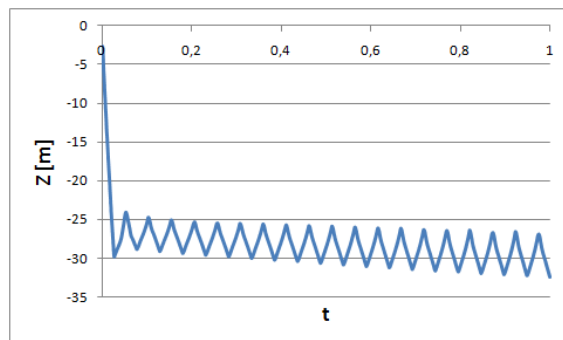


FIGURA 6 – Deslocamento lateral do nó de simetria ao sofrer 10 ciclos de reaquecimento

Conclusões

Como se pôde observar, o perfil vertical do duto não se altera com a mudança do valor do coeficiente de atrito entre ele e o *sleeper*. Independente do valor desse coeficiente o perfil final foi o mesmo. Para o perfil horizontal ocorreu uma grande alteração ao se alterar o valor do coeficiente de atrito, quanto menor seu valor maior o deslocamento lateral do duto, o que era esperado já que a força contrária ao movimento é proporcional a esse coeficiente, ou seja, ao aumentá-lo a força de reação ao movimento aumenta também.

Na análise de ciclos térmicos, percebe-se que ao se esfriar o duto ele não retorna à sua posição original. Com as repetições dos ciclos o deslocamento lateral do duto tende a aumentar, mas chega um momento que ele atinge um limite assintótico. Este é um fator importante a ser considerado no momento de projetar o comprimento do *sleeper*.

Encontra-se em desenvolvimento uma formulação analítica que descreva o comportamento estrutural do duto na presença do *sleeper* sem desprezar nenhum dos atritos presentes.

Agradecimentos

Ao meu professor orientador Murilo A. Vaz pelo suporte e amizade que tem me dado desde o início da faculdade, a ANP e aos responsáveis pelo PRH-03.

À minha família pelo seu esforço e dedicação para me transformar na pessoa que sou hoje.

À minha namorada Karina, pela compreensão devido ao tempo que não pude estar presente em virtude deste trabalho e ao seu grande apoio sempre que necessário.

Aos meus amigos do curso de engenharia naval e do NEO pelos momentos de descontração, apoio e estudo.

Referências Bibliográficas

[1] – Harrison, G.E., Brunner, M.S., Bruton, D.A.S., “King Flowlines – Thermal Expansion Design and Implementation”, Offshore Technology Conference, 2003, Houston, Texas, U.S.A.

[2] – Wang, J., Jukes, P., “An Integrated Design Approach to the Use of Sleepers as Vertical Upsets for Thermal Buckle Management”, 7th International Pipeline Conference, 2008, Calgary, Alberta, Canada.

[3] – ABAQUS 6.10