



VIBRAÇÃO DE DUTOS SUBMARINOS COM APOIO EM FUNDAÇÃO ELÁSTICA DESCONTÍNUA

Aimée Emanuel. C. de Oliveira^a

Deane de Mesquita Roehl^a

aimfeferrao@hotmail.com

droehl@puc-rio.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC

Departamento de Engenharia Civil, Rua Marquês de São Vicente, nº225, Gávea, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo. *Os dutos submarinos são tubos que fazem a ligação entre os poços de petróleo, no fundo do mar, e as plataformas ou navios, na superfície. São considerados como uma das partes críticas de um sistema de exploração offshore. Essas estruturas estão continuamente sujeitas às ações dinâmicas de ondas, correntes marítimas e movimento da plataforma, tendo o seu comportamento influenciado pelo grande número de esforços aos quais são submetidos. O presente trabalho aborda o estudo dinâmico dos dutos submarinos sujeitos à ação de ondas e a sua interação com o solo. Por meio de uma análise por elementos finitos é investigado o comportamento dinâmico do duto apoiado em uma base elástica descontínua. Os resultados numéricos analisados serão as frequências da estrutura e as amplitudes de vibração em função da variação do seu comprimento de vão livre e do período de onda e tempo. Resultados da literatura de ensaios de laboratório em modelos reduzidos e soluções analíticas são usados para comparação com os modelos desenvolvidos.*

Palavras-chave: *Vibração de dutos submarinos, Viga sob base elástica, Interação solo-estrutura, Métodos Numéricos*

1 INTRODUÇÃO

As primeiras perfurações dos poços eram feita através de píeres que se estendiam rumo ao mar. A primeira plataforma de petróleo foi construída na Louisiana em 1947, para operar a uma profundidade menor que 10 metros. Desde então, a demanda por exploração e produção de óleo e gás tem crescido mundialmente, e como consequência, a indústria vem buscando cada vez mais inovações tecnológicas, nas áreas de estruturas, equipamentos, inspeção e reparo. Este avanço tecnológico permitiu à indústria do petróleo, a exploração e produção de reservas a profundidades cada vez maiores. As estruturas utilizadas para tais fins acompanharam a tendência de progresso, gerando soluções estruturais capazes de resistir a condições cada vez mais severas.

Devido à necessidade de exploração em campos situados em águas cada vez mais profundas, os dutos submarinos têm sido amplamente utilizados no transporte de fluidos provenientes da exploração offshore (óleo, gás e água). Os dutos submarinos podem ser utilizados em diversas aplicações como, por exemplo:

- Transporte de óleo e/ou gás de poços de produção para manifolds submarinos;
- Transporte de óleo e/ou gás de manifolds submarinos para unidades de produção;
- Transporte de água e/ou produtos químicos das plataformas produção para manifolds de injeção de poços;
- Dutos de exportação e transporte de fluidos de plataformas de produção para terminais onshore;

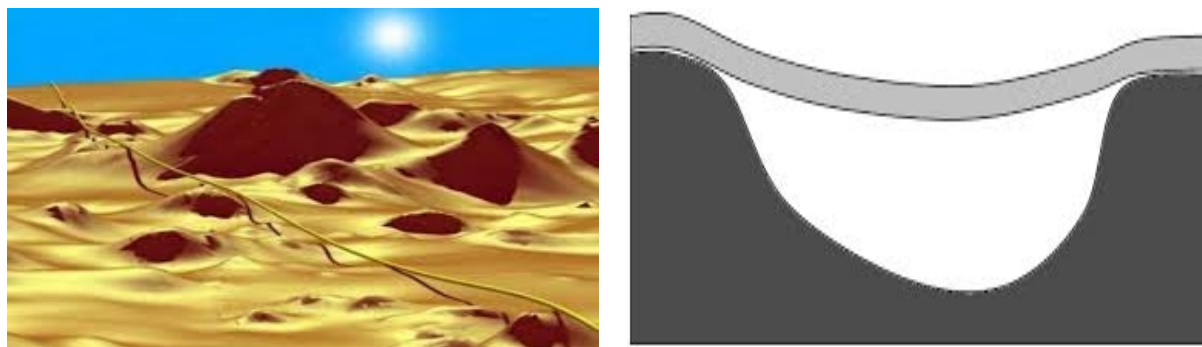


Figura 1-Exemplos de dutos submarinos em vão livres (referência Loureiro, Paula Amorim)

O trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento dinâmico de duto submarino apoiado sobre o solo irregular com base no método dos elementos finitos e através da formulação analítica do problema de vigas apoiadas sobre base elástica. Neste estudo são considerados os efeitos dos diferentes tipos de solo (DNV RP F105), as variações dos vãos livres do duto (Lee Person), as diferentes condições de contorno (caso bi-apoiado e bi-engastado), diâmetro, espessura, frequências naturais, modos de vibração e a interação solo-estrutura.

A finalidade deste estudo é entender o comportamento dinâmico de um duto submarino no fundo do oceano sujeitos a ação de ondas, para que as empresas de petróleo tenham o menor dano possível e maior durabilidade nos seus equipamentos.

2 RECOMENDAÇÕES DA DNV FP-105 (2006)

O objetivo da DNV RP F105 é fornecer critérios de projeto e recomendações práticas para avaliação de dutos submarinos com trechos em vãos livres sujeitos a carregamentos combinados de ondas e correntes. Embora a avaliação de vãos livres seja um problema complexo, que exige conhecimentos detalhados em várias áreas específicas como: vibrações induzidas por vórtices, teorias de ondas, dados ambientais, cálculos de fadiga, análise estrutural e aspectos geotécnicos, os princípios básicos da DNV RP F105 são relativamente simples.

As exigências que devem ser atendidas são as seguintes:

- A análise de fadiga deve compreender um período que seja representativo com o tempo de exposição do duto ao vão livre;
- Todas as variações de tensões impostas ao duto e que são capazes de gerar dano devem ser levadas em consideração;
- As verificações devem ser feitas em todas as seções do duto que possam contribuir para o dano final para todos os modos de vibração;
- Quando necessário, as frequências naturais devem ser calculadas através de um programa de elementos finitos confiável.

A avaliação desses critérios deve ser feita tanto para vãos permanentes, quanto para vãos temporários, sendo também válida para dutos a serem instalados.

De acordo com dados geométricos, propriedades físicas do duto, condições de apoio (no caso de dutos já instalados), fazem-se a primeira verificação, que é o critério *Screening* para determinação do vão máximo admissível. Caso este critério seja violado, deve-se realizar a análise de fadiga. Somente se o critério de fadiga também não for atendido, há necessidade de se realizar algum tipo de intervenção a fim de se alterar a configuração inicial. No caso deste estudo iremos considerar apenas a verificação de vão livre máximo admitido.

2.1 FREQUÊNCIA NATURAL DO DUTO SUBMARINO

A norma DNV RP F105 propõe uma fórmula aproximada para cálculo da frequência natural do primeiro modo de vibração do duto submarino nas duas direções. É importante lembrar que esta formulação foi desenvolvida tomando por base hipóteses conservadoras no que diz respeito ao comprimento do vão, rigidez do solo e tração axial. Considerou-se, por exemplo, que o leito marinho é horizontal, de forma que os ombros nos quais o duto se apóia são horizontais e encontram-se no mesmo nível. Abaixo segue a equação (eq 1) de cálculo da frequência natural do 1º modo de vibração de um duto submarino.

$$f_1 \approx C_1 \cdot \sqrt{1 + CSF} \cdot \sqrt{\frac{EI}{M_e L_{eff}^4} \left(1 + C_2 \frac{S_{eff}}{P_{Cr}} + C_3 \left(\frac{\delta}{D} \right)^2 \right)} \quad (1)$$

Onde:

- C_1, C_2 e C_3 são os coeficientes que variam em função das condições de contorno assumidas para o duto e estão definidos na Tabela 1.
- E é o módulo de elasticidade do material do duto
- I é o momento de inércia
- CSF é o fator de contribuição do concreto à rigidez

$$CSF = K_c \left(\frac{EI_{con}}{EI_{aço}} \right)^{0,75} \quad (2)$$

• K_c constante empírica definida em função do tipo de revestimento anticorrosivo aplicado ao duto;

- m_e é a massa efetiva por unidade de comprimento;

$$m_e = \left(\frac{\int_L m(s) \phi^2(s) ds}{\int_L \phi^2(s) ds} \right) \quad (3)$$

- D é o diâmetro externo do duto;
- P_{cr} é a carga crítica de flambagem;

$$P_{cr} = \frac{(1 + CSF) C_2 \pi^2 EI}{L_{eff}^2} \quad (4)$$

- δ é a deflexão estática

$$\delta = C_6 \frac{q L_{eff}^e}{EI (1 + CSF)} \left(\frac{1}{1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}}} \right) \quad (5)$$

- q é o peso submerso do duto para direção transversal ou carregamento devido ao arraste para direção *in-line*
- C_6 é o coeficiente em função da condição de contorno do duto;
- S_{eff} é a força axial efetiva.

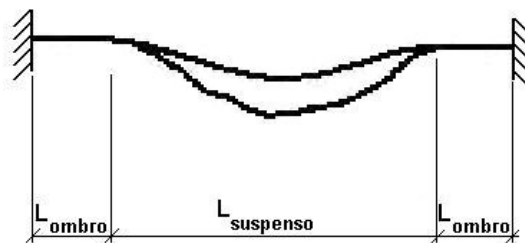


Figura 2-Configuração do duto submarino adotado

A força axial efetiva é muito difícil de ser estimada em função da grande variedade de parâmetro envolvido. São muitas as incertezas relativas às condições operacionais, como

temperatura e pressão, tração residual de lançamento, deflexões laterais do duto, efeitos causados por vãos adjacentes e irregularidades do leito marinho.

	Bi-Rotulado	Bi-Engastado	Assentado sobre o solo
C ₁	1,57	3,56	3,56
C ₂	1.0	4,0	4,0
C ₃	0,8	0,2	0,4
C ₆	5/384	1/384	1/384

Tabela 1 - Coeficientes das condições de contorno

A formulação analítica para cálculo da frequência natural de vibração do duto é baseada no conceito de comprimento efetivo. Este comprimento foi definido como objetivo de simplificar a estimativa da resposta estrutural, levando em consideração o comprimento do duto assentado sobre o solo. O comprimento efetivo é definido como o comprimento de um vão ideal bi-engastado, que forneça a mesma resposta estrutural em termos de frequências naturais que o vão real assentado sobre o solo. Ele pode ser definido segundo a relação que se segue abaixo:

$$\frac{L_{eff}}{L} = \frac{4.73}{-0,066\beta^2 + 1.02\beta + 0,63} \text{ para } \beta \geq 2.7 \quad (6)$$

$$\frac{4,73}{0,036\beta^2 + 0,61\beta + 1,0} \text{ para } \beta < 2.7 \quad (7)$$

Onde:

$$\beta = \log_{10} \left(\frac{K \cdot L^4}{(1 + CSF)EI} \right) \quad (8)$$

- K é a rigidez do solo (vertical ou horizontal, estática ou dinâmica)

Nota-se que o comprimento efetivo L_{eff} é inversamente proporcional ao quadrado de b , que por sua vez é diretamente proporcional à rigidez. Logo, quanto mais rígido for o solo, menor será o comprimento efetivo.

3 DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico desenvolvido neste trabalho para caracterização de dutos apoiados em fundação elástica descontínua foi desenvolvido no programa de elementos finitos Ansys (2012) utilizando elementos tipo casca com quatro nós, Tubo59, existente na biblioteca de elementos do referido programa e apresentado na Fig. 3. Este elemento possui seis graus de liberdade por nó, a saber: translações x , y e z e rotações x , y e z . Este elemento considera esforços de flexão, corte e efeito de membrana.

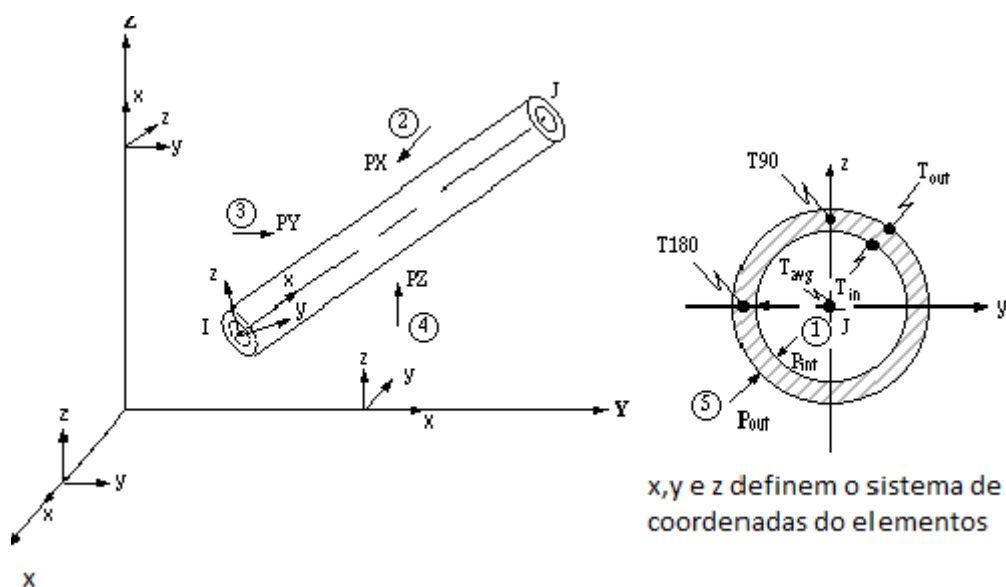


Figura 3- Geometria do Elemento Tubo 59-(Ansys 12)

O fundo do mar pode ser modelado utilizando-se elementos de mola, utilizando o elemento combin39 com capacidade unidirecional força-deformação generalizada não linear que pode ser utilizado em qualquer análise. O elemento tem capacidade de torção longitudinal. A opção longitudinal é um elemento de tensão compressão uniaxial com até três graus de liberdade em cada nó, x , y e z . O elemento tem capacidade de deslocamento para os quais pode haver dois ou três graus de liberdade em cada nó.

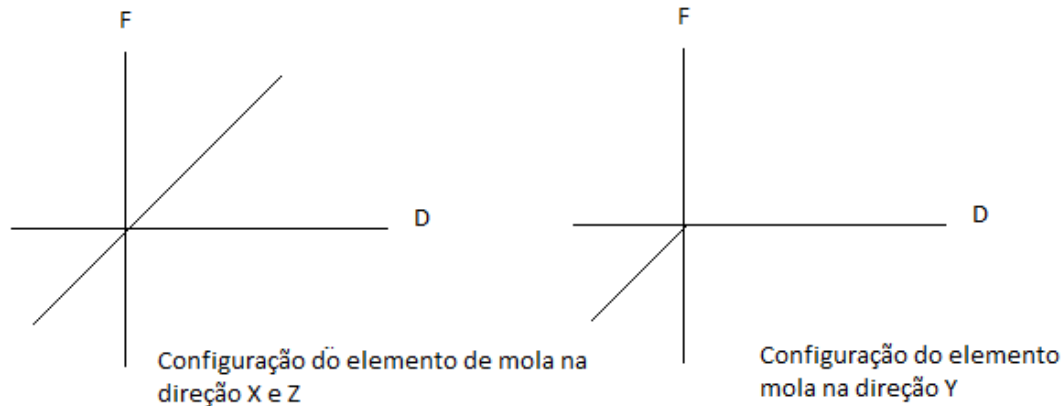


Figura 4- Geometria do elemento combin39-(Ansys 12)

3.1 FORÇAS HIDRODINÂMICAS

Como estudado por Aguiar, a partir de dados do mar é possível obter os esforços exercidos pelo fluido, nas diferentes profundidades. As forças hidrodinâmicas exercidas pela corrente e pelas ondas, além dos movimentos dinâmicos do duto, são calculadas utilizando a equação de Morisson que é expressa através da soma do termo dependente da velocidade orbital da partícula d'água (Força de arrasto- C_D) e do termo dependente da aceleração (Força inercial- C_M), conforme equação abaixo:

$$F_H = \frac{1}{2} \rho D C_D |U(t)| U(t) + \rho \frac{\pi D^2}{4} C_M \frac{\partial U(t)}{\partial t} \quad (9)$$

Onde:

- F_H é a força horizontal no riser;
- ρ é a densidade da água;
- C_D é o coeficiente de arraste;
- C_M é o coeficiente de inércia;
- $U(t)$ é a equação da velocidade da onda;
- $|U(t)|$ é o módulo da velocidade da onda
- $\partial U(t)/\partial t$ é a aceleração;
- D é o diâmetro do duto.

Além das parcelas da força horizontal apresentadas acima, uma expressão semelhante à parcela de arrasto pode ser estabelecida para determinar a força vertical de sustentação, transversal à direção do fluxo, de acordo com a equação abaixo:

$$F_V = \frac{1}{2} \rho D C_L \quad (10)$$

A formulação da equação de Morisson é considerada semi-empírica, já que as parcelas de arrasto e inércia do fluido são afetadas por coeficientes adimensionais C_D e C_M que devem ser calibrados a partir da observação de resultados experimentais. Por exemplo, na análise de

dutos, empregam-se usualmente valores de C_D variando entre 0,7 e 1, 2, em C_M em torno de 2,0 e C_L igual a 3,29.

A força hidrodinâmica agindo sobre o duto é baseada nas componentes de velocidade e aceleração do fluido que são ortogonais ao eixo longitudinal do duto.

O primeiro termo da equação de Morisson é a força de arrasto hidrodinâmico agindo sobre duto. Esta força é proporcional ao quadrado da velocidade relativa entre o duto e o fluxo d'água ao redor deste. O segundo termo da equação é a força inercial exercida sobre o duto pela aceleração da água ao redor deste.

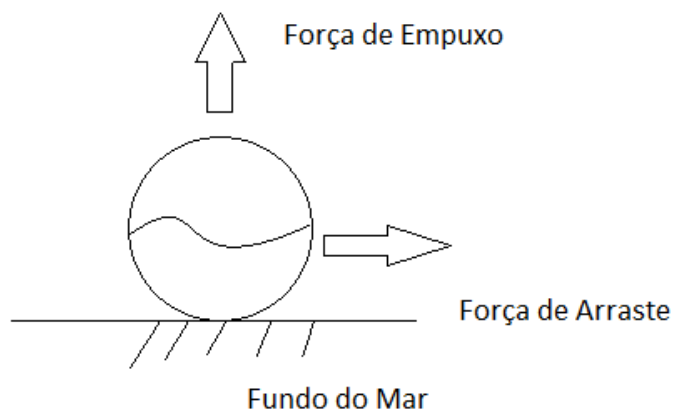


Figura 5 Forças atuantes no duto submarino

3.2 DADOS DO MODELO

O experimento foi realizado por Lee Pearson, em escala reduzida no tanque de provas do Laboratório de Engenharia Costeira e Offshore, localizado na Universidade de Tecnologia Dalian, na China, que possui dimensões de 55 metros de comprimento, 4 metros de largura e 2,5 metros de profundidade.

Os experimentos foram realizados para diversos períodos de onda, para dois tipos de onda diferentes (regular e irregular) e diferentes comprimentos de vão livre do duto submarino. Na Tabela 2 serão apresentados os parâmetro que definem o modelo. São considerados diversos tipos de solos, para os quais a rigidez adotada para do solo estão apresentados na Tabela 3. Esses valores estão definidos na DNV RP F105 item 7.4.10, nas tabelas 7-5 e 7-6.

Tabela 2- Dados Geométricos do Modelo

Parâmetro	Valor	Unidade
Diâmetro externo	0, 060	metro
Espessura	0, 005	-
C _M	2,0	-
C _D	0,7	-
C _L	3,29	-
Módulo de elasticidade	8,87	GPa
Coefficiente de Poisson	0,29	-
Densidade do riser	7800	Kg/m3
Densidade da água	1025	Kg/m3
Comprimento total do riser	4,0	metro
Comprimentolivre L1	1,2	metro
ComprimentoLivre L2	2,1	metro
ComprimentoLivre L3	3,0	metro

Tabela 3-Dados da Rigidez do Solo

K	Tipo de solo
50.000 N/m/m	Argila Muito fofa
160.000 N/m/m	Argila Fofa
500.000 N/m/m	Argila Firme
1.000.000 N/m/m	Argila Rígida
2.000.000 N/m/m	Argila Muito rígida
2.600.000 N/m/m	Argila Dura
4.200.000 N/m/m	Argila Dura

4 SOLUÇÃO ANALÍTICA

O do modelo utilizado para a análise paramétrica foi o de solução analítica da viga de Euler-Bernoulli, em vibração livre e sem escalonamento. Neste modelo somente os deslocamentos produzidos por flexão pura são considerados. O deslocamento produzido por força cortante e as forças inerciais originadas pela rotação da seção transversal (inércia de rotação) são desprezados. Este modelo, conhecido também como teoria elementar, aplica-se somente a vigas esbeltas e com baixas frequências naturais.

A viga foi dividida em três partes, sendo a parte 1 com molas, a parte 2 sem molas e a parte 3 com molas, com isso obtemos no total 12 equações com 12 incógnitas. A figura 6 mostra o desenho esquemático do modelo de viga utilizado neste estudo.

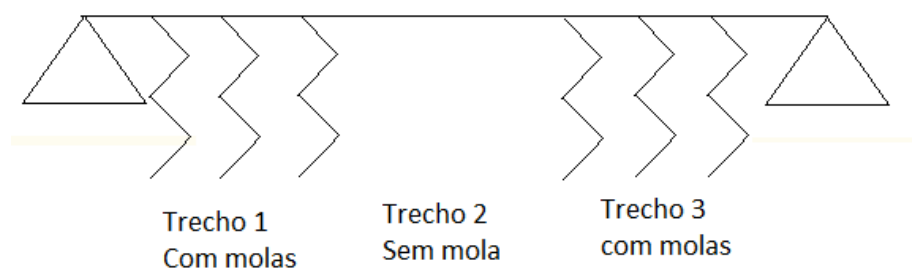


Figura 6-Desenho esquemático da viga apoiada sobre molas

Para o trecho 1 da viga com apoio elástico, têm-se a seguinte equação:

$$-\frac{\partial^2}{\partial x^2} (EI v''(x, t)) = m v(\ddot{x}, t) + K \omega^2 \quad (11)$$

Para o trecho 2 da viga sem apoio elástico, têm-se a seguinte equação:

$$-\frac{\partial^2}{\partial x^2} (EI v''(x, t)) = m v(\ddot{x}, t) \quad (12)$$

Para o trecho 3 da viga com apoio elástico, têm-se a seguinte equação:

$$-\frac{\partial^2}{\partial x^2} (EI v''(x, t)) = m v(\ddot{x}, t) + K \omega^2 \quad (13)$$

Através das condições de contorno para a viga bi-apoiada e para a viga bi-engastada obtemos 12 equações que irão gerar uma matriz 12 x 12 com 12 incógnitas. Essas equações foram colocadas no programa Maple e extraídas as possíveis frequências naturais da estrutura e comparadas com o modelo de elementos finitos.

5 RESULTADOS

Comparando os resultados analíticos da norma DNV-RP-F 105 com os encontrados no modelo de elementos finitos (Ansys 12) com os cálculos analíticos podemos observar que os valores encontrados estão próximos, o que nos leva a acreditar que o modelo de elementos finitos pode ser utilizado para a realização de outras análises.

No Ansys, fizemos uma análise dinâmica no tempo (foi utilizado um tempo de 40 s) com a variação do seu comprimento de vão livre (foi utilizado três comprimentos de vão livre diferentes). Como referência todos os resultados extraídos foram o meio do vão do duto submarino.

5.1 VIGA BI-APOIADA

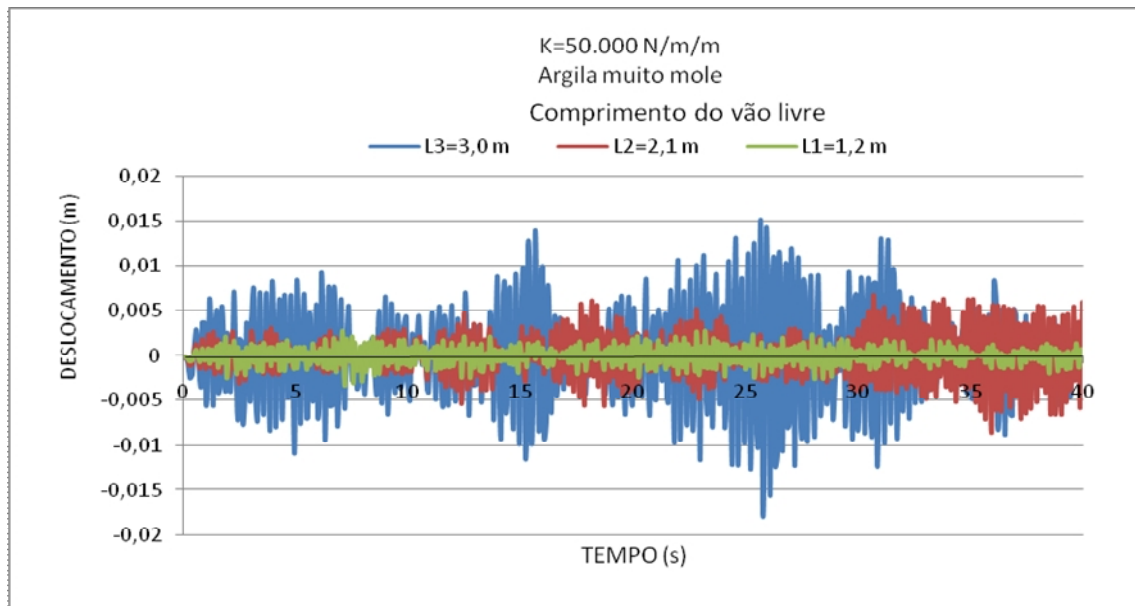


Figura 7 -Viga bi-apoiada com deslocamento vertical no meio do vão

Nesse gráfico podemos observar como já era esperado um maior deslocamento para o comprimento de vão livre maior (L3). O que foi notado também é que os deslocamentos não foram simétricos. Em nenhum dos comprimentos de vão livre. Os maiores deslocamentos encontrados foram: para o comprimento de vão livre L3=0,0147 m, L2=0,00672 m e L1= 0,00273 m.

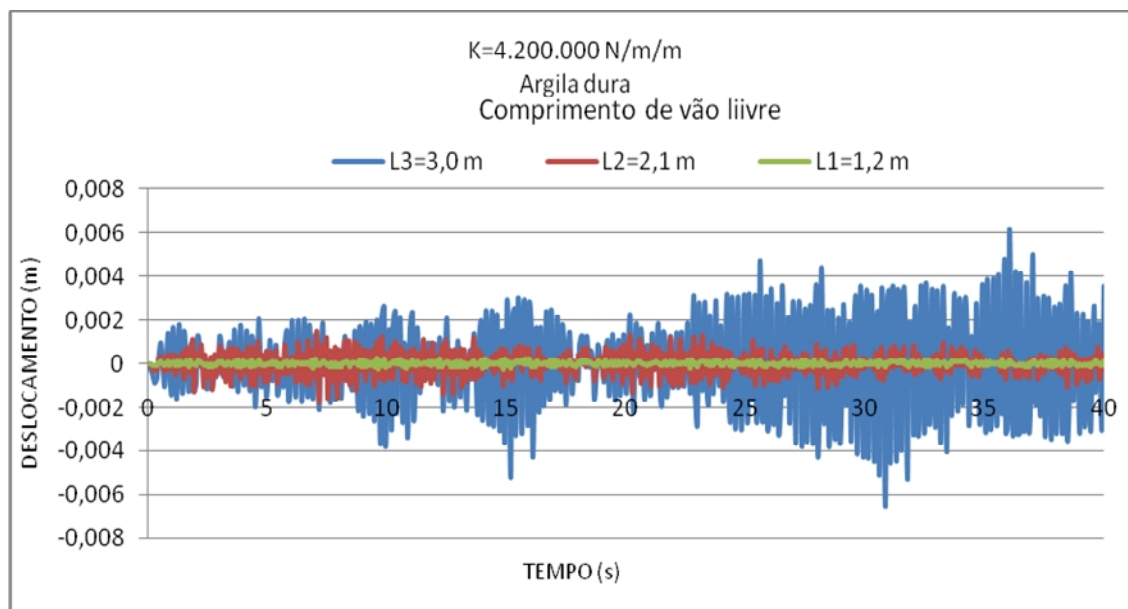


Figura 8-Viga bi-apoiada com deslocamento vertical no meio do vão

Nesse caso onde temos uma argila dura, o que aconteceu foi que os deslocamentos verticais nos três comprimentos de vão livres foram bem menores que os encontrados anteriormente na argila mole, o que já era esperado, pois quando mais rígido for o solo menor será o seu deslocamento. No deslocamento vertical L1, os valores encontrados foram bem simétricos.

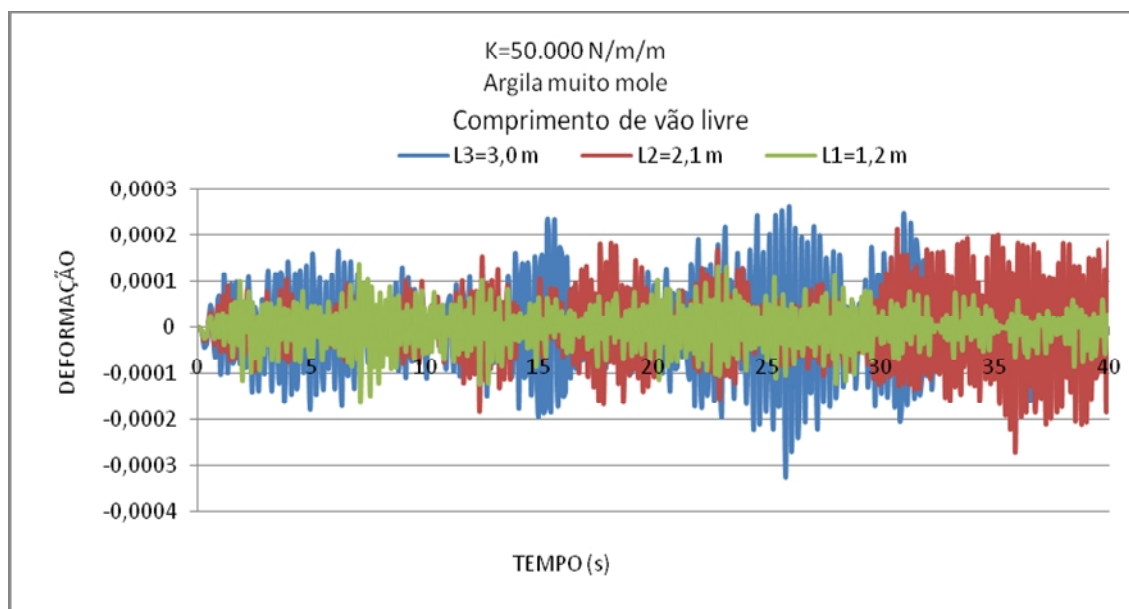


Figura 9-Viga bi-apoiada com deformação vertical no meio do vão

No gráfico de deformação observamos que para os comprimentos de vão livre L3 e L2 os valores máximos encontrados foram bem próximos. Os valores encontrados foram: L3=0, 000262, L2=0, 000214 e L1=0, 000137.

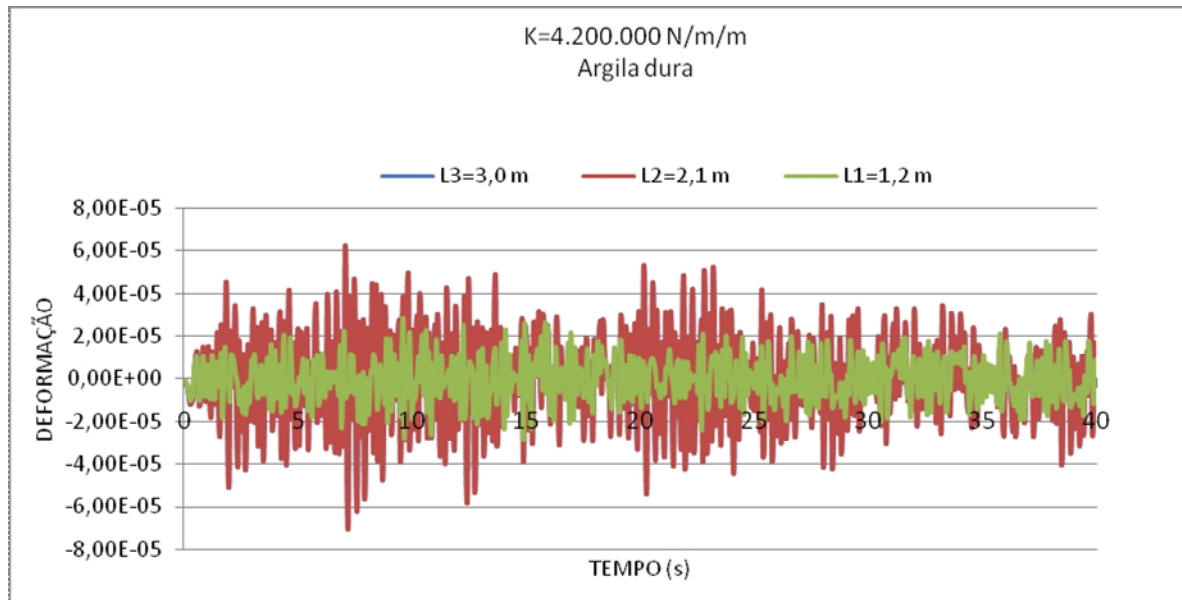


Figura 10-Viga bi-apoiada com deformação vertical no meio do vão

Com o aumento da rigidez do solo, as deformações foram bem menores do que as encontradas para a argila mole e os valores para os comprimentos de vão livre L3 e L2 foram iguais. Os valores encontrados foram: L3=0, 0000620, L2=0, 0000620 e L1=0, 0000281.

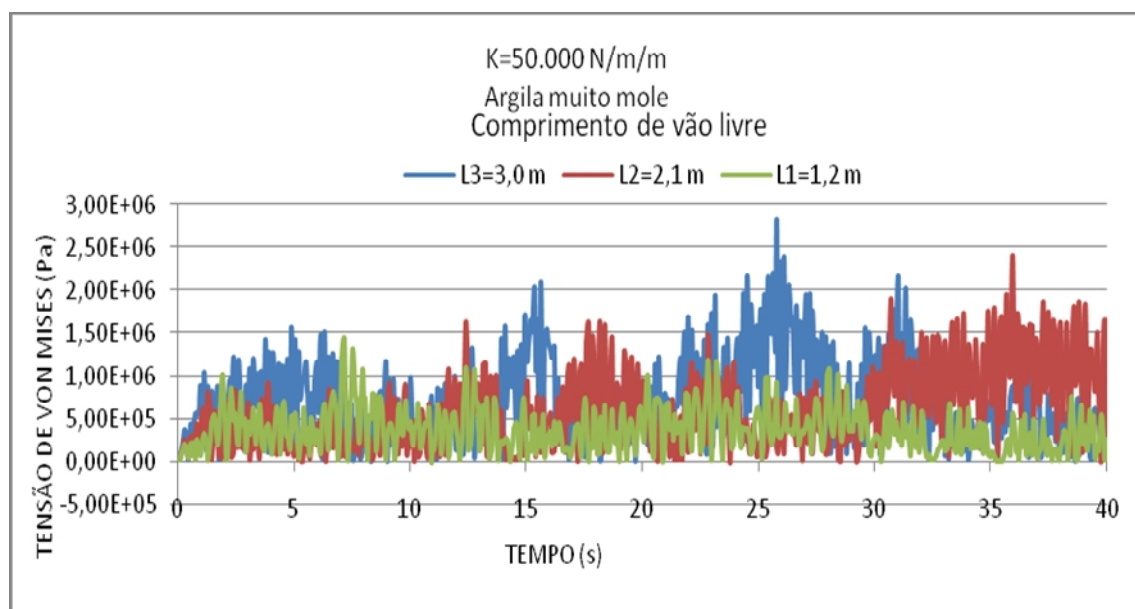


Figura 11-Viga bi-apoiada com tensão de Von Mises no centro

Os valores de tensão de Von Mises encontrados foram bem baixos e podemos observar que o duto submarino não sofreu plastificação. Os valores de tensão de Von Mises encontrados foram: L3=2,83 x 10⁶ Pa, L2=2,40 x 10⁶ Pa e L1=1,43 x 10⁶ Pa.

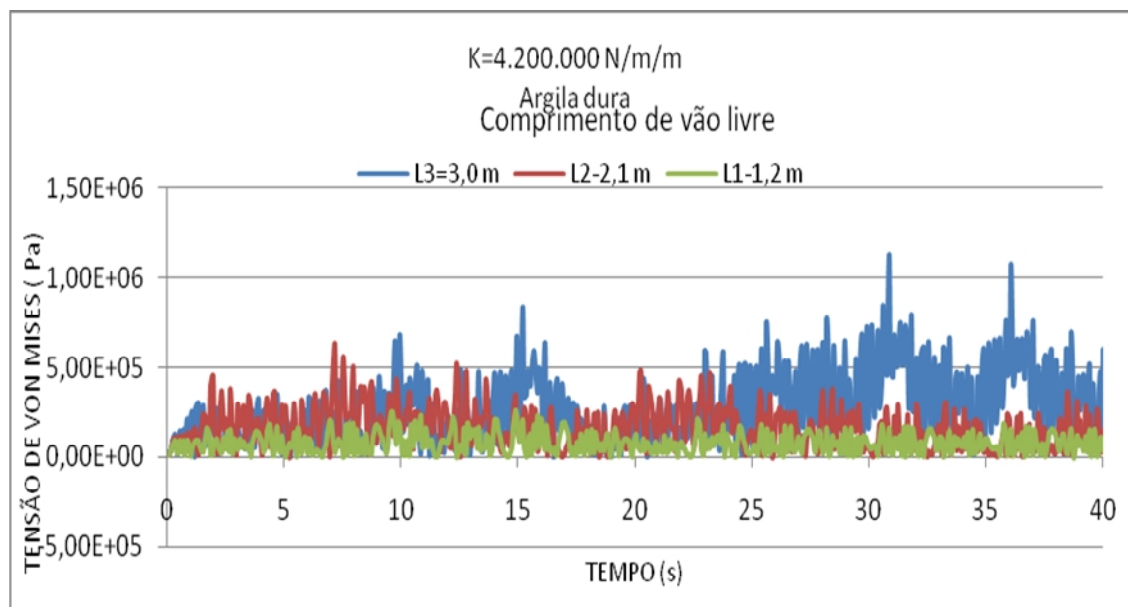


Figura 12-Viga bi-apoiada com tensão de Von Mises no centro

Com o aumento da rigidez os valores da tensão diminuíram bastante. Para os comprimentos L2 e L1 as tensões se mostraram mais simétricas do que no caso de L3. Os valores de tensão encontrados fora: $L3=1,12 \times 10^6 \text{ Pa}$, $L2=6,30 \times 10^6 \text{ Pa}$ e $L1=2,56 \times 10^6 \text{ Pa}$.

5.3 VIGA BI-ENGASTADA

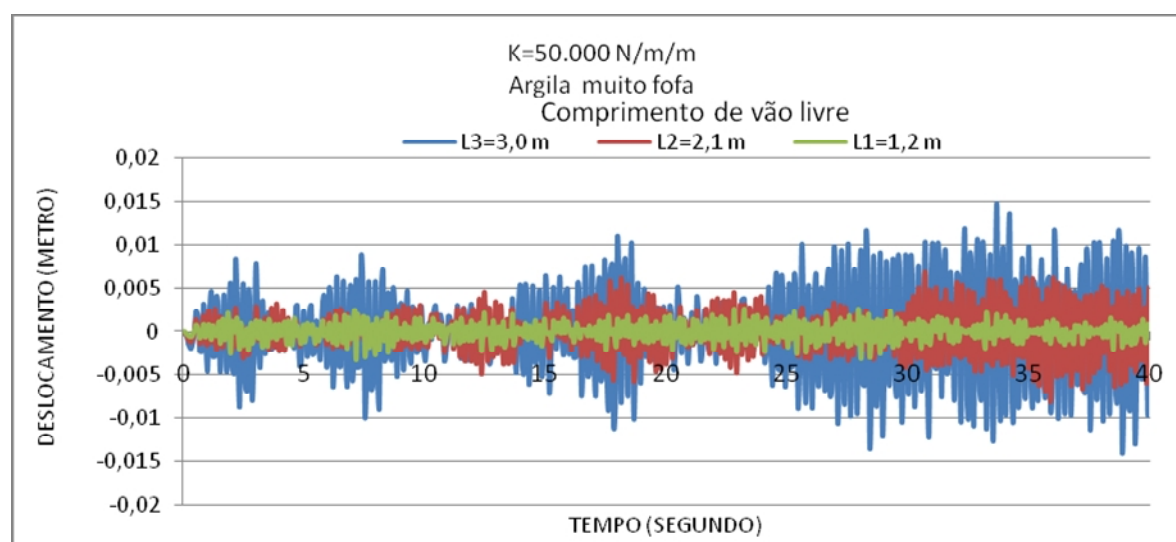


Figura 13-Viga bi-engastada com deslocamento vertical no meio do vão

Os valores de deslocamento para o comprimento de vão livre L1 se mostraram mais simétricos do que para os comprimentos L2 e L3. Os valores dos deslocamentos no meio do vão para o caso da viga bi-engastada não mostraram diferença, pois os valores máximos encontrados para os deslocamentos nos três comprimentos de vão livre foram iguais para o

caso bi-apoiado. Os valores encontrados foram: $L3=0,0147$ m, $L2=0,00677$ m e $L1=0,00273$ m.

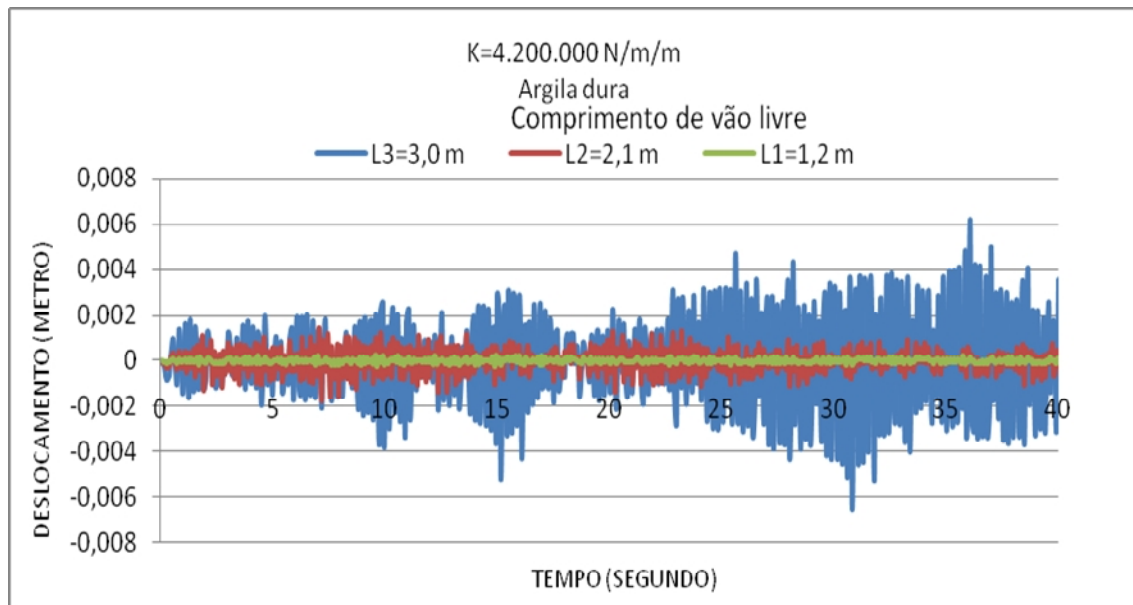


Figura 14-Viga bi-engastada com deslocamento vertical no meio do vão

Os valores encontrados para os deslocamentos foram bem próximos aos valores encontrados para o caso bi-apoiado. Os valores encontrados foram: $L3=0,00619$ m, $L2=0,00145$ m e $L1=0,000229$ m.

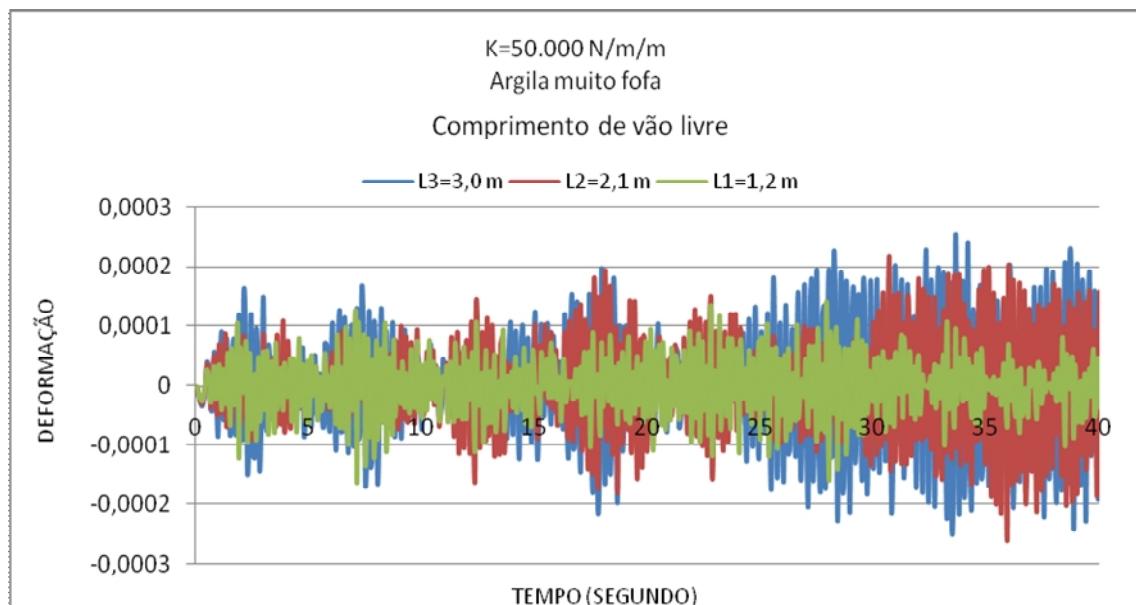


Figura 15-Viga bi-engastada com deformação vertical no centro

As deformações tiveram valores bem próximos aos encontrados no caso bi-apoiado. Os valores encontrados foram: $L3=0,000253$, $L2=0,000217$ e $L1=0,000140$.

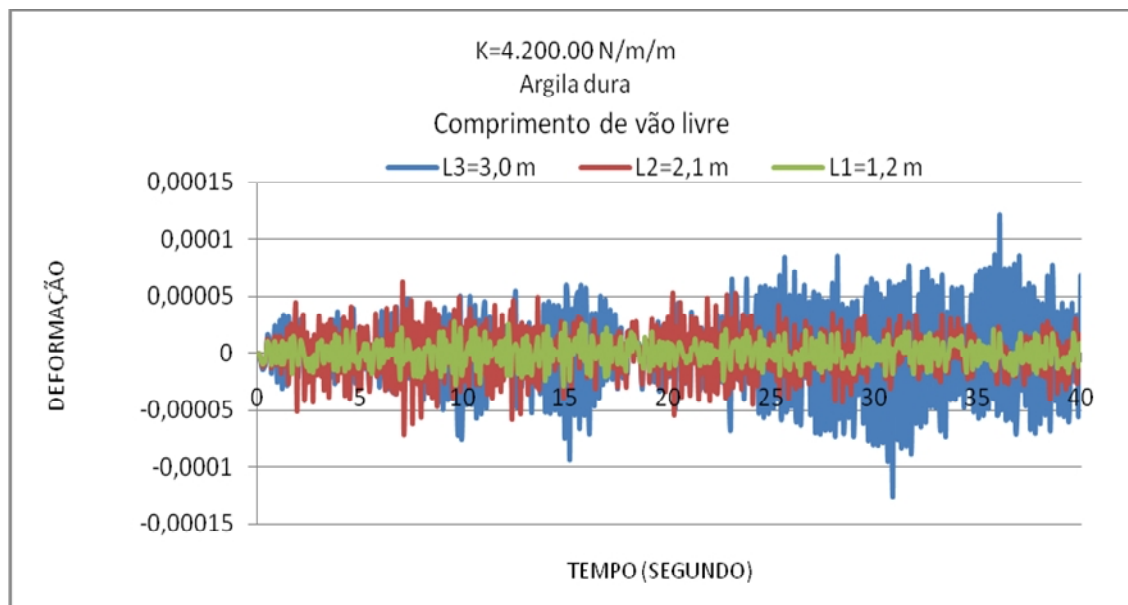


Figura 16-Viga bi-engastada com deformação vertical no centro

Diferente do caso da viga bi-apoiada os valores de deformação encontrados para os três comprimentos de vão livres foram diferentes. O valor da deformação de $L3$ para este caso foi bem maior do que para o caso bi-apoiado. Para os comprimentos $L2$ e $L1$ os valores obtidos foram próximos ao caso bi-apoiado.

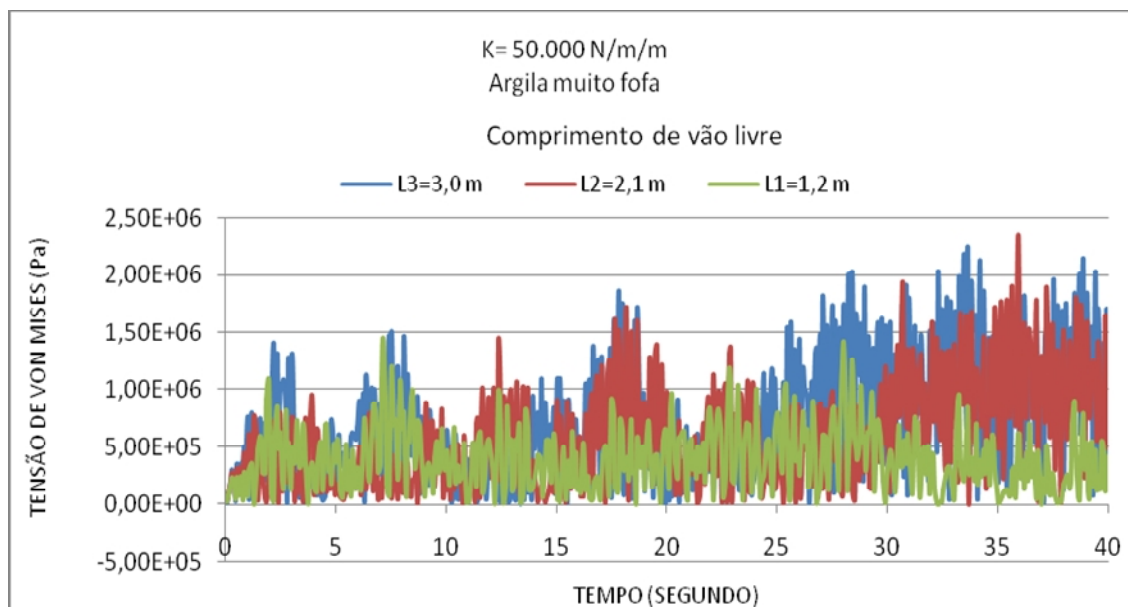


Figura 17-Viga bi-engastada com tensão de Von Mises no centro

Como já era de se esperar os valores de tensão de Von Mises foram maiores para o caso da viga bi-engastada. Os valores para o maior comprimento de vão livre também foram maiores. Os valores obtidos foram: $L3=2,24 \times 10^6$ Pa, $L2=2,32 \times 10^6$ Pa e $L1=1,45 \times 10^6$ Pa.

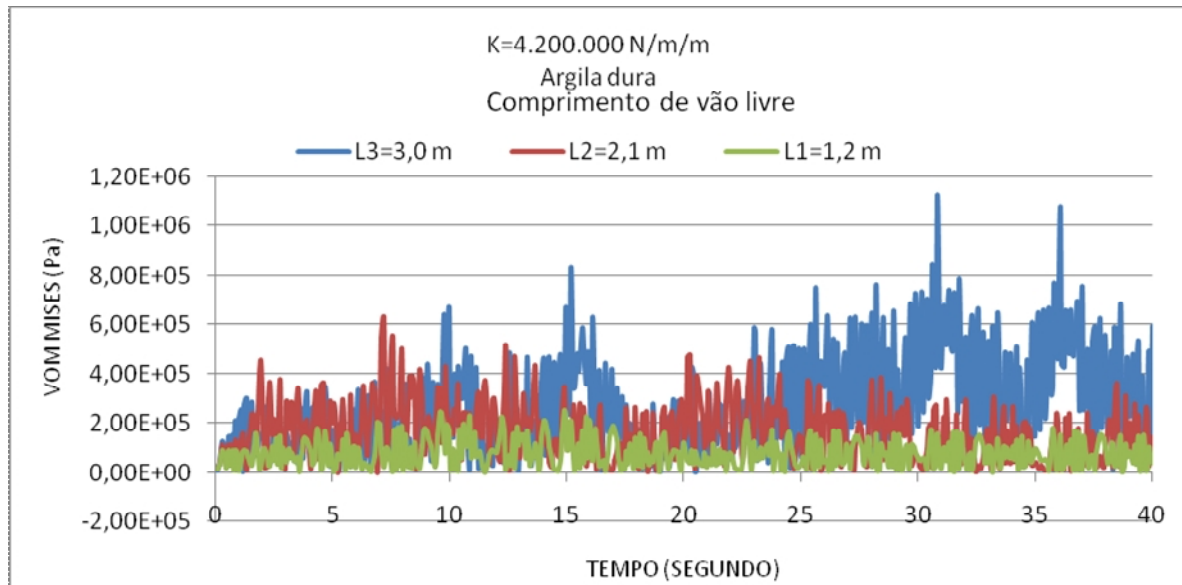


Figura 18-Viga bi-engastada com tensão de Von Mises no centro

Os valores de tensão de Von Mises encontrados para os comprimentos L3 e L2 foram iguais aos encontrados para o caso de viga bi-apoiada, mostrando que não ocorreu diferença de um caso para o outro. Os valores encontrados foram: $L3=1,12 \times 10^6$ Pa, $L2=6,29 \times 10^6$ Pa e $L1=2,53 \times 10^6$ Pa.

6 CONCLUSÃO

Quanto mais rígido for o solo menor serão os deslocamentos, deformações e tensões. A variação do comprimento de vão livre é diretamente proporcional ao deslocamento, deformação e tensão, isso é, quanto maior vão livre o duto submarino possuir maior será o seu deslocamento, a sua deformação e a sua tensão. Para o caso analisado em alguns caso podemos observar que não houve grande diferença nos valores encontrados quando houve comparação da viga bi-apoiada com a bi-engastada, pois o comprimento total da viga era muito pequeno, fazendo com que os valores encontrados fossem muito próximos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se realizar uma análise com comprimento de duto submarino maior e comprimentos de vão livre diversos, calculados pela norma e que depois que seja feita as análise dinâmicas aqui estudadas para ver como a estrutura se comporta com comprimentos grandes de dutos submarinos.

REFERÊNCIAS

Ansys 12.0 ®, ANSYS - Inc. *Theory Reference*, 2010

Recommended Practice DNV-RP-F105. *Free Spanning Pipelines*. February 2006.

Lope, R.K.D, *Análise de Estruturas Sujeitas a Vibrações Induzidas por Vórtices*. Dissertação de M.Sc., Coppe/UFRJ, Rio de Janeiro

Notas de aula de dinâmica das estruturas, Professor Paulo Gonçalves.

Loureiro, Paula Amorim, 2011. *Análise de Vãos livre sem dutos Rígidos*, Projeto de Graduação/UFRJ, Rio de Janeiro

Aguiar, Luís Alberto D'Ángelo, 1995. *Fadiga de Dutos Submarinos no Fundo do Mar*, Tese de Doutorado/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

Lee Pearson, *Influence of Pipeline Span on the Dynamic Response*