

BRUNA ALESSI MAZZUCHINI

**Análise da interação *riser*-solo baseada na modelagem numérica
de meios contínuos**

Área de concentração:
Engenharia de Petróleo – Simulação
Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Ronaldo Carrion

Santos
2017

BRUNA ALESSI MAZZUCHINI

**Análise da interação *riser*-solo baseada na modelagem numérica
de meios contínuos**

Trabalho de Formatura apresentado à
comissão de graduação da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Engenheiro de
Petróleo.

Área de concentração:
Engenharia de Petróleo – Simulação
Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Ronaldo Carrion

Santos
2017

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

Santos, 10 de dezembro de 2017.

Assinatura do autor Bruna Mazzuchini

Assinatura do orientador _____

Catlogação-na-Publicação

Mazzuchini, Bruna

Análise da interação riser-solo baseada na modelagem numérica de meios contínuos / B. Mazzuchini, R. Carrion – São Paulo, 2017.
47 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.Riser 2.Mecânica Estrutural 3.Método dos Elementos Finitos
4.Modelagem Numérica 5.Interação Solo Estrutura I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo
II.t. III.Carrion, Ronaldo

DEDALUS - Acervo - EPBS



31900001006

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Ulysses e Andréia, pois eles são a base da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e a toda minha família pelo enorme apoio e motivação.

Agradeço a todos os amigos que estiveram comigo nos momentos mais importantes.

Agradeço também a todos os professores e funcionários que me acompanharam durante a graduação, em especial ao Prof. Ronaldo Carrion, responsável pela realização deste trabalho.

Por fim, agradeço à Escola Politécnica como um todo, por me proporcionar muito aprendizado, muitas conquistas e os melhores cinco anos da minha vida.

EPÍGRAFE

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade.”

Albert Einstein

RESUMO

A presente monografia apresenta uma análise dos esforços atuantes na porção do *riser* que está em contato com o leito marinho, através do Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o *software* de modelagem numérica *Ansys®*. Serão feitas simulações utilizando carregamentos harmônicos. O *riser* será representado por um tubo, e o solo, por um bloco uniforme. O único parâmetro que irá variar entre as simulações é o tamanho do bloco de solo. Na prática, o solo possui um tamanho infinito quando comparado ao tamanho do *riser*, portanto, quanto maior ele for representado no *software*, mais próximos estarão os resultados da realidade.

PALAVRAS-CHAVE: *Riser*; Mecânica Estrutural; Método dos Elementos Finitos; Modelagem Numérica; Interação Solo Estrutura.

ABSTRACT

This monograph shows a stress analysis made on the portion of the riser that is in contact with the seabed through the Finite Element Method (FEM), using the numerical modeling software Ansys®. Simulations will be done using harmonic loads. The riser will be represented by a pipe, and the soil, by a uniform block. The single parameter that will vary in the simulations is the soil block size. In practice, the soil has an infinite size when compared to the size of the riser, so the larger it is represented in the software, the closer the results will be to the reality.

KEY WORDS: Riser; Structural Mechanics; Finite Element Method; Numerical Modeling; Soil Structure Interaction.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO	2
1.2	RELEVÂNCIA DO ESTUDO	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	RISERS	5
2.2	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF) E ANSYS®	8
2.3	MOVIMENTOS HARMÔNICOS	10
2.4	CRITÉRIO DE FALHA DE VON MISES	11
3	METODOLOGIA	13
3.1	PREMISSAS	13
3.2	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	14
3.3	PROCEDIMENTO TEÓRICO	15
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	19
4.1	RESULTADOS	19
4.2	DISCUSSÕES	23
5	CONCLUSÕES	26
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	27
6.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO (MEC) E FORTRAN	27
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
8	APÊNDICE	30

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Imagem esquemática de risers de produção e injeção. (Fonte: Repsol Sinopec Brasil)	1
Figura 2: Explosão da plataforma petrolífera Deepwater Horizon em 20/04/2010. (Fonte: REUTERS/U.S. COAST GUARD).....	3
Figura 3: Pelicanos afetados pelo acidente na Deepwater Horizon. (Fonte: SEAN GARDNER)	4
Figura 4: Configurações geométricas de um riser rígido: (a) Vertical; (b) CVAR; (c) Em catenária; (d) Lazy wave. (Fonte: Arruda et al.)	6
Figura 5: Configurações geométricas de um riser flexível (a) Catenária Direta; (b) Lazy-S; (c) Lazy-Wave; (d) Steep-S; (e) Steep-Wave (f) Lanterna Chinesa.	7
Figura 6: Desenho esquemático de um riser híbrido. (Fonte: Arruda et al.)	7
Figura 7: Risers rígidos de perfuração. (Fonte: Tenaris)	8
Figura 8: (a) Estrutura cilíndrico sem subdivisões. (b) Exemplo de uma malha mais refinada. (c) Exemplo de uma malha mais grosseira.....	9
Figura 9: Representação de uma onda em Movimento Harmônico.....	10
Figura 10: Região de segurança de acordo com o critério de falha de von Mises.	12
Figura 11: Representação do elemento SOLID186 no software Ansys®.	14
Figura 12: Representação das estruturas do <i>riser</i> e do solo nas dimensões da simulação 1a.	15
Figura 13: Representação das estruturas discretizadas e após a aplicação dos carregamentos nas dimensões da simulação 1a.	16
Figura 14: Desenho esquemático da deformação de um bloco de solo após aplicação de uma pressão vertical.	17
Figura 15: Representação das estruturas discretizadas e com os carregamentos adicionais nas dimensões da simulação 1a.	18
Figura 16: Ponto de contato para análise (vista frontal).	19

Figura 17: Pontos de análise do solo na simulação 1a (vista superior).....	21
Figura 18: Gráfico de deslocamento/pressão nos pontos do solo na simulação 1a com frequência de 1Hz.	22
Figura 19: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 1a, através da união de elementos.	30
Figura 20: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 1a, através da união de nós.....	31
Figura 21: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 2a, através da união de elementos.	31
Figura 22: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 3a, através da união de elementos.	32
Figura 23: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 4a, através da união de elementos.	32
Figura 24: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 1b, através da união de elementos.	33
Figura 25: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 2b, através da união de elementos.	33
Figura 26: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 3b, através da união de elementos.	34
Figura 27: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 4b, através da união de elementos.	34
Figura 28: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 1a com carregamentos adicionais, através da união de elementos.....	35

LISTA DE TABELAS

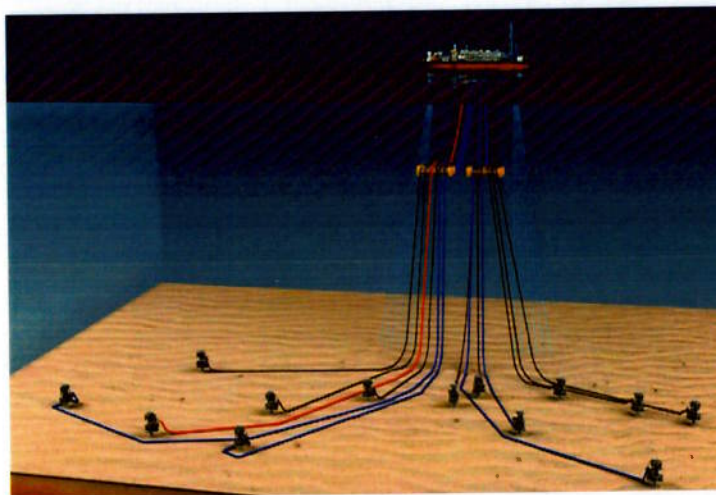
Tabela 1: Dimensões do bloco de solo por simulação.....	14
Tabela 2: Resultados das simulações com frequência de 1 Hz.....	20
Tabela 3: Resultados das simulações com frequência de 3 Hz.....	20
Tabela 4: Valores máximos de pressão aplicados sem que haja falha no material.	21
Tabela 5: Valores de deslocamento/pressão nos pontos do solo na simulação 1a.	22

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios da indústria offshore é garantir uma boa comunicação dos equipamentos submarinos com a unidade de produção na superfície. Essa comunicação deve ser capaz de garantir o transporte dos fluidos produzidos e de suprir os controles e necessidades operacionais dos equipamentos que antes, devido às baixas profundidades, eram localizados na própria superfície (Antonio, 2011).

O *riser* é um duto ascendente responsável por fazer essa conexão entre a cabeça do poço e a plataforma, representado na Figura 1. Dentre as suas funções, pode-se citar o transporte do óleo e do gás produzidos; a transmissão eletro-hidráulica para o funcionamento dos equipamentos submarinos; a injeção de fluidos; e o controle do poço (Thomas, 2001).

Figura 1: Imagem esquemática de risers de produção e injeção. (Fonte: Repsol Sinopec Brasil)



Do ponto de vista estrutural, um *riser* deve resistir aos carregamentos ambientais e cargas dinâmicas como arrasto da correnteza, indução de vibração por vórtices, movimentos impostos pela plataforma flutuante, pressão interna e pressão externa sobre a estrutura (Antonio, 2011).

O comportamento estrutural dos *risers* na indústria do petróleo tem sido objeto de muitos estudos devido à criticidade de seu papel. Qualquer falha pode gerar consequências bastante danosas ao meio ambiente e grandes prejuízos financeiros.

Devido a isso, a análise mecânica dessa estrutura é fundamental para garantir uma produção com a menor quantidade possível de intervenções.

Um dos movimentos das plataformas flutuantes é chamado de *heave*, que consiste no movimento oscilatório vertical (apenas subida e descida) da plataforma devido a ação das ondas. Por consequência, essa movimentação arrasta os dutos presos à plataforma. Nas simulações computacionais, o *heave* pode ser representado de forma simplificada por carregamentos harmônicos.

Assim, pode-se estudar os valores de tensão e de deslocamento da estrutura, especialmente da porção em contato com o leito marinho, pois ela possui um comportamento distinto.

A origem das pesquisas envolvendo a interação solo-estrutura deve ser associada aos estudos desenvolvidos no Japão nas décadas de 20 e 30, a partir dos terremotos bastante comuns naquela região. As pesquisas envolviam basicamente a análise do dano estrutural sísmico e as condições do solo. Posteriormente, a dinâmica do solo experimentou um grande crescimento após os destrutivos terremotos no Alaska e em Niigata, em 1964, impulsionado principalmente pela necessidade de se entender o comportamento e o papel do solo, não só durante os terremotos, mas também em outras ocasiões, como por exemplo, em projetos de plataformas de petróleo *offshore*, pois também há uma interação solo-estrutura sujeita a carregamentos.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo fazer uma análise dos esforços atuantes em um *riser* (representado por um tubo) sujeito a carregamentos harmônicos e em contato com o solo (representado por um bloco). Tal análise é baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando modelagem numérica. A influência das dimensões do bloco de solo é estudada, uma vez que a condição de radiação de Sommerfeld (distância infinita) não se aplica ao MEF.

1.2 RELEVÂNCIA DO ESTUDO

A análise mecânica dos esforços atuantes no *riser* é essencial para garantir a correta seleção do material, de forma que não haja nenhuma falha na estrutura. Para

isso, os valores de tensões efetivas previamente encontrados nas simulações de modelagem numérica devem ser inferiores ao limite de escoamento do aço utilizado.

Valores superiores ao limite de escoamento, significam que a deformação do material passa a ser plástica, ou seja, ela se torna irrecuperável e pode gerar falhas, ocasionando vazamentos de óleo, que são extremamente prejudiciais ao meio ambiente, podendo devastar ecossistemas que levam algumas décadas para serem recuperados.

Um exemplo recente é o acidente no Golfo do México em abril de 2010, decorrente de vazamentos de óleo e gás em um *riser* da plataforma *Deepwater Horizon*, operada pela *Transocean* e arrendada até 2013 pela empresa britânica BP. Os vazamentos foram seguidos de outras falhas mecânicas em cadeia e de más decisões humanas, ocasionando em uma grande explosão (Figura 2) que matou 11 funcionários e liberou aproximadamente 5 milhões de barris de petróleo na água (Serafim, 2017).

Figura 2: Explosão da plataforma petrolífera *Deepwater Horizon* em 20/04/2010. (Fonte: REUTERS/U.S. COAST GUARD)



O vazamento durou 87 dias e se espalhou por mais de 1.500 quilômetros de costa do estado americano da Louisiana, destruindo habitats, vida marinha e prejudicando as populações locais.

O óleo liberado no mar afeta os peixes que se alimentam de resíduos e bloqueia a luz do sol prejudicando as algas que realizam fotossíntese (reação em que se retira o gás carbônico (CO_2) e libera-se oxigênio (O_2) para o ambiente). O resultado é que os peixes morrem por falta de oxigênio ou morrem intoxicados pelo óleo vazado.

As substâncias tóxicas do petróleo também se acumulam nos tecidos de mamíferos, tartarugas e peixes, causando distúrbios reprodutivos e cerebrais.

As aves também são afetadas, pois o óleo faz com que suas penas fiquem impregnadas, podendo resultar em afogamentos, como mostra a Figura 3.

Figura 3: Pelicanos afetados pelo acidente na Deepwater Horizon. (Fonte: SEAN GARDNER)



Além disso, os vazamentos acarretam em grandes prejuízos financeiros. Em julho de 2016, a BP anunciava que a conta final que tinha que pagar por esta catástrofe ascendia a cerca de 57 bilhões de euros. Os custos incluíam danos materiais, perdas econômicas, a limpeza do óleo e custos médicos. Em 2017, surge a primeira avaliação mais abrangente para os custos financeiros relativos apenas aos danos causados nos recursos naturais, que resultam em cerca de 16 bilhões de euros adicionais (Serafim, 2017).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os tópicos a seguir serão necessários para o entendimento deste trabalho e estão divididos em quatro seções: a primeira seção será sobre as características gerais de um *riser*, a segunda sobre o Método dos Elementos Finitos (MEF) que será utilizado na modelagem numérica, a terceira irá resumir o conceito de Movimento Harmônico que é utilizado como uma simplificação dos esforços atuantes, e por fim, a última irá abordar o Critério de Falha de von Mises, uma vez que é a tensão efetiva de von Mises que será comparada com o limite de escoamento do aço do *riser* para fazer uma análise de falha.

2.1 RISERS

Como já mencionado anteriormente, o *riser* é um duto ascendente responsável por fazer a conexão entre a cabeça do poço e a plataforma. Portanto, deve ser feito de um material de elevada resistência que seja capaz de fornecer isolamento térmico adequado para garantir o escoamento dos fluidos, resistir às intempéries (água salgada), ao atrito com o solo, corrosão, permeação de gases, etc. Do ponto de vista estrutural, um *riser* deve resistir a diversos carregamentos ambientais. Na análise em questão, serão levadas em conta as cargas dinâmicas causadas pela movimentação vertical da plataforma flutuante.

Os *risers* podem ser classificados de acordo com a sua função (Arruda et al., 2012):

- *Risers* de produção: São responsáveis por conduzir o fluido do poço para a superfície;
- *Risers* de perfuração: Protegem e guiam a coluna de perfuração, permitindo o retorno da lama do poço para a plataforma;
- *Risers* de trabalho (*workover*): São utilizados nas operações de completção, ou seja, conjunto de operações destinadas a equipar o poço para produzir óleo ou gás, ou ainda injetar fluidos no reservatório;
- *Risers* de controle (*wireline riser*): São utilizados para monitorar e controlar a situação do poço;

- *Risers* de exportação: São responsáveis por transportar o óleo e o gás da plataforma para outra unidade ou para a costa.

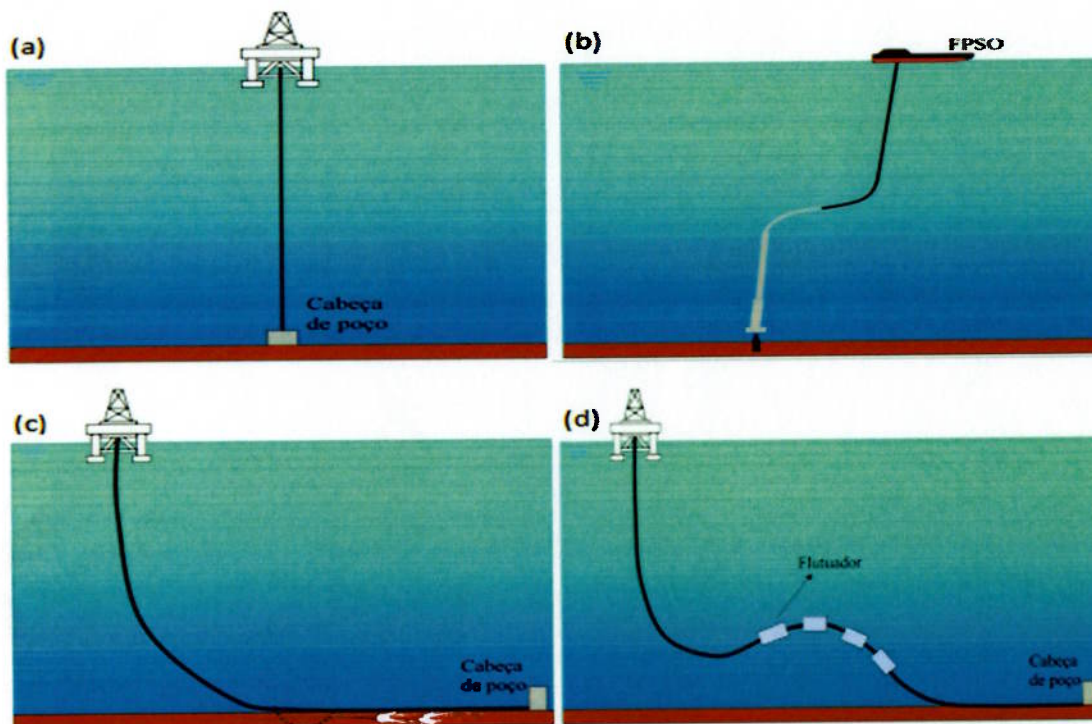
Quanto ao material utilizado, um *riser* pode ser rígido, flexível ou híbrido.

Um *riser* rígido é composto por um corpo cilíndrico metálico, geralmente feito com aços especiais. São estruturas extremamente simples, que apresentam maior facilidade de inspeção, menor custo, maior resistência à pressão e menos restrições de temperatura e profundidade. Porém sua flexibilidade mínima não permite muitas configurações geométricas e dificulta no transporte e na instalação (Arruda et al., 2012).

Dentre as possíveis configurações dos *risers* rígidos (Figura 4), pode-se citar:

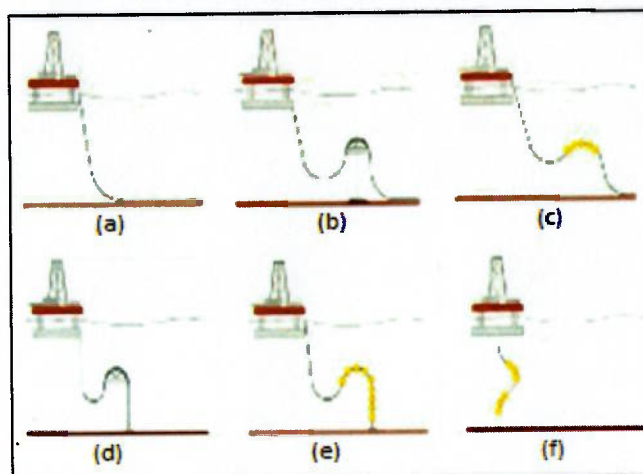
- Vertical ou TTR (*Top Tensioned Riser*);
- CVAR (*Compliant Vertical Access Riser*);
- Catenária ou SCR (*Steel Catenary Riser*);
- Lazy wave*.

Figura 4: Configurações geométricas de um *riser* rígido: (a) Vertical; (b) CVAR; (c) Em catenária; (d) *Lazy wave*.
(Fonte: Arruda et al.)



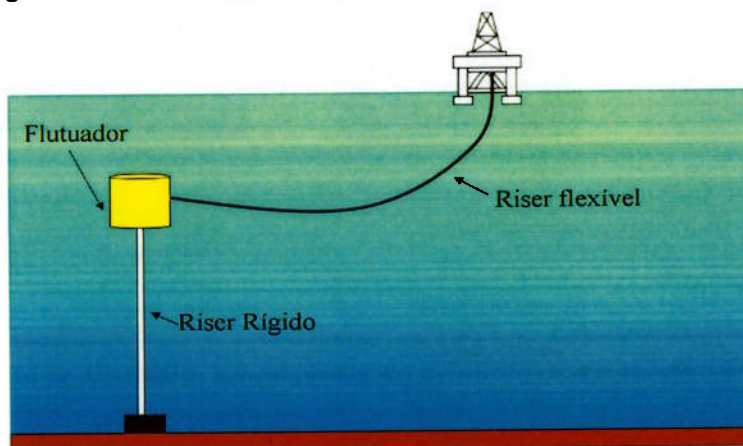
Já os *risers* flexíveis são compostos por uma série de camadas poliméricas intercaladas com camadas metálicas, permitindo uma maior flexibilidade estrutural. Essa vantagem possibilita mais configurações geométricas, que podem variar de acordo com as condições marítimas e os tipos de solo (Arruda et al., 2012). As principais configurações estão representadas na Figura 5.

Figura 5: Configurações geométricas de um riser flexível (a) Catenária Direta; (b) Lazy-S; (c) Lazy-Wave; (d) Steep-S; (e) Steep-Wave (f) Lanterna Chinesa.



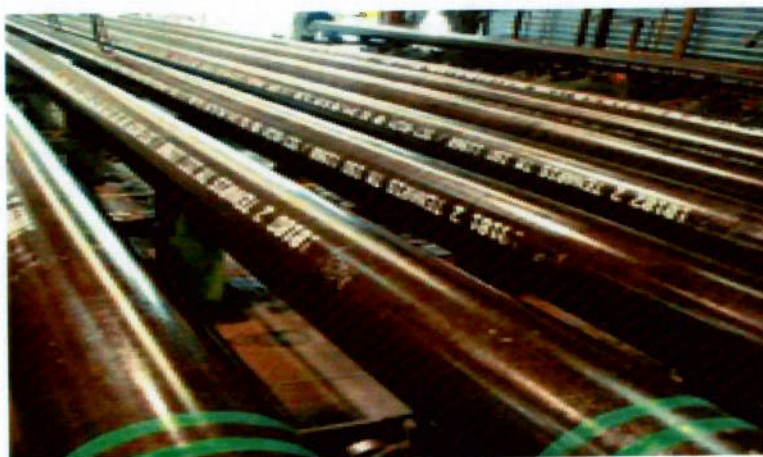
Por fim, um *riser* híbrido (Figura 6) contém a parte inferior rígida e totalmente vertical, enquanto a parcela entre o flutuador e a plataforma é flexível. Dessa forma, obtêm-se as vantagens que cada um dos tipos de *riser* tem a oferecer.

Figura 6: Desenho esquemático de um riser híbrido. (Fonte: Arruda et al.)



Os *risers* utilizados pela indústria do petróleo, como mostrados na Figura 7, oferecem alta performance para ambientes exigentes, tais como águas ultra profundas ou condições marítimas severas. Os diâmetros externos em geral variam de 20 a 21 polegadas nos graus de aço de até 80 ksi de limite de escoamento (Tenaris, 2017).

Figura 7: *Risers rígidos de perfuração.* (Fonte: Tenaris)



2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF) E ANSYS®

No que diz respeito ao Método dos Elementos Finitos (MEF), a técnica subdivide o domínio da estrutura em partes menores, denominadas “elementos finitos”. É um método de interpolação que utiliza polinômios para a aproximação da solução de um determinado problema.

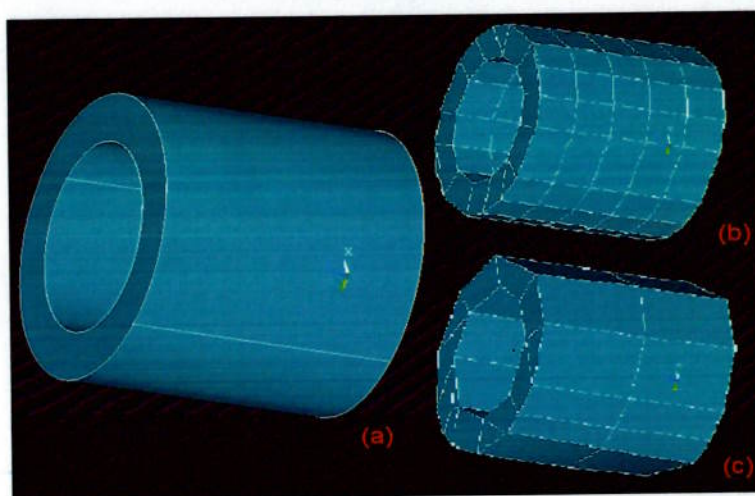
A subdivisão de um domínio geral em partes simples tem diversas vantagens, tais como:

- Representação simplificada de geometrias complexas ou irregulares;
- Inclusão de propriedades distintas nos materiais;
- Identificação de efeitos localizados (concentração de tensões);
- Análise de carregamentos e condições de contorno complexas; e
- Facilidade de obtenção e interpretação dos resultados.

Cada subdomínio é representado por um conjunto de equações que são partes do problema original. Assim, pode-se recombina sistemáticamente todos os conjuntos de equações dos elementos em um sistema global de equações para o cálculo final dos esforços atuantes (Alves, 2007).

Quanto mais refinada for a malha utilizada, ou seja, quanto maior o número de subdomínios, mais próximos os resultados estarão da equação analítica. Segue na Figura 8 um exemplo de duas malhas diferentes para a mesma estrutura.

Figura 8: (a) Estrutura cilíndrica sem subdivisões. (b) Exemplo de uma malha mais refinada. (c) Exemplo de uma malha mais grosseira.



A fim de se obter uma análise mecânica, o método pode resultar no estado de deformações, no estado de tensões e nos critérios de ruptura de uma determinada estrutura, tanto para carregamentos estáticos, como para carregamentos dinâmicos.

O Ansys® é um *software* de modelagem numérica comercial que permite a construção de modelos computacionais ou a transferência de modelos CAD das estruturas a serem analisadas.

Tal *software* realiza simulações através do MEF e atualmente é muito utilizado por diversas indústrias para realizar análises estruturais, térmicas, fluido dinâmicas, eletromagnéticas, de fadiga, de fratura e de transformação de fase.

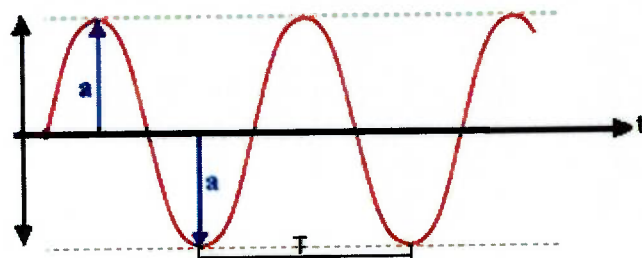
2.3 MOVIMENTOS HARMÔNICOS

Os movimentos harmônicos serão empregados para simular os esforços causados pela movimentação vertical da plataforma flutuante. Tratam-se de movimentos que realizam um mecanismo de “vai e vem”, ou seja, variações em torno de uma posição de referência, sendo caracterizados por um período (T) e por uma frequência (f).

Podem ser representados como fenômenos oscilatórios, pois se movem em dois sentidos de forma alternada em torno da posição de equilíbrio. Para viabilizar as simulações de forma mais simplificada, serão considerados sistemas oscilatórios periódico, ou seja, ciclos que se repetem em intervalos iguais de tempo.

Em um fenômeno oscilatório, cuja representação matemática mais corriqueira é uma onda (Figura 9), o período representa o tempo em que se tem um ciclo completo de alternâncias de estado e a frequência significa a quantidade de repetições de ciclos em uma unidade de tempo. Portanto, esses conceitos são inversamente proporcionais. A amplitude (a) trata-se do valor máximo de variação da onda.

Figura 9: Representação de uma onda em Movimento Harmônico.



Ondas de caráter mecânico (como é o caso do estudo em questão) são facilmente atenuadas com a distância, ou seja, a onda perde intensidade ao se propagar em um meio.

A condição de radiação de Sommerfeld é uma condição de contorno na qual é imposta distância infinita da fonte, ou seja, as ondas são totalmente dissipadas no meio, não havendo reflexão (Barbosa, 2010).

A reflexão é outro fenômeno que ocorre frequentemente com as ondas. Acontece quando uma onda incide sobre um obstáculo e retorna ao meio de

propagação, mantendo as mesmas características. Portanto, quando a onda atinge o contorno de uma estrutura, ela será refletida em seu limite e irá retornar para a estrutura.

2.4 CRITÉRIO DE FALHA DE VON MISES

O Critério de Falha de von Mises, ou critério da energia de distorção máxima, sugere que o escoamento de um material inicia quando a energia de distorção elástica atinge um valor crítico (o limite de escoamento), e a partir desse valor, podem ocorrer falhas. É um critério muito utilizado quando se trata de materiais dúcteis, como é o caso do aço (Da Rosa, 2002).

Tal critério, para um estado triaxial de tensões, expresso em função das tensões principais é representado pela Equação 1:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 < 2\sigma_y^2 \quad (1)$$

Onde σ_1 , σ_2 e σ_3 são as tensões nas direções x, y e z e σ_y é o limite de escoamento.

Em termos das tensões normais e das tensões cisalhantes em três planos ortogonais, pode-se mostrar o critério na forma da Equação 2:

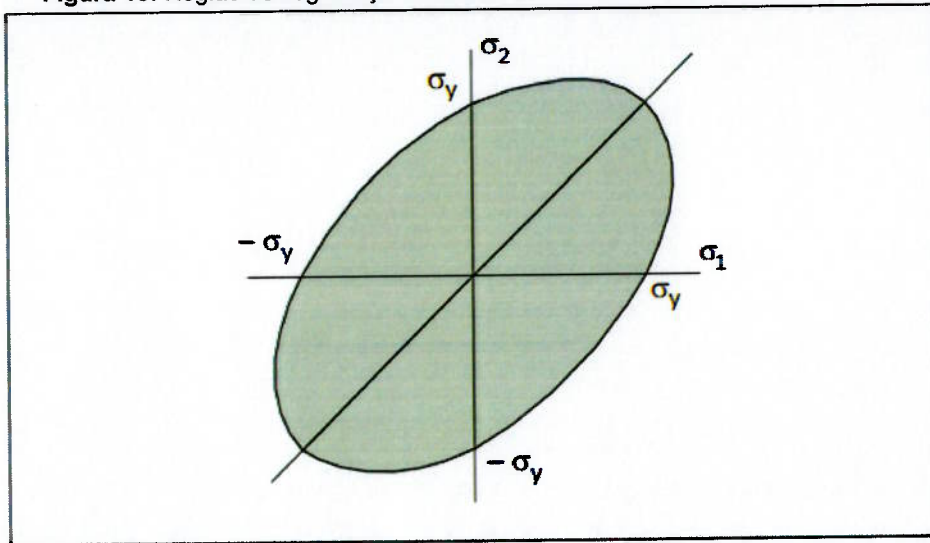
$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + 6 * (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) < 2\sigma_y^2 \quad (2)$$

Para um estado bidimensional de tensões, a equação pode ser simplificada, e resulta na Equação 3:

$$\sigma_1^2 + \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 < \sigma_y^2 \quad (3)$$

A desigualdade indica a região de segurança, que é representada pela Figura 10.

Figura 10: Região de segurança de acordo com o critério de falha de von Mises.



O limite de escoamento (σ_y) é determinado em um ensaio de tração uniaxial em escala de laboratório, mas pode-se determinar a tensão necessária para o início de escoamento plástico do mesmo material em qualquer processo utilizando o critério de von Mises.

O critério estabelece os valores de tensões que tenham o mesmo potencial de escoamento plástico, ou seja, as tensões equivalentes ou efetivas para a deformação plástica. Essa tensão efetiva incorpora o efeito das componentes da tensão que causam o cisalhamento. Este conceito é conveniente uma vez que dois estados diferentes de tensão e de deformação podem ser comparados por meio do valor efetivo.

Reformulando a Equação 1, obtém-se a Equação 4:

$$\sigma_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{1/2} \quad (4)$$

A partir da Equação 4, pode-se determinar a tensão efetiva de Von Mises (σ_{ef}) para qualquer estado de tensões.

3 METODOLOGIA

A fim de fazer uma análise mecânica da interação *riser*-solo, primeiramente deve-se definir as premissas da simulação e estudar as propriedades dos materiais em questão.

3.1 PREMISSAS

Para fazer as simulações, foi considerado um *riser* rígido com diâmetro dentro da média (cerca de 20 polegadas).

Como será feita a análise da porção do *riser* horizontal que está em contato com o solo, não são todas as configurações geométricas que são válidas para o estudo. Devido ao maior número de estudos encontrados na literatura, será considerada a configuração em catenária (SCR).

Quanto ao solo, foi considerado um solo arenoso medianamente compactado para representar o leito marinho.

Foi considerada uma pressão normal devido a uma coluna d'água salgada de 2.000 metros. Tais dados refletem as reais condições do pré-sal brasileiro, que possui uma lâmina d'água entre 1.500 e 3.000 metros, ou seja, possui condições severas de águas ultra profundas (Petrobrás, 2017).

O cálculo da pressão foi feito a partir da Equação 5:

$$P = \rho . g . h \quad (5)$$

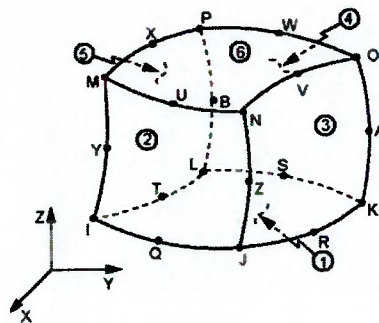
Onde ρ é a densidade da água em kg/m^3 , g é a aceleração da gravidade em m/s^2 e h é a altura da lâmina d'água em metros. Assim, obtém-se a pressão P em Pascal.

Substituindo ρ por 1.030 (densidade da água salgada), g por 9,8 e h por 2.000, obtém-se uma pressão de aproximadamente 2×10^7 Pa.

Adotaram-se sólidos ideais (hookeanos), ou seja, sem escoamento e linearmente elásticos. Os sólidos também foram considerados isotrópicos (cuja propriedade que não varia com a direção). Além disso, a pressão interna no *riser* causada pelos fluidos produzidos ou injetados foi desprezada, a fim de simplificar as simulações.

No *software*, foi considerado o elemento de discretização “SOLID186”, que consiste em um cubo com 20 nós, sendo que há um nó por vértices e mais um nó no meio de todas as arestas (vide Figura 11). Tal elemento é usado principalmente para análises puramente lineares, e cada nó possui 3 graus de liberdade (direções x, y e z). Portanto, as estruturas serão discretizadas em vários cubos, para possibilitar a aplicação do MEF.

Figura 11: Representação do elemento SOLID186 no software Ansys®.



3.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

O *riser* foi representado por um cilindro oco de aço com as seguintes especificações, seguindo os valores utilizados na indústria do petróleo (Tenaris, 2017).

- Dimensões: $D_{ext} = 0,50 \text{ m}$
 $D_{int} = 0,45 \text{ m}$
 $L = 2,50 \text{ m}$ (eixo Z)
- Densidade ($\rho_{aço}$): 7.860 kg/m^3
- Coeficiente de Poisson ($\nu_{aço}$): 0,3
- Módulo de Elasticidade ($E_{aço}$): $210 \times 10^9 \text{ Pa}$
- Limite de Escoamento (σ_y): 80 ksi (aprox. $5,51 \times 10^8 \text{ Pa}$)

Já o solo, foi representado por um bloco, conforme as características apresentadas a seguir, que estão de acordo com um leito marinho comum no Brasil.

- Dimensões: variam conforme as simulações (Tabela 1)

Tabela 1: Dimensões do bloco de solo por simulação.

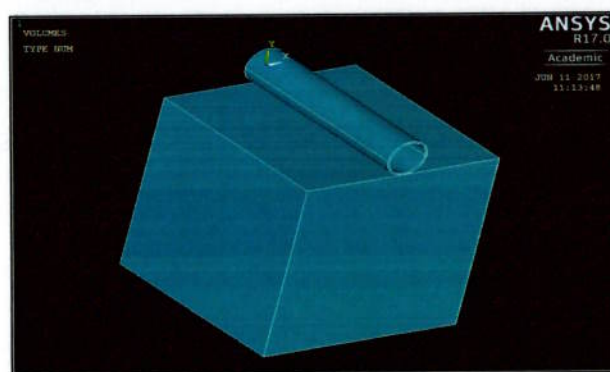
Simulação	X (m)	Y (m)	Z (m)
1a	2,5	2,5	2,5
2a	5,0	2,5	5,0
3a	12,5	2,5	12,5
4a	25,0	2,5	25,0
1b	2,5	5,0	2,5
2b	5,0	5,0	5,0
3b	12,5	5,0	12,5
4b	25,0	5,0	25,0

- Densidade (ρ_{solo}): 2.000 kg/m³
- Coeficiente de Poisson (ν_{solo}): 0,3
- Módulo de Elasticidade (E_{solo}): 30x10⁶ Pa

3.3 PROCEDIMENTO TEÓRICO

Primeiramente as duas estruturas foram desenhadas em 3D no *software* de simulações *Ansys®* (Figura 12). As propriedades de cada uma delas foram vinculadas com as geometrias.

Figura 12: Representação das estruturas do riser e do solo nas dimensões da simulação 1a.



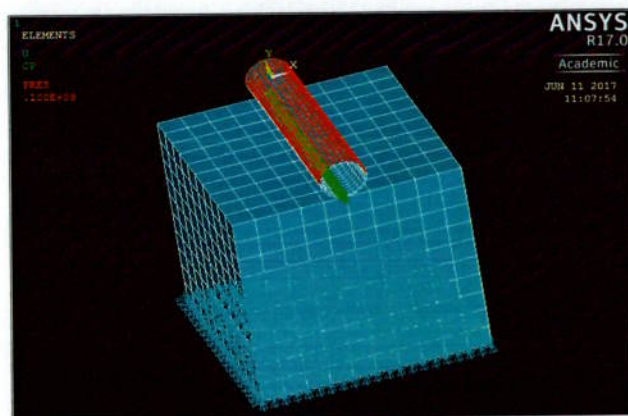
Foram criadas malhas para discretizar cada um dos elementos, de forma que o Método dos Elementos Finitos pudesse ser aplicado no estudo de caso. Quanto ao refinamento, foi adotada uma malha de 10x10x10 subdivisões no bloco de solo, capaz de gerar resultados satisfatórios com um tempo de processamento moderado.

Para representar o real comportamento de uma interação *riser*-solo, as estruturas foram unidas, de forma que a movimentação de uma delas fosse vinculada com a da outra, ou seja, não há escorregamento entre as estruturas e elas também não perdem o contato.

Para garantir essa condição de contorno de não-movimentação entre estruturas, o *software* oferece diferentes alternativas, sendo uma delas unir os nós das estruturas ou unir os elementos de discretização. A simulação 1a foi feita das duas formas, a fim de comparar os possíveis impactos.

Por fim, os carregamentos foram aplicados (Figura 13). A base inferior do bloco do solo foi “travada”, ou seja, foi fixada com deslocamento zero. Já a casca superior do tubo do *riser*, foi submetida a uma pressão, em movimentos harmônicos com a frequência variando entre 0 e 100 Hz, para representar de forma simplificada a influência do *heave* da plataforma flutuante.

Figura 13: Representação das estruturas discretizadas e após a aplicação dos carregamentos nas dimensões da simulação 1a.



As 8 (oito) simulações principais, nas quais apenas variou-se o tamanho do bloco de solo, servirão também para uma análise modal das estruturas, ou seja, para o estudo de suas propriedades dinâmicas, como por exemplo a determinação dos modos de vibração e frequências naturais.

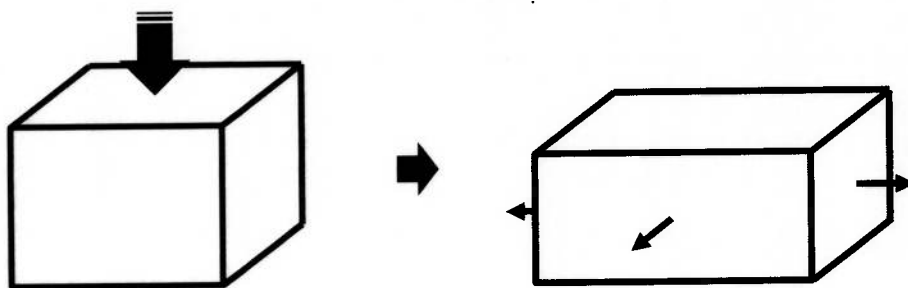
Para obter os valores de tensão e deslocamento em um ponto de contato entre o *riser* e o solo, deve-se adotar uma frequência antes do primeiro pico de amplitude no gráfico de deslocamento por frequência.

Os picos indicam a frequência natural das estruturas, ou seja, frequência na qual elas entrariam em ressonância. A ressonância por sua vez, trata-se de um fenômeno que deve ser cautelosamente evitado, pois faz com que o sistema vibre com amplitudes cada vez maiores, podendo causar grandes danos, como a falha dos materiais.

A critério de comparação, foram feitas 2 (duas) simulações adicionais utilizando as dimensões da simulação 1a, devido ao menor tempo de processamento.

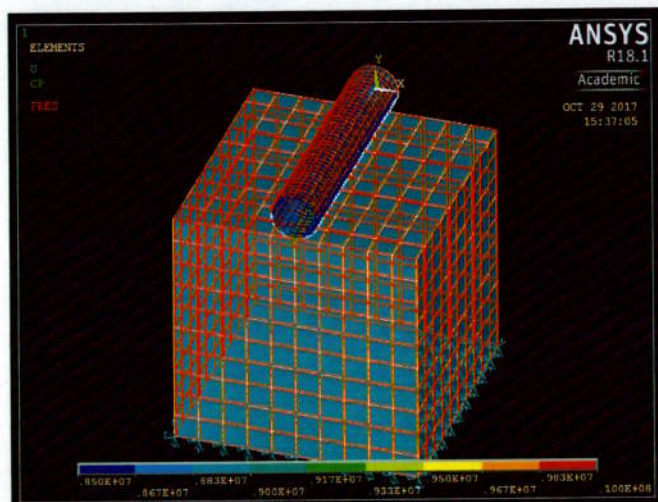
Nas premissas do estudo, algumas simplificações foram adotadas, tais como desprezar a pressão interna do *riser*, mas sabe-se que em geral o *riser* está preenchido pelo fluido que é produzido ou injetado, causando uma pressão interna. Além disso, a representação do solo como um bloco faz com ele possa ser mais “achatado” pela pressão aplicada no *riser*, uma vez que não há nenhuma limitação de deslocamento nas suas faces laterais (Figura 14).

Figura 14: Desenho esquemático da deformação de um bloco de solo após aplicação de uma pressão vertical.



Portanto, foi feita uma nova simulação sob as mesmas condições dinâmicas, adicionando a pressão hidrostática do óleo dentro do tubo do *riser* e aplicando a pressão hidrostática da água salgada nas 4 (quatro) faces laterais do bloco de solo, para evitar uma maior deformação. Os carregamentos adicionais são representados na Figura 15.

Figura 15: Representação das estruturas discretizadas e com os carregamentos adicionais nas dimensões da simulação 1a.



Sabe-se que a densidade do óleo é cerca de 85% da densidade da água salgada, então a pressão interna no *riser* foi considerada 85% da pressão externa.

A segunda simulação adicional trata-se de uma simulação sob condições estáticas nos mesmos moldes das simulações principais (apenas travando a base inferior de solo e aplicando pressão na casca superior do *riser*). A pressão aplicada foi de 2×10^7 Pa, respeitando a ordem de grandeza da pressão hidrostática causada pela coluna d'água, calculada nas premissas do estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De forma resumida, foram feitas 8 (oito) simulações principais no *Ansys®*, variando apenas o tamanho no bloco de solo (1a, 2a, 3a, 4a, 1b, 2b, 3b e 4b), sendo que a simulação 1a foi feita com dois diferentes métodos de união de estruturas, para analisar se haveria diferença entre eles. Além disso, as dimensões da simulação 1a também foram utilizadas para 2 (duas) simulações extras:

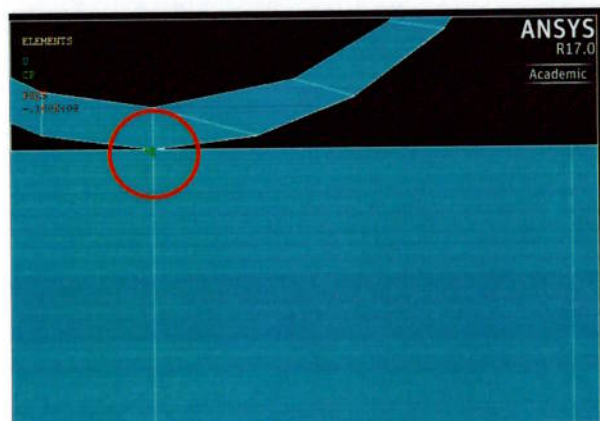
- 1a dinâmica com carregamentos adicionais;
- 1a estática.

4.1 RESULTADOS

Inicialmente, conclui-se que os valores de deslocamento da simulação 1a através da união dos elementos são idênticos aos valores através da união de nós (vide apêndice).

Dessa forma, as demais simulações foram feitas através da união de elementos, partindo para a análise numérica de um ponto de contato entre o *riser* e o solo, representado pela Figura 16.

Figura 16: Ponto de contato para análise (vista frontal).



Como referência, foi fixada a frequência de 1Hz e de 3Hz, pois tratam-se valores antes do primeiro pico de frequência de todas as simulações (vide apêndice).

Os valores normalizados de deslocamento e de tensão efetiva de von Mises foram levantados nas Tabelas 2 e 3, para depois serem discutidos e comparados com o limite de escoamento do *riser*.

Tabela 2: Resultados das simulações com frequência de 1 Hz.

Simulação	Desloc. / Pressão Aplicada (m/Pa)	Tensão Efetiva von Mises / Pressão Aplicada []
1a	$4,937 \times 10^{-8}$	238,55
2a	$2,265 \times 10^{-8}$	238,42
3a	$8,843 \times 10^{-9}$	236,90
4a	$4,766 \times 10^{-9}$	236,88
1b	$6,332 \times 10^{-8}$	238,62
2b	$2,483 \times 10^{-8}$	236,98
3b	$8,994 \times 10^{-9}$	236,90
4b	$4,442 \times 10^{-9}$	236,88
1a c/ carregamentos adicionais	$3,815 \times 10^{-8}$	1,52

Tabela 3: Resultados das simulações com frequência de 3 Hz.

Simulação	Desloc. / Pressão Aplicada (m/Pa)	Tensão Efetiva von Mises / Pressão Aplicada []
1a	$5,072 \times 10^{-8}$	240,68
2a	$2,307 \times 10^{-8}$	239,41
3a	$8,973 \times 10^{-9}$	237,31
4a	$4,906 \times 10^{-9}$	237,13
1b	$7,208 \times 10^{-8}$	241,66
2b	$2,711 \times 10^{-8}$	238,14
3b	$9,586 \times 10^{-9}$	237,34
4b	$4,715 \times 10^{-9}$	237,12
1a c/ carregamentos adicionais	$4,009 \times 10^{-8}$	1,53

Esses valores foram levantados, pois tanto o deslocamento, quanto a tensão são numericamente iguais para o solo e para o *riser* no ponto de contato entre eles, diferentemente do valor de deformação, por exemplo, que depende do material em questão.

Tendo em vista uma análise de falha, pode-se calcular qual seria a máxima pressão aplicada no *riser* que iria gerar valores de tensão efetiva de von Mises inferiores ao limite de escoamento do aço utilizado ($5,51 \times 10^8$ Pa). Ou seja, os valores

de indicados na Tabela 4, são os valores máximos de pressão que podem ser aplicados nas simulações sem que haja falha do material.

Tabela 4: Valores máximos de pressão aplicados sem que haja falha no material.

Simulação	Máx. Pressão Aplicada (Pa) Freq. = 1Hz	Máx. Pressão Aplicada (Pa) Freq. = 3Hz
1a	$2,3098 \times 10^6$	$2,2893 \times 10^6$
2a	$2,3110 \times 10^6$	$2,3015 \times 10^6$
3a	$2,3259 \times 10^6$	$2,3219 \times 10^6$
4a	$2,3261 \times 10^6$	$2,3236 \times 10^6$
1b	$2,3091 \times 10^6$	$2,2801 \times 10^6$
2b	$2,3251 \times 10^6$	$2,3138 \times 10^6$
3b	$2,3259 \times 10^6$	$2,3216 \times 10^6$
4b	$2,3261 \times 10^6$	$2,3237 \times 10^6$
1a c/ carregamentos adicionais	$3,6250 \times 10^8$	$3,6013 \times 10^8$

Também foi feito um estudo dos valores de deslocamento em diferentes pontos do solo, igualmente espaçados do *riser* (representados na Figura 17), a fim de provar a simetria do sistema e a redução dos efeitos à medida que a distância do *riser* aumenta. A simulação 1a foi utilizada como referência e os valores são apresentados na Tabela 5 e na Figura 18.

Figura 17: Pontos de análise do solo na simulação 1a (vista superior).

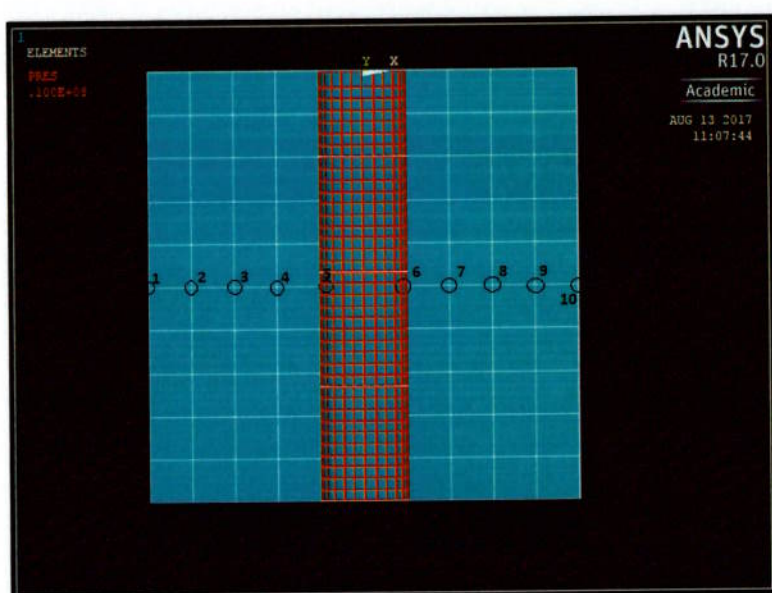
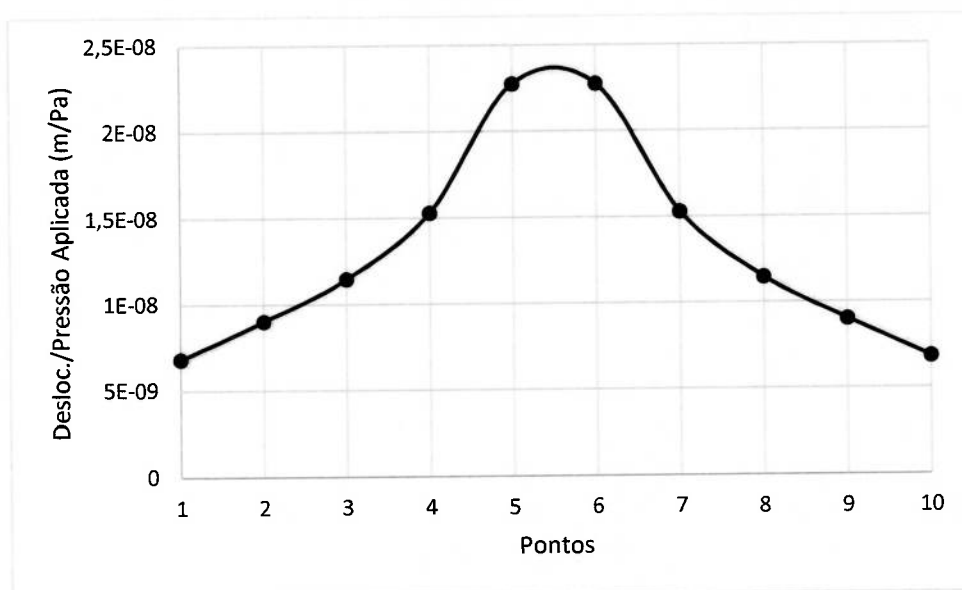


Tabela 5: Valores de deslocamento/pressão nos pontos do solo na simulação 1a.

Ponto	Desloc. / Pressão Aplicada (m/Pa) Freq. = 1Hz	Desloc. / Pressão Aplicada (m/Pa) Freq. = 3Hz
1	$6,81943 \times 10^{-9}$	$7,49681 \times 10^{-9}$
2	$9,02876 \times 10^{-9}$	$9,79773 \times 10^{-9}$
3	$1,14767 \times 10^{-8}$	$1,23358 \times 10^{-8}$
4	$1,53134 \times 10^{-8}$	$1,62722 \times 10^{-8}$
5	$2,27531 \times 10^{-8}$	$2,38363 \times 10^{-8}$
6	$2,27531 \times 10^{-8}$	$2,38363 \times 10^{-8}$
7	$1,53134 \times 10^{-8}$	$1,62722 \times 10^{-8}$
8	$1,14767 \times 10^{-8}$	$1,23358 \times 10^{-8}$
9	$9,02876 \times 10^{-9}$	$9,79773 \times 10^{-9}$
10	$6,81943 \times 10^{-9}$	$7,49681 \times 10^{-9}$

Figura 18: Gráfico de deslocamento/pressão nos pontos do solo na simulação 1a com frequência de 1Hz.



Por fim, apresentam-se os resultados da simulação adicional estática no ponto de contato com o solo, após aplicar uma pressão de 2×10^7 Pa (relativa a pressão hidrostática da coluna d'água):

- Deslocamento: 0,49 m;
- Tensão Efetiva de von Mises: $2,32 \times 10^7$ Pa.

4.2 DISCUSSÕES

Primeiramente prova-se a equivalência dos métodos de unir nós e elementos no *software* em questão.

Os valores de deslocamento e da tensão efetiva de von Mises indicaram a sensibilidade dos resultados com a variação das dimensões do bloco de solo.

Na prática, o solo apresenta um tamanho infinito quando comparado com o *riser*. Porém, a representação do solo no simulador apresenta essa limitação, e faz com que o solo seja representado por um semi-espaço.

O semi-espaço empregado nas simulações foi um paralelepípedo, ou seja, apresenta 6 faces. Como se trata de uma simulação sob condições dinâmicas, a pressão exercida no *riser*, será transmitida para o solo e irá gerar ondas. As ondas, baterão nas faces do paralelepípedo e serão refletidas, influenciando, assim, no comportamento da interação solo-estrutura.

Tal influência se torna evidente ao analisar os gráficos de deslocamento por frequência apresentados no apêndice, uma vez que para cada simulação, o ponto de contato entre as estruturas apresenta diferentes modos de vibração e diferentes frequências de ressonância. Isso significa que as condições de contorno do bloco de solo podem ser diretamente relacionadas com os impactos nos resultados.

No cenário real, as reflexões não ocorrem, pois as ondas são dissipadas à medida que percorrem o solo, seguindo a condição de radiação de Sommerfeld. Portanto, quanto maiores as dimensões do bloco, mais distantes estarão as faces, e menor será a influência dessas reflexões.

Logo, teoricamente, quanto maiores as dimensões do bloco de solo, mais fieis são os resultados obtidos, ou seja, os valores da simulação 4b (maior bloco de solo) devem ser os mais próximos dos reais.

Isso também se torna claro pois os valores decrescem das simulações 1 a 4, ou seja, à medida que área do solo aumenta, os valores de deslocamento e de tensão diminuem, já que as ondas são mais dissipadas e geram menor impacto.

Além dos impactos gerados pelas reflexões nas faces do bloco de solo, a representação do solo como um semi-espaço também faz com ele possa ser mais “achatado” pela pressão aplicada no *riser*, pois não há nenhuma “trava” que impeça a deformação lateral do solo. Porém, no cenário real, a própria extensão do solo que ocupa as laterais se comporta como uma trava, impedindo uma maior compactação vertical.

Também sabe-se que a pressão causada pela coluna d'água é muito grande, principalmente nas águas ultra profundas do pré-sal brasileiro, portanto até mesmo quando o *riser* é instalado no leito marinho, ele geralmente está preenchido por óleo de forma a representar o fluido que posteriormente será produzido/injetado. Essa técnica faz com que o óleo no interior do *riser* gere uma pressão interna e possa contrabalancear a grande pressão externa causada pela coluna d'água, de forma a amenizar seus efeitos e evitar possíveis falhas no material.

Assim, explica-se a necessidade da simulação extra com carregamentos adicionais, uma vez que ela considera a pressão interna no *riser* e uma pressão nas faces laterais do bloco de solo para representar simplificada e a própria extensão do solo infinito.

Os resultados dessa simulação adicional são menores do que os da simulação 1a convencional, tanto a deformação, como a tensão efetiva. Isso mostra que as simplificações usadas nas 8 (oito) simulações principais podem aumentar os impactos causados pelos carregamentos harmônicos. Do ponto de vista de uma análise de falha, essas simplificações podem ser utilizadas, já que os valores máximos de pressões que podem ser aplicados (mostrados na Tabela 4) são menores nas simulações principais, ou seja, as simplificações geram análises mais conservadoras nesse caso.

Se tratando de uma análise de falha, observa-se que o máximo valor de pressão que pode ser aplicada no *riser* é da ordem de 2×10^6 Pa (para as simulações principais), ou seja, 10 vezes menor do que a pressão devido a coluna d'água calculada nas premissas do estudo, porém isso não representa uma falha do material. A pressão devido a coluna d'água trata-se de uma pressão estática, enquanto os valores da Tabela 4 correspondem aos valores da amplitude de uma análise dinâmica

devido às oscilações da plataforma, que certamente terão amplitudes bem inferiores à pressão da coluna d'água.

Já os resultados da análise adicional estática, podem ser diretamente correlacionados com a pressão devido a coluna d'água. A tensão efetiva gerada foi de $2,32 \times 10^7$ Pa, que é inferior ao limite de escoamento do aço utilizado ($5,51 \times 10^8$ Pa), indicando que sob essas condições não haveria nenhuma falha do material no ponto de contato, apesar da ausência de uma pressão interna.

O deslocamento de 0,49 metro comprova que o solo foi, de fato, muito “achatado” pela pressão aplicada no *riser*, já que não havia nenhuma trava lateral no bloco de solo. Uma vez que a profundidade do bloco era de apenas 2,5 metros, isso significa que a compactação vertical foi de aproximadamente 20% de sua extensão. Tal resultado parece distante do cenário real, mas se tratando apenas da análise de falha, a simulação foi válida.

Por fim, prova-se que o impacto da pressão aplicada no *riser* diminui com o aumento da distância de forma simétrica, pois os valores de deslocamento nos pontos do bloco de solo ficam cada vez menores conforme o afastamento do *riser*, como mostrado na Tabela 5.

5 CONCLUSÕES

Os resultados comprovam a aplicabilidade das ferramentas de simulação numérica, em especial utilizando o Método dos Elementos Finitos, para os estudos estruturais de uma interação solo-estrutura, uma vez que os valores indicaram uma sensibilidade com a variação das dimensões do bloco de solo.

O deslocamento e a tensão efetiva de von Mises no ponto de contato entre as estruturas diminuem à medida que o bloco de solo aumenta. E o deslocamento nos pontos do solo também decresce juntamente com o aumento da distância do *riser*.

Dado que o solo apresenta um caráter infinito, quanto maior for a sua dimensão utilizada na modelagem numérica, mais próximos estarão os resultados da realidade. Portanto, os valores obtidos na simulação 4b estão mais próximos dos reais, apesar de ainda carregarem alguns erros devido às simplificações e às limitações do MEF.

Provou-se que as simplificações nesse caso tornam a análise mais conservadora e que do ponto de vista de uma análise estática, o *riser* utilizado é capaz de suportar a pressão hidrostática em águas ultra profundas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido às limitações apresentadas pelo MEF ao retratar o solo como um semi-espaço, novas análises utilizando outra ferramenta tornam-se uma alternativa atraente para esse estudo de caso.

Existe um outro método numérico de elevada aplicabilidade em estudos envolvendo interação solo-estrutura. Trata-se do Método dos Elementos de Contorno (MEC).

Sugere-se fazer uma análise em MEC através da linguagem de programação Fortran, que pode ser usada para implementar um código capaz de gerar resultados muito satisfatórios.

Dessa forma, uma comparação entre os resultados obtidos pelos dois métodos torna-se muito interessante para avaliar a diferença e a eficácia de cada um deles no cenário em questão.

6.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO (MEC) E FORTRAN

A critério de comparação, pode-se estudar o Método dos Elementos de Contorno (MEC). Trata-se de um método computacional para a solução de sistemas de equações diferenciais formuladas como integrais e envolve apenas a discretização do contorno das estruturas.

Os valores dos pontos internos são calculados posteriormente em função das variáveis externas.

Dentre as vantagens apresentadas, pode-se citar:

- Simplificação dos dados de entrada, uma vez que só leva em conta os pontos do contorno;
- Menor quantidade de operações aritméticas, reduzindo o custo computacional; e
- Melhor desempenho em domínios infinitos ou semi-infinitos, pois elimina os efeitos das bordas.

O MEC é aplicado em diversas áreas da engenharia, como em mecânica dos fluidos, acústica, eletromagnetismo e estudo de fraturas. Ele se torna particularmente interessante na simulação de problemas envolvendo interação solo-estrutura devido ao fato de incorporar naturalmente o amortecimento geométrico presente na dinâmica de domínios ilimitados, como é o caso do solo (Alves, 2006).

Uma análise em MEC pode ser feita através de diversas linguagens de programação, tais como o Fortran, que é usado para implementar códigos muito eficientes.

O Fortran, apesar de ser uma linguagem antiga, desenvolvida na década de 1950, ainda apresenta muita aplicação nos estudos atuais, principalmente em análises numéricas. A linguagem possibilita desenvolver códigos simples e com grande rapidez, pois oferece uma infinidade de recursos para o programador.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Lucas Máximo. **Apostila de Método dos Elementos de Contorno**. Universidade Federal do Paraná, 2006.

ALVES, Lucas Máximo. **Métodos dos Elementos Finitos**. Universidade Federal do Paraná, 2007.

ANTONIO, Leonardo Machado et al. **Análise da interação solo-estrutura aplicada a riser rígido em catenária através da formulação co-rotacional**. 2011. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

ARRUDA, Marcos Diego Siqueira Verçosa; DE LEMOS MARTINS, Michele Agra; LAGES, Eduardo Nobre. **Otimização dos flutuadores de risers com catenária em configuração complexa**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 33, n. 2, p. 149-164, 2012.

BARBOSA, Luciano Silva. **FEM-ABC Aplicado À Solução De Problemas de Espalhamento Eletromagnético**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2010. 60 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.

DA ROSA, Edison. **Análise da Resistência Mecânica - Mecânica da Fratura e Fadiga**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

DEPARTAMENTO DE FÍSICA UFPB. Disponível em: <<http://www.fisica.ufpb.br/>>. Acessado em: 05/06/17.

Dez principais feitos tecnológicos do pré-sal. Disponível em <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/dez-principais-feitos-tecnologicos-do-pre-sal.htm>>. Acessado em: 01/05/2017.

LINE PIPE OFFSHORE – Tenaris. Disponível em: <<http://www.tenaris.com/pt-BR/Products/OffshoreLinePipe.aspx>>. Acessado em: 01/05/2017.

SERAFIM, Teresa. **“Quanto custou o derrame da plataforma Deepwater Horizon à natureza?”**, 2017. Disponível em: <<https://www.publico.pt/2017/04/25/ciencia/noticia/quanto-custou-a-natureza-o-derrame-da-plataforma-deepwater-horizon-1769901>>. Acessado em: 10/09/2017.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Petrobras, Rio de Janeiro, 2001

8 APÊNDICE

Seguem os gráficos normalizados de deslocamento/pressão aplicada por frequência das simulações realizadas no software *Ansys®*.

Figura 19: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 1a, através da união de elementos.

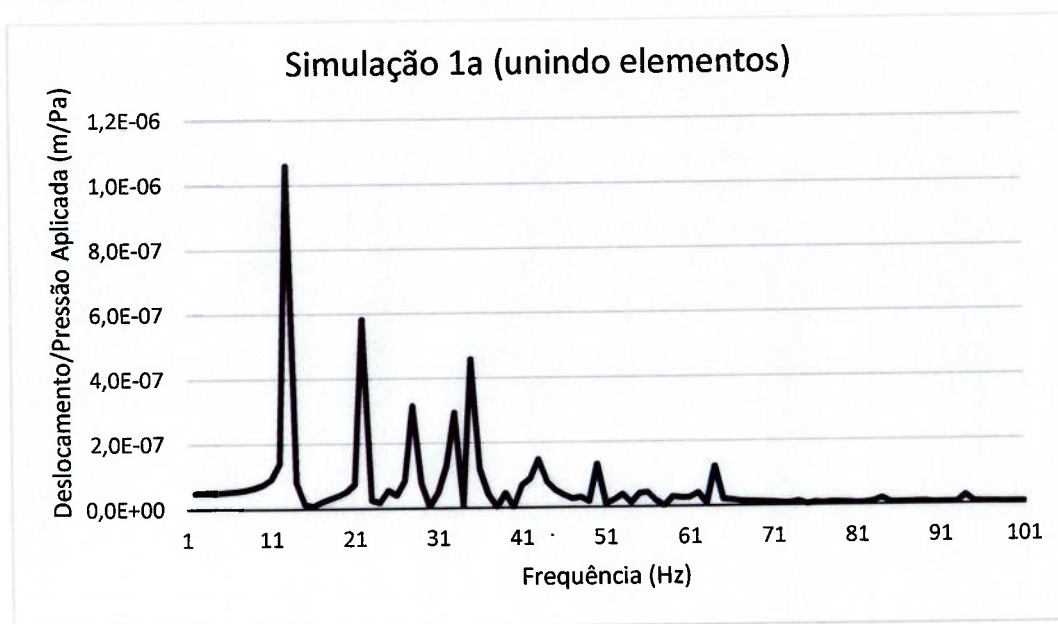


Figura 20: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 1a, através da união de nós.

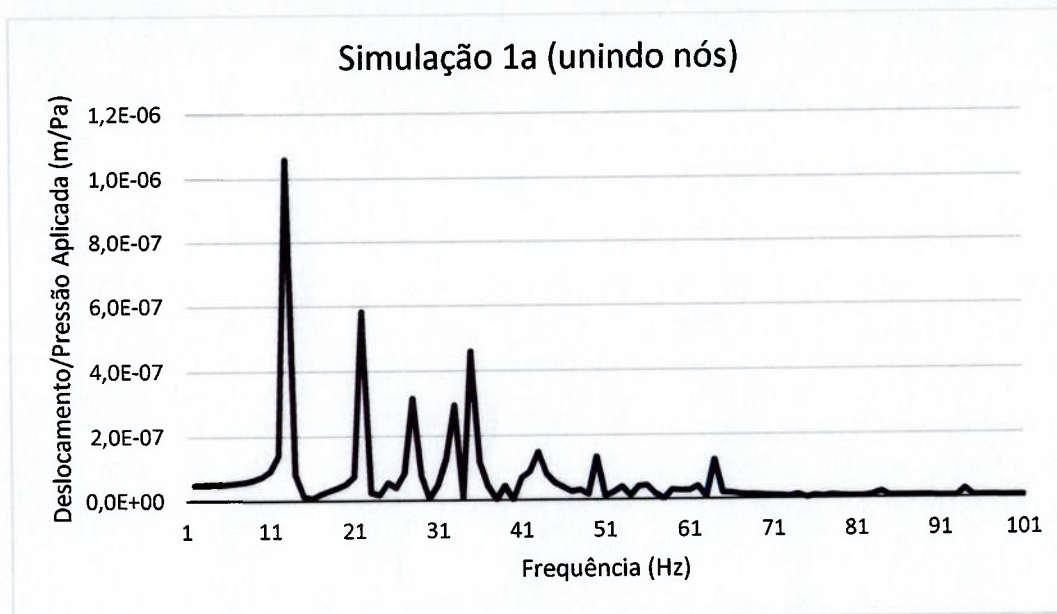


Figura 21: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 2a, através da união de elementos.

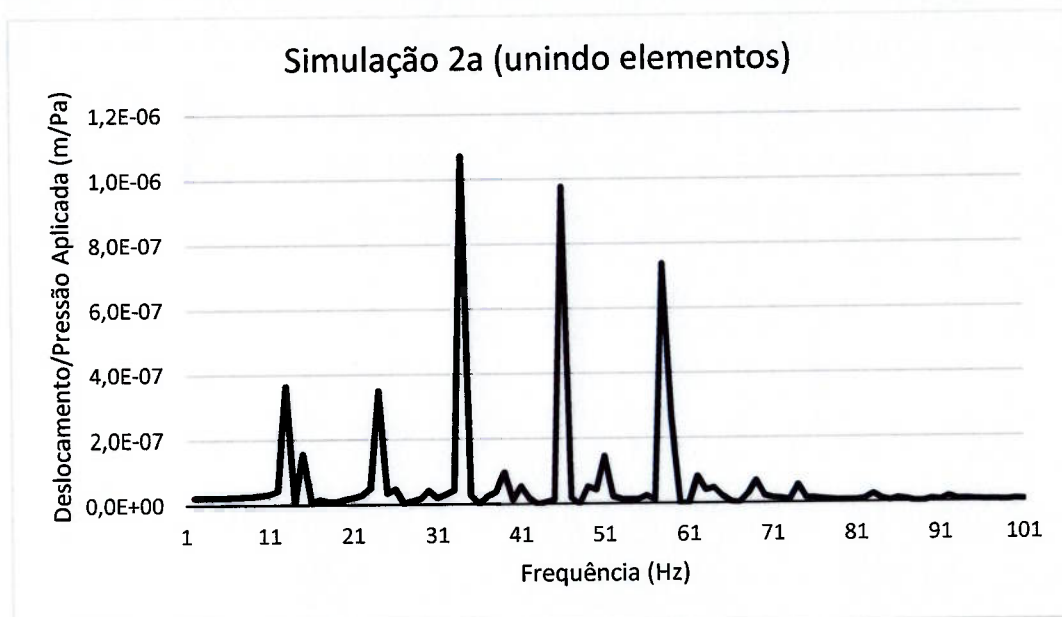


Figura 22: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 3a, através da união de elementos.

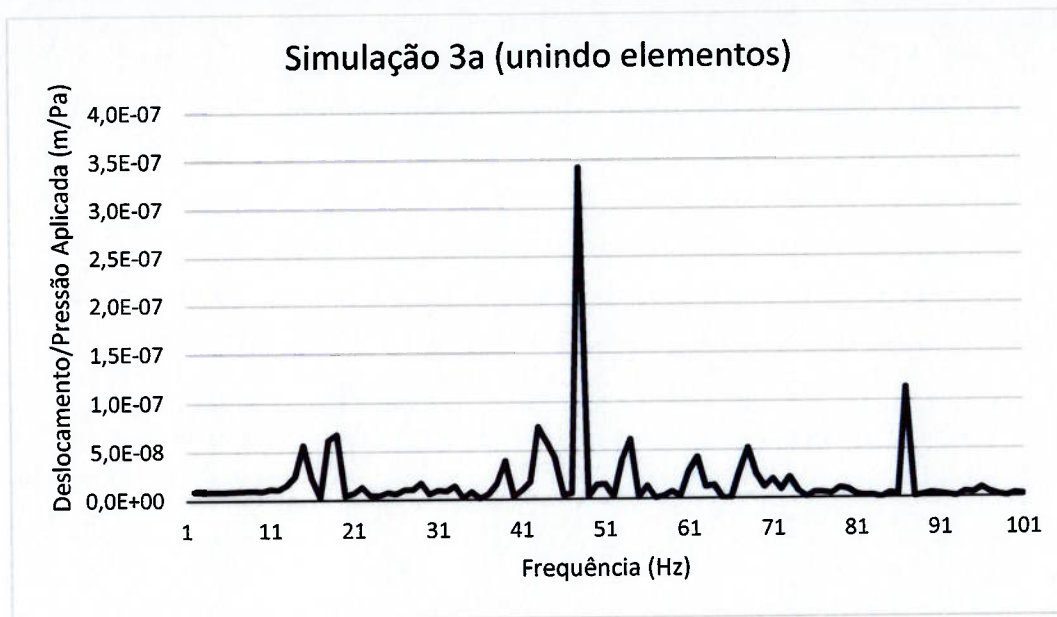


Figura 23: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 4a, através da união de elementos.

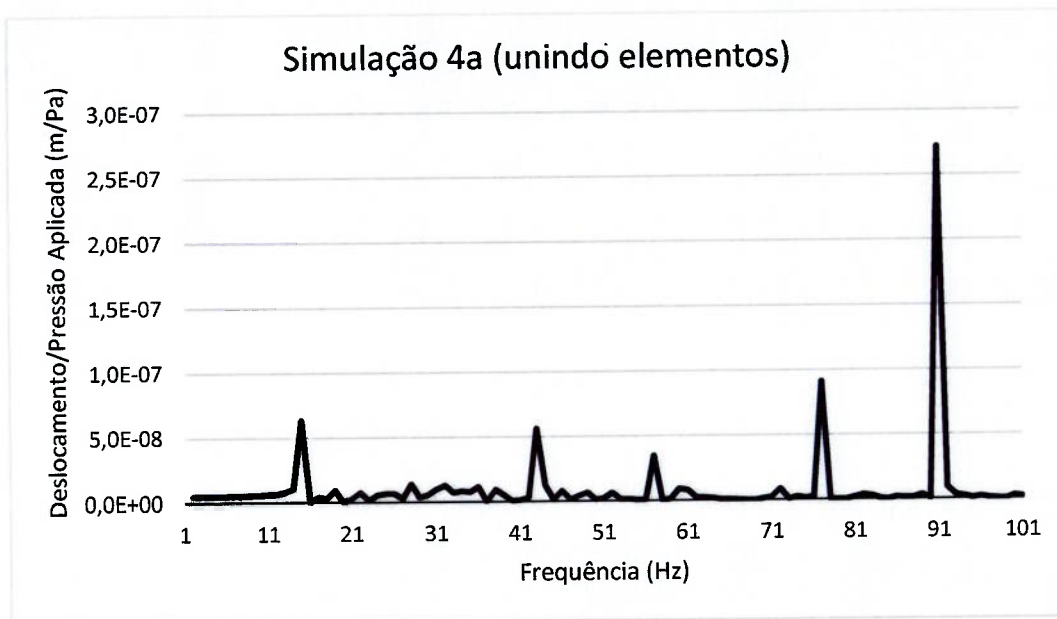


Figura 24: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 1b, através da união de elementos.

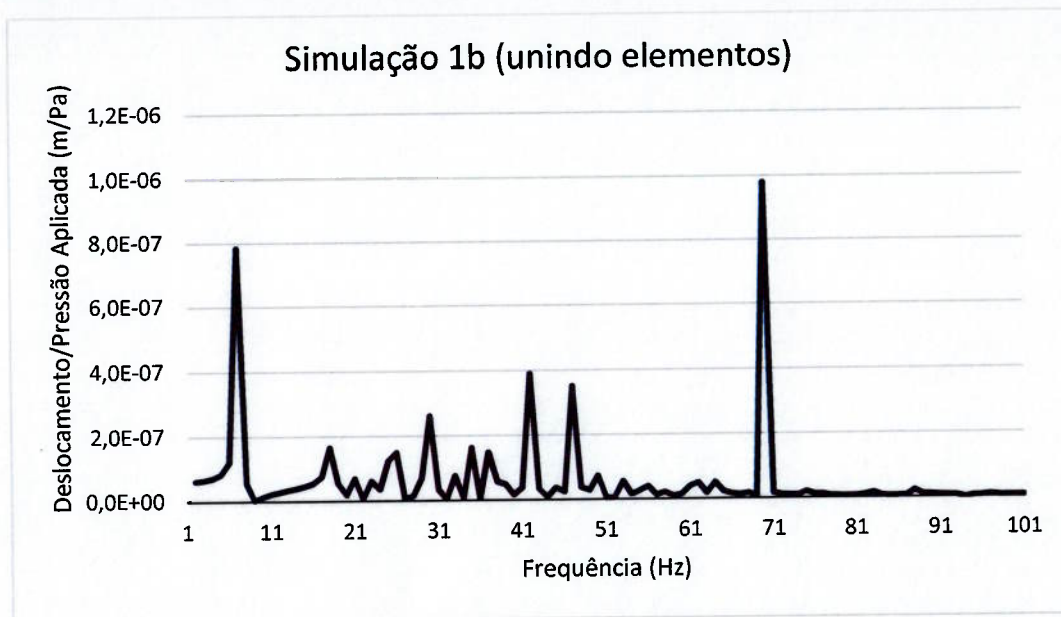


Figura 25: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 2b, através da união de elementos.

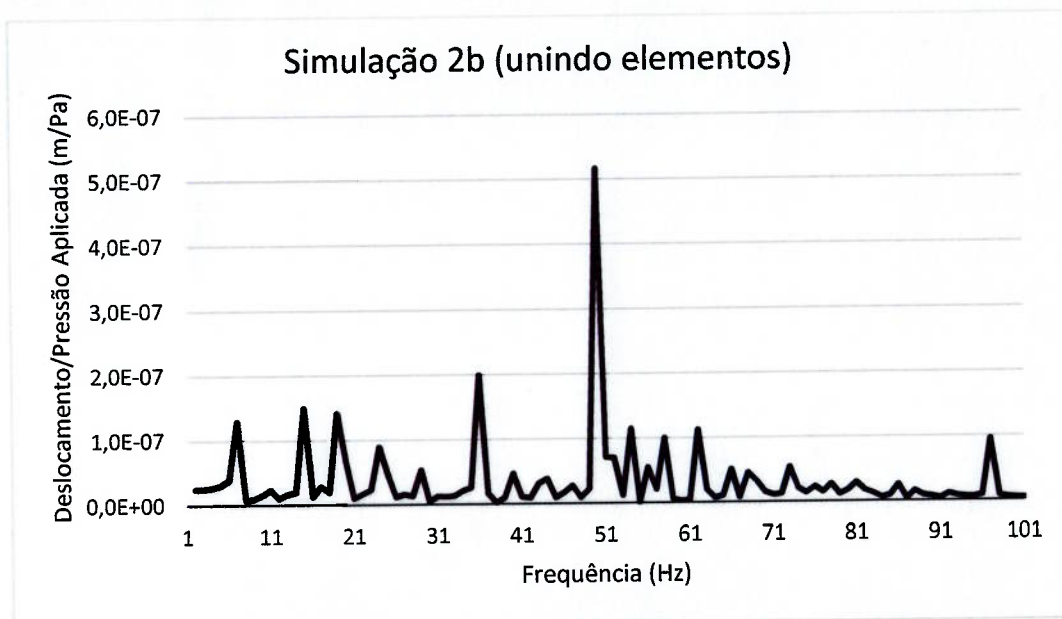


Figura 26: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 3b, através da união de elementos.

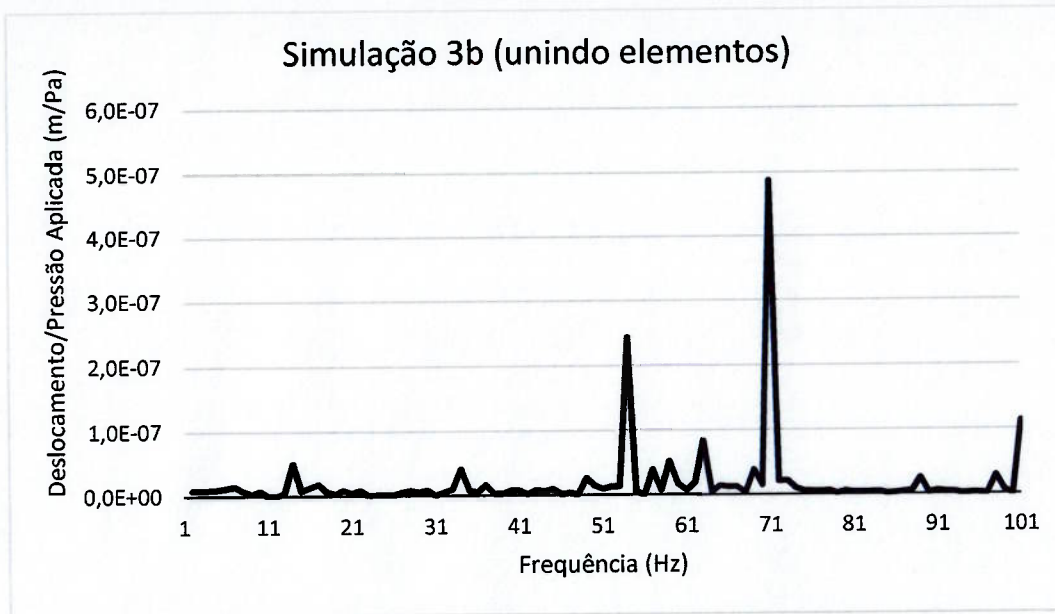


Figura 27: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 4b, através da união de elementos.

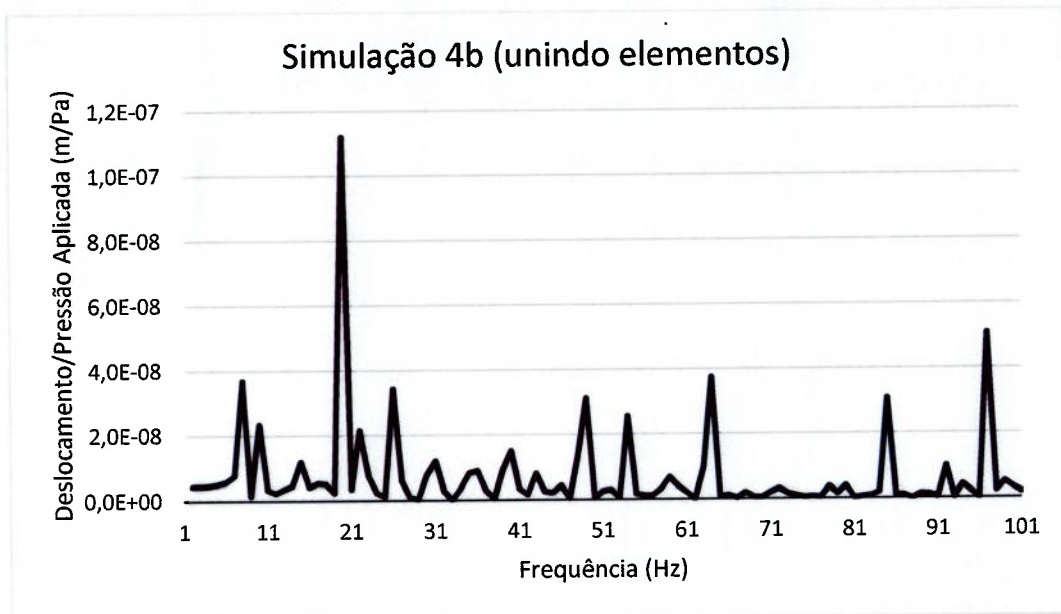


Figura 28: Gráfico de deslocamento/pressão por frequência da simulação 1a com carregamentos adicionais, através da união de elementos.

