

INFLUÊNCIA DO ROMPIMENTO DE LINHAS DE ANCORAGEM NA RIGIDEZ HORIZONTAL DE UMA PLATAFORMA DE PETRÓLEO

Rodrigo Moretti Kochem
Elói Daniel de Araújo Neto
Guilherme Romar Borzacchiello
William Steven Mendez Rodriguez
Fabício Nogueira Corrêa
Breno Pinheiro Jacob

rodrigomk@lamcso.coppe.ufrj.br
eloi.araujo@lamcso.coppe.ufrj.br
romar@lamcso.coppe.ufrj.br
william@lamcso.coppe.ufrj.br
fabricio@lamcso.coppe.ufrj.br
breno@lamcso.coppe.ufrj.br

LAMCSO – Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas Offshore, PEC/COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Programa de Engenharia Civil
Avenida Pedro Calmon, S/N, Cidade Universitária – Ilha do Fundão, CEP 21941-596, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Resumo. Dada a importância dos sistemas de ancoragem na manutenção do posicionamento projetado para plataformas de petróleo e da sua influência no comportamento da estrutura (particularmente em águas profundas e ultraprofundas), faz-se pertinente a investigação da variação dos seus níveis de rigidez conforme diferentes configurações do sistema. Assim, este trabalho investiga a influência do *offset* e da condição de avaria na rigidez no plano horizontal de uma plataforma flutuante com sistema de ancoragem *spread-mooring*. Os resultados obtidos em termos de mapas polares de rigidez confirmam a influência do *offset* da plataforma, bem como da perda de linhas de ancoragem, na rigidez horizontal obtida. Observou-se também um comportamento não-linear da rigidez horizontal global da unidade flutuante. Além disso, sob determinadas condições, há registro de aumento de rigidez mesmo com a avaria de uma linha de ancoragem. A ferramenta utilizada para as análises foi o *software* Situa-Prosim desenvolvido pelo LAMCSO – COPPE/UFRJ para a Petrobras e que simula o comportamento de sistemas de produção de petróleo utilizados análises estáticas e não-lineares.

Palavras-chave: Sistemas de ancoragem, Rigidez, Estruturas *offshore*

1 Introdução

Nos últimos anos a indústria *offshore* tem avançado na exploração e produção de petróleo para águas cada vez mais profundas, proporcionando desafios tecnológicos em vários campos inerentes ao projeto. Neste sentido, tornou-se imprescindível o estudo e o entendimento da dinâmica de plataformas flutuantes ancoradas, particularmente no que diz respeito aos seus sistemas de ancoragem.

Uma unidade flutuante de produção de petróleo é mantida na posição segura de operação pelo sistema de ancoragem e está submetida a carregamentos ambientais dinâmicos, especialmente à ação das ondas. Observando os graus de liberdade de movimento da unidade flutuante (*surge, sway, heave, roll, pitch* ou *yaw*) e o efeito de rigidez do sistema de ancoragem para cada um deles, é possível modelar a resposta dinâmica da estrutura como um sistema massa-mola-amortecedor (considerando o amortecimento hidrodinâmico).

Sem levar em conta a ação de carregamentos ambientais, é de se esperar que o sistema de ancoragem mantenha a plataforma em uma posição neutra igual ou próxima à posição de projeto. Em sua configuração intacta, o sistema tem uma determinada rigidez no plano horizontal, e a esta rigidez estão associados os níveis de tração e a configuração das linhas de ancoragem. Assim, presume-se que uma variação da posição de equilíbrio da plataforma devido a eventuais carregamentos ambientais e/ou a ocorrência de avaria numa linha de ancoragem tenha influência direta na rigidez do sistema.

Sabe-se que o sistema de ancoragem tem influência considerável na dinâmica da plataforma, conforme descrito em Chakrabarti [1], Girón [2] e Kochem [3]. Tomando por base a analogia do sistema massa-mola-amortecedor, identifica-se que, da parcela de rigidez (e sua eventual variação), decorrem várias propriedades que caracterizam a resposta de movimentos e esforços estruturais da plataforma em estudo – incluindo, aí, seu período natural, por exemplo. Portanto, entender o comportamento da variação de rigidez conforme a posição e avaria de linha de ancoragem pode ser útil para análise de comportamentos dependentes do período natural da estrutura, assim como eventuais movimentos ressonantes (conforme Matos [4]).

Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência desses dois fatores (avaria de linha de ancoragem e variação da posição de equilíbrio) considerando uma plataforma flutuante com sistema de ancoragem *spread-mooring*. Isto é realizado através da elaboração de modelos numéricos desta plataforma no software Situa-Prosím nas diferentes condições de interesse para avaliação da força resultante sobre ela, no plano horizontal, do sistema de ancoragem e, conseqüentemente, da rigidez.

2 Marco teórico

2.1 Sistemas de ancoragem

A finalidade dos sistemas de ancoragem é manter uma unidade flutuante dentro dos limites propostos no projeto para que as atividades de exploração *offshore* possam ser executadas com sucesso. Os sistemas de ancoragem são compostos por um conjunto de linhas de ancoragem, com várias composições, e âncoras ou estacas, que transferem os esforços ambientais sofridos pela plataforma para o solo.

As linhas de ancoragem podem ser compostas por amarras, cabos de aço e/ou poliéster, dependendo do sistema de ancoragem empregado. Em alguns sistemas são empregadas boias de ancoragem, que têm como intuito reduzir o peso transmitido das linhas para a unidade flutuante, diminuindo assim as trações nos topos das linhas. Outro componente importante de um sistema de ancoragem são os guinchos, que são responsáveis por fornecer a tração necessária para as linhas, mantendo a plataforma na posição projetada.

Quanto à configuração das linhas de ancoragem, são utilizados três tipos: catenária (convencional); *taut-leg* (linhas inclinadas aproximadamente a 45° e tracionadas); e vertical (uso de tendões verticais). Já para a disposição das linhas em relação à unidade flutuantes, os sistemas de

ancoragem podem ser classificados como: ancoragem em ponto único (*single point mooring*), que concentra todas as linhas de ancoragem em uma única posição na embarcação, como o sistema *turret*; ancoragem com posicionamento dinâmico (*dynamic positioning*), que utiliza um sistema de controle composto de sonares e GPS, além de um circuito de propulsores que impulsionam a embarcação nos sentidos longitudinal e transversal; e amarração com quadro de ancoragem (*spread mooring*), ancoragem em múltiplos pontos, onde as linhas estão distribuídas ao redor da embarcação.

Para a plataforma em estudo, as linhas de ancoragem estão dispostas em catenária. A característica principal da ancoragem em catenária é restaurar a posição da plataforma pelo seu peso-próprio e pelo atrito do trecho de linha apoiado no fundo marinho, transmitindo assim, somente esforços horizontais às âncoras. No sistema convencional, as linhas devem ter comprimento suficiente para evitar o levantamento das âncoras mesmo após o rompimento de uma delas. Não obstante, a ancoragem em catenária é inviável para grandes profundidades, devido ao excesso de peso da linha e ao raio de ancoragem bastante elevado (aproximadamente três vezes a lâmina d'água), o que acarreta problemas de arranjo submarino.

Já o sistema de ancoragem adotado na plataforma de interesse é o *spread mooring*. Este tipo de sistema tem capacidade para acomodar grande quantidade de *risers* e umbilicais e responde a carregamentos vindo de qualquer direção. Além disso, confere uma certa complacência à unidade flutuante, tornando-o indicado para regiões onde o mar crítico tem predominância numa direção – o que é levado em conta por ocasião do projeto.

2.2 Resposta de uma estrutura sob carregamentos dinâmicos

Diz-se que um sistema sofre vibração forçada sempre que uma energia externa é fornecida ao mesmo. A energia externa pode ser fornecida ao sistema através de uma força aplicada ou por uma excitação de deslocamento imposta. A natureza da força aplicada ou da excitação imposta ao sistema pode ser de natureza harmônica ou não-harmônica, mas periódica, não-periódica ou aleatória (Rao [13]).

Uma unidade flutuante (UF) é mantida na posição de projeto pelo sistema de ancoragem e está submetida à carregamentos harmônicos (ondas). Considerando os movimentos da UF em uma direção e tratando o sistema de ancoragem com uma mola linear nesta direção, pode-se tratar a dinâmica da estrutura como um sistema massa-mola-amortecedor naquela direção (Chakrabarti [1]).

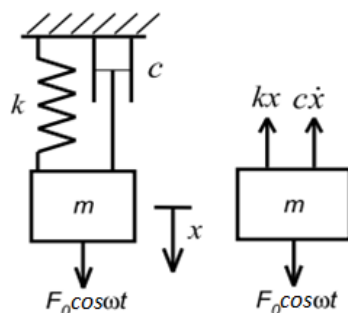


Figura 1. Sistema massa-mola-amortecedor (adaptado de Chakrabarti [1])

Considerando um sistema massa-mola-amortecedor (Fig. 1), temos que m é a massa do corpo em movimento, k é a rigidez e a força atuante é definida por uma função harmônica de amplitude F_0 e frequência ω , sendo t o tempo (Rao [13]). A equação de movimento deste sistema pode ser escrita como a Eq. (1).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (1)$$

A partir da Eq. (1) de movimento analítica apresentada, soluções numéricas foram desenvolvidas para obtenção dos movimentos dos componentes de sistemas mais complexos, com mais graus de liberdade. Tomando por base a discretização espacial do método dos elementos finitos (Bathe [14]), o comportamento estrutural dinâmico não-linear pode ser então descrito pela Eq. (2), com Eq. (3).

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{R}(\mathbf{u}(t)) = \mathbf{F}(\mathbf{u}, t) \quad (2)$$

$$\mathbf{C} = \alpha_m \mathbf{M} + \alpha_k \mathbf{K} \quad (3)$$

Nesta formulação, as incógnitas $\ddot{\mathbf{u}}(t)$, $\dot{\mathbf{u}}(t)$ e $\mathbf{u}(t)$ são os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento – e cada um de seus componentes corresponde a um dos graus de liberdade considerados para a malha de elementos finitos em questão. A matriz \mathbf{C} pode ser definida como a matriz de amortecimento proporcional de Rayleigh da Eq. (3), isto é, uma combinação linear das matrizes globais de massa \mathbf{M} e de rigidez \mathbf{K} . Já $\mathbf{R}(\mathbf{u})$ é o vetor de forças internas elásticas, calculado considerando funções não-lineares dos deslocamentos desconhecidos \mathbf{u} .

Conforme descrito em de Araújo Neto [15], baseado em Jacob [16], os componentes lineares (cabos, linhas de ancoragem e *risers*) do sistema podem ser representados por malhas de elementos finitos do tipo pórtico tridimensional. Já a unidade flutuante pode ser representada por um corpo rígido definido por suas propriedades geométricas globais, hidrodinâmicas e de massa.

O objeto de estudo deste trabalho se restringe a avaliar a parcela de rigidez k quando da variação da posição ou da configuração do sistema de ancoragem. Sendo a unidade flutuante representada por um corpo rígido, a sua rigidez global advém da resultante de forças das linhas de ancoragem sobre ela. Assim, para comparar a variação da rigidez considerado apenas a mudança de configuração do sistema, considera-se a lei de Hooke para o caso estático com parcela unicamente de rigidez/mola. Para um dado sistema, portanto, variando-se a posição do corpo com um deslocamento d , obtém-se o valor de rigidez dado pela Eq. (4).

$$k = \frac{F}{d} \quad (4)$$

3 Metodologia

Os dois fatores de influência na rigidez da plataforma que se interessa avaliar são: a mudança de posição da plataforma (em geral relacionada à resposta estática das ações ambientais), e o eventual rompimento de uma das linhas de ancoragem do sistema.

Esse estudo foi desenvolvido na ferramenta computacional Situa-Prosim (Jacob [16]), onde foram utilizados modelos numéricos acoplados de uma plataforma de petróleo semissubmersível com sistema de ancoragem *spread-mooring* composto por 8 linhas dispostas em catenária convencional.

O Situa-Prosim é um software com capacidade de processar soluções numérica das equações de movimento descritas na seção 2.2, com modelagem da unidade flutuante como corpo rígido e das linhas de ancoragem e *risers* por elementos finitos, através de diferentes algoritmos dinâmicos, tais como: o método de solução híbrido no domínio do tempo-frequência baseado numa abordagem da função de Green (HTF-GA) (Correa [17]); algoritmo de integração no tempo com variante implícita de Newmark [18] como proposto por Wood [19].

Essas soluções também podem ser calculadas com passo de tempo adaptativo, conforme Jacob [20] e Jacob [21]. Para lidar com efeitos de não-linearidade, a implementação deste algoritmo implícito é associado ao método Newton-Raphson, como descrito em Bathe [14] e Jacob [22]. Já em relação às análises estáticas, para o caso de a formulação da solução ser fortemente acoplada, a implementação clássica do método Newton-Raphson é adotada para as equações de equilíbrio estáticas globais não-lineares. Já para o caso de a formulação ser fracamente acoplada, há estratégias diferentes de solução. Maiores detalhes em Jacob [16] e Rodrigues [23].

Assim, para aferir a rigidez da plataforma foram aplicados *offsets* de 10m, 15m, 20m, 25m, 30m e 35m a partir da posição de equilíbrio seguindo as 8 direções cardais e colaterais, para o modelo intacto (com todas as linhas de ancoragem) e em situação de avaria (com cada uma das linhas de ancoragem rompidas separadamente). A rigidez horizontal da unidade flutuante é dada pela divisão das forças de restauração geradas a partir do deslocamento da plataforma pelo valor do *offset* aplicado na mesma, conforme Eq. (4).

A partir dos valores de rigidez obtidos, foram elaborados curvas e diagramas para cada situação analisada, de forma a obter um melhor entendimento do comportamento da plataforma, conforme será mostrado na seção 5.

4 Estudo de caso

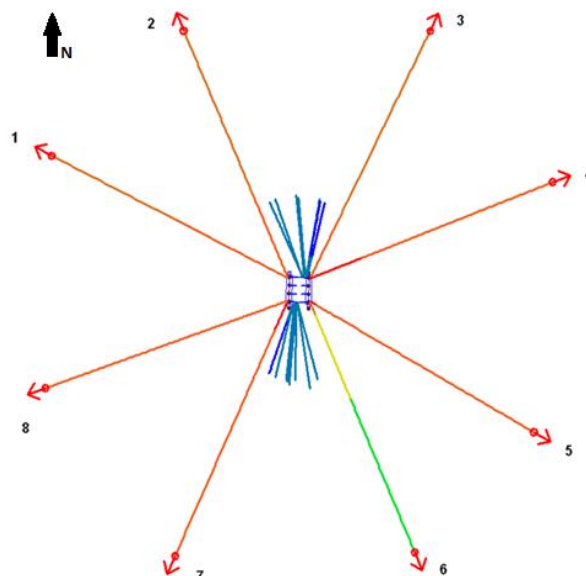


Figura 2. Vista superior da plataforma e linhas de ancoragem

O modelo utilizado para o estudo de caso consiste numa plataforma semissubmersível projetada para uma lâmina d'água de cerca de 900m, sendo o casco composto por quatro colunas e dois *pontoons*. Suas propriedades principais são apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1. Propriedades da unidade flutuante

| Propriedade | Valor |
|--|--------|
| Comprimento (m) | 108.58 |
| Largura (m) | 56.44 |
| Altura (m) | 36.68 |
| Calado (m) | 21.44 |
| Massa (ton) | 23,171 |
| Aproamento com Norte | 0.973° |
| Coordenada X do CG (m) | 0.0 |
| Coordenada Y do CG (m) | 0.0 |
| Coordenada Z do CG (m) | 17.29 |
| Diâmetro das colunas (m) | 9.0 |
| Diâmetro maior dos <i>pontoons</i> (m) | 16.37 |
| Diâmetro menor dos <i>pontoons</i> (m) | 6.8 |
| Raio de giração X | 32.0 |
| Raio de giração Y | 31.395 |
| Raio de giração Z | 38.67 |

A plataforma é ancorada por 8 linhas em configuração de catenária convencional. Todas as linhas são compostas por um segmento intermediário de cabo de aço e por amarras nas extremidades, cujas propriedades são apresentadas na Tab. 2. Os azimutes e as trações de topo das linhas de ancoragem são apresentados na Tab. 3. A vista superior da plataforma e da disposição das linhas de ancoragem está ilustrada na Fig. 2.

Tabela 2. Propriedades dos materiais constituintes das linhas de ancoragem

| Propriedade | Amarra de topo | Cabo de aço | Amarra de fundo |
|------------------------|----------------|-------------|-----------------|
| Diâmetro nominal (m) | 0.076 | 0.103 | 0.105 |
| Rigidez axial (EA, kN) | 478,051 | 333,221 | 840,226 |
| Peso no ar (kN/m) | 1.1 | 0.4316 | 2.0 |
| Peso na água (kN/m) | 1.08 | 0.3543 | 1.9 |

Tabela 3. Azimute e tração de topo das linhas de ancoragem

| Linha | Azimute | Tração de topo (kN) |
|-------|---------|---------------------|
| 1 | 296.6° | 655.37 |
| 2 | 336.4° | 637.15 |
| 3 | 26.7° | 641.06 |
| 4 | 69.0° | 792.63 |
| 5 | 119.5° | 731.11 |
| 6 | 156.6° | 496.30 |
| 7 | 204.5° | 775.05 |
| 8 | 250.8° | 692.34 |

O sistema de produção foi modelado genericamente por 11 *risers* flexíveis, sendo cinco com diâmetro de 4", cinco com diâmetro de 8" e um com diâmetro de 15". As linhas foram discretizadas com malhas relativamente grosseiras, sendo elementos menores no topo e no TDZ (Touch Down Zone), e elementos maiores nos segmentos suspensos intermediários.

Conforme já mencionado, foram consideradas as direções de deslocamento da plataforma para: Norte, Nordeste, Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste. Para cada uma dessas direções, foram aplicados os valores de *offset* de: 10m, 15m, 20m, 25m, 30m e 35m. Em cada uma dessas 48 posições, foram elaborados 1 modelo intacto e mais 8 modelos de avaria (um para cada linha de ancoragem), totalizando 432 modelos analisados. Em todos os modelos, a saída do programa em termos de componentes horizontais da força de restauração sobre a plataforma é obtida para o cálculo da rigidez.

5 Resultados

Esta seção apresenta os resultados em termos de rigidez horizontal (kN/m) para os modelos considerados. Essa rigidez é calculada pela soma das componentes horizontais de força de restauração de todas as linhas de ancoragem dividida pelo deslocamento considerado. As Tabs. 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, e 11 apresentam os valores resultantes agrupados pelas direções de deslocamento dos modelos. Os demais gráficos se baseiam nos valores destas tabelas.

Tabela 4. Rigidez horizontal (kN/m) para modelos com deslocamento na direção Norte

| Desl. (m) | Intacto | Avariado | | | | | | | |
|--------------|---------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 |
| 10 | 144.1 | 162.1 | 168.4 | 169.6 | 169.5 | 129.1 | 94.5 | 53.7 | 132.7 |
| 15 | 154.2 | 163.5 | 166.2 | 167.3 | 167.7 | 137.8 | 108.5 | 65.2 | 141.6 |
| 20 | 166.7 | 172.4 | 174.0 | 174.8 | 175.2 | 150.2 | 120.3 | 74.4 | 154.2 |
| 25 | 189.1 | 193.0 | 193.9 | 194.6 | 194.8 | 171.3 | 136.3 | 88.9 | 176.6 |
| 30 | 232.1 | 234.6 | 235.4 | 236.0 | 236.5 | 214.7 | 174.3 | 100.7 | 218.3 |
| 35 | 282.2 | 283.9 | 284.6 | 285.2 | 285.6 | 264.6 | 216.9 | 114.5 | 267.4 |

Tabela 5. Rigidez horizontal (kN/m) para modelos com deslocamento na direção Nordeste

| Desl. (m) | Intacto | Avariado | | | | | | | |
|--------------|---------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 |
| 10 | 162.2 | 150.8 | 177.8 | 186.3 | 193.6 | 181.4 | 153.1 | 69.3 | 79.7 |
| 15 | 172.3 | 161.2 | 180.7 | 185.2 | 187.4 | 182.5 | 164.0 | 81.6 | 96.2 |
| 20 | 186.5 | 176.1 | 191.9 | 194.5 | 195.4 | 192.8 | 178.5 | 91.8 | 110.0 |
| 25 | 208.0 | 197.5 | 211.7 | 213.3 | 213.8 | 212.3 | 200.2 | 103.9 | 127.0 |
| 30 | 269.3 | 259.2 | 272.1 | 273.1 | 273.2 | 272.1 | 261.0 | 130.8 | 170.3 |
| 35 | 345.1 | 334.7 | 347.2 | 347.9 | 347.9 | 347.2 | 336.7 | 170.9 | 215.4 |

Tabela 6. Rigidez horizontal (kN/m) para modelos com deslocamento na direção Leste

| Desl. (m) | Intacto | Avariado | | | | | | | |
|--------------|---------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 |
| 10 | 163.9 | 87.8 | 149.5 | 182.4 | 195.0 | 191.6 | 175.4 | 148.9 | 74.1 |
| 15 | 173.4 | 102.0 | 159.6 | 183.5 | 188.3 | 187.0 | 179.9 | 157.0 | 89.7 |
| 20 | 186.8 | 113.1 | 172.6 | 193.0 | 195.6 | 195.0 | 191.1 | 170.9 | 102.0 |
| 25 | 205.4 | 127.6 | 192.0 | 209.7 | 211.2 | 210.7 | 208.4 | 188.2 | 113.7 |
| 30 | 256.9 | 162.9 | 243.2 | 260.0 | 260.7 | 260.5 | 259.0 | 238.5 | 137.7 |
| 35 | 331.9 | 210.2 | 317.6 | 334.2 | 334.7 | 334.5 | 333.6 | 312.7 | 174.8 |

Tabela 7. Rigidez horizontal (kN/m) para modelos com deslocamento na direção Sudeste

| Desl. (m) | Intacto | Avariado | | | | | | | |
|--------------|---------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 |
| 10 | 157.0 | 66.2 | 78.6 | 150.5 | 182.0 | 185.7 | 175.4 | 177.6 | 138.3 |
| 15 | 167.2 | 81.7 | 93.7 | 159.6 | 180.5 | 181.2 | 177.3 | 177.8 | 148.7 |
| 20 | 183.1 | 94.4 | 108.2 | 175.7 | 191.5 | 191.4 | 189.4 | 189.5 | 164.2 |
| 25 | 201.8 | 106.4 | 121.3 | 194.3 | 207.4 | 207.2 | 206.1 | 206.1 | 183.2 |
| 30 | 255.9 | 134.2 | 155.5 | 247.4 | 259.8 | 259.5 | 259.0 | 259.1 | 237.1 |
| 35 | 334.7 | 175.8 | 201.6 | 325.7 | 337.4 | 337.4 | 337.1 | 337.1 | 315.5 |

Tabela 8. Rigidez horizontal (kN/m) para modelos com deslocamento na direção Sul

| Desl. (m) | Intacto | Avariado | | | | | | | |
|--------------|---------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 |
| 10 | 147.6 | 132.4 | 72.5 | 77.9 | 138.1 | 170.0 | 166.1 | 178.5 | 166.8 |
| 15 | 160.6 | 144.1 | 88.9 | 92.6 | 148.4 | 172.5 | 170.9 | 176.0 | 170.6 |
| 20 | 173.0 | 156.4 | 99.4 | 103.5 | 160.5 | 180.4 | 179.4 | 182.4 | 179.2 |
| 25 | 190.5 | 174.1 | 112.2 | 115.3 | 177.0 | 195.2 | 195.0 | 196.8 | 194.8 |
| 30 | 223.2 | 205.3 | 126.5 | 140.1 | 210.0 | 226.7 | 226.5 | 227.5 | 226.1 |
| 35 | 291.1 | 272.2 | 164.5 | 179.6 | 276.9 | 293.7 | 293.6 | 294.4 | 293.3 |

Tabela 9. Rigidez horizontal (kN/m) para modelos com deslocamento na direção Sudoeste

| Desl. (m) | Intacto | Avariado | | | | | | | |
|--------------|---------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 |
| 10 | 160.6 | 178.9 | 151.8 | 82.4 | 65.4 | 152.5 | 170.5 | 190.9 | 187.8 |
| 15 | 174.3 | 184.1 | 164.3 | 96.9 | 84.0 | 165.0 | 179.9 | 189.5 | 187.6 |
| 20 | 187.9 | 194.1 | 178.0 | 107.9 | 95.8 | 178.6 | 191.5 | 197.1 | 195.7 |
| 25 | 209.1 | 213.4 | 198.7 | 122.5 | 109.5 | 200.2 | 211.8 | 215.2 | 214.3 |
| 30 | 269.7 | 272.9 | 259.4 | 163.6 | 137.1 | 260.2 | 271.6 | 273.9 | 273.3 |
| 35 | 347.6 | 350.1 | 336.8 | 208.7 | 178.4 | 338.1 | 349.1 | 350.8 | 350.2 |

Tabela 10. Rigidez horizontal (kN/m) para modelos com deslocamento na direção Oeste

| Desl. (m) | Intacto | Avariado | | | | | | | |
|--------------|---------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 |
| 10 | 160.4 | 185.2 | 176.1 | 138.6 | 57.3 | 95.0 | 151.2 | 185.9 | 187.9 |
| 15 | 172.8 | 185.3 | 181.3 | 153.6 | 76.8 | 107.8 | 163.8 | 186.1 | 186.1 |
| 20 | 185.3 | 193.0 | 190.7 | 167.2 | 87.6 | 119.4 | 176.9 | 193.7 | 193.2 |
| 25 | 207.0 | 212.0 | 210.4 | 187.9 | 98.8 | 138.1 | 199.1 | 212.7 | 212.1 |
| 30 | 262.1 | 265.6 | 264.4 | 241.7 | 115.8 | 184.6 | 254.7 | 266.3 | 265.6 |
| 35 | 339.8 | 342.4 | 341.5 | 319.5 | 156.7 | 232.6 | 331.6 | 342.8 | 342.3 |

Tabela 11. Rigidez horizontal (kN/m) para modelos com deslocamento na direção Noroeste

| Desl. (m) | Intacto | Avariado | | | | | | | |
|--------------|---------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 |
| 10 | 139.3 | 165.7 | 163.6 | 153.4 | 123.4 | 43.4 | 88.7 | 137.4 | 162.2 |
| 15 | 152.1 | 165.4 | 164.2 | 159.4 | 133.9 | 59.8 | 105.1 | 145.1 | 164.3 |
| 20 | 163.6 | 171.7 | 170.9 | 168.2 | 145.6 | 69.9 | 115.5 | 155.2 | 171.2 |
| 25 | 186.0 | 191.4 | 190.9 | 189.2 | 167.6 | 84.6 | 131.1 | 176.1 | 191.0 |
| 30 | 230.6 | 234.4 | 233.9 | 232.8 | 210.5 | 95.9 | 169.8 | 220.4 | 234.2 |
| 35 | 287.2 | 290.1 | 289.7 | 288.7 | 265.7 | 109.9 | 217.8 | 276.7 | 289.9 |

Assim, para melhor avaliação destes resultados, gráficos da curva de rigidez horizontal agrupadas por direção de *offset* e mapas polares de rigidez são apresentados nas seções 0 e 5.2, respectivamente. Isto é importante para que os efeitos de avaria e de *offset* possam ser observados tanto em termos de não-linearidade das curvas de rigidez, quanto para avaliação do efeito da avaria de cada linha a depender da posição da plataforma.

5.1 Curvas de rigidez horizontal

As Figs. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 apresentam as curvas de rigidez horizontal *versus* deslocamento da plataforma para as direções Norte, Nordeste, Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste respectivamente. A curva para o modelo intacto está apresentada em preto para referência. As curvas em gradação de marrom foram adotadas para os casos em que há diminuição do valor da rigidez com a avaria da linha, enquanto as curvas em gradação de azul são para os casos em que há aumento no valor da rigidez com a avaria da linha. O comportamento de todas elas é visivelmente não-linear.

As curvas marrons (diminuição de rigidez na avaria) tendem a manter-se afastadas da curva intacta em proporção maior do que as curvas azuis. Ademais, percebe-se que sempre duas linhas parecem ter maior influência na diminuição da rigidez do sistema quando há avaria, a depender da direção de *offset*. Por exemplo: para deslocamentos da plataforma em Leste (Fig. 5), a avaria das linhas 1 e 8 geram a maior redução de rigidez. Ao comparar com a Fig. 2, é possível perceber que estas linhas estão posicionadas justamente no sentido oposto ao de deslocamento da plataforma, de modo que é de se esperar que elas estariam mais solicitadas na condição intacta. Este comportamento é observado para todas as outras direções, sendo: para a Norte, as linhas 6 e 7; para Nordeste, as linhas 7 e 8; para Sudeste, as linhas 1 e 2; para Sul, as linhas 2 e 3; para Sudoeste, as linhas 3 e 4; para Oeste, as linhas 4 e 5; para Noroeste, as linhas 5 e 6.

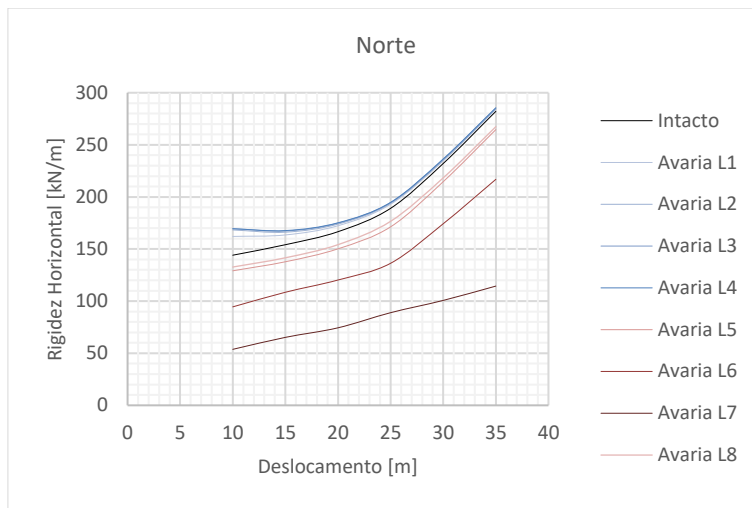


Figura 3. Curva de rigidez para modelos com deslocamento em Norte

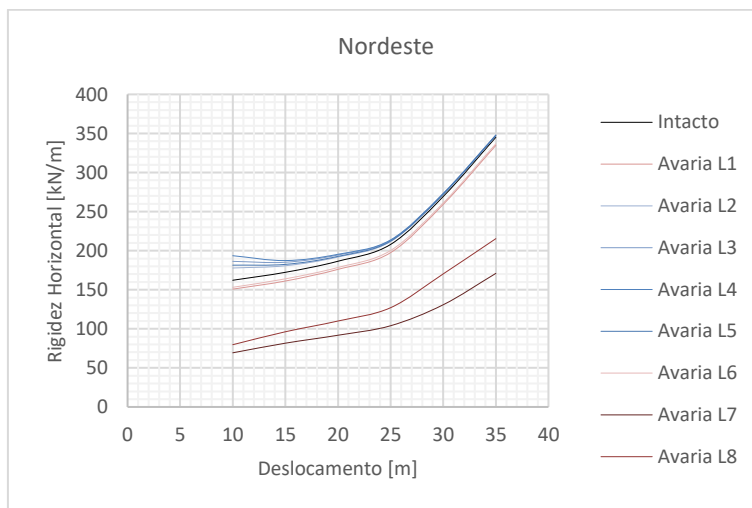


Figura 4. Curva de rigidez para modelos com deslocamento em Nordeste

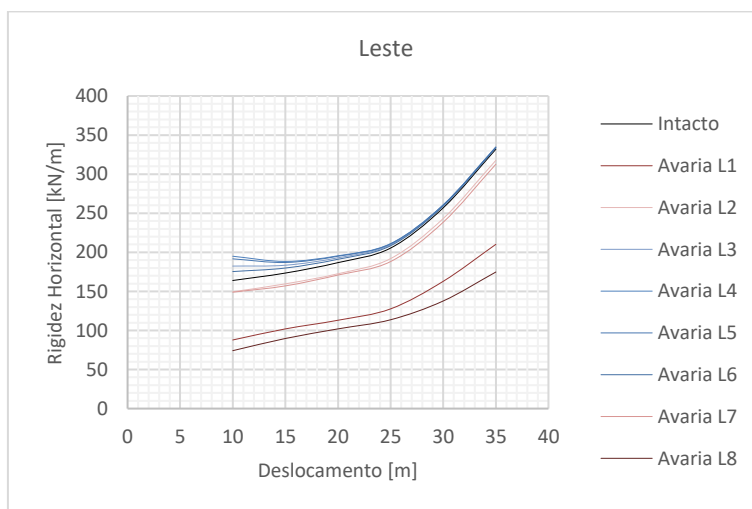


Figura 5. Curva de rigidez para modelos com deslocamento em Leste

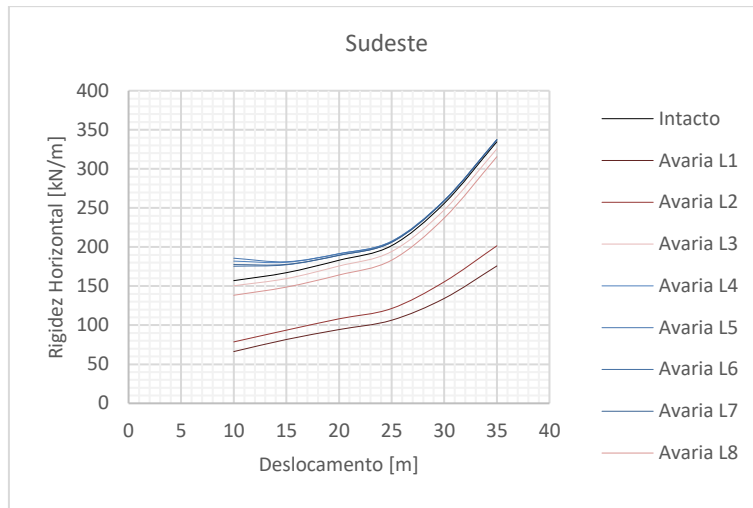


Figura 6. Curva de rigidez para modelos com deslocamento em Sudeste

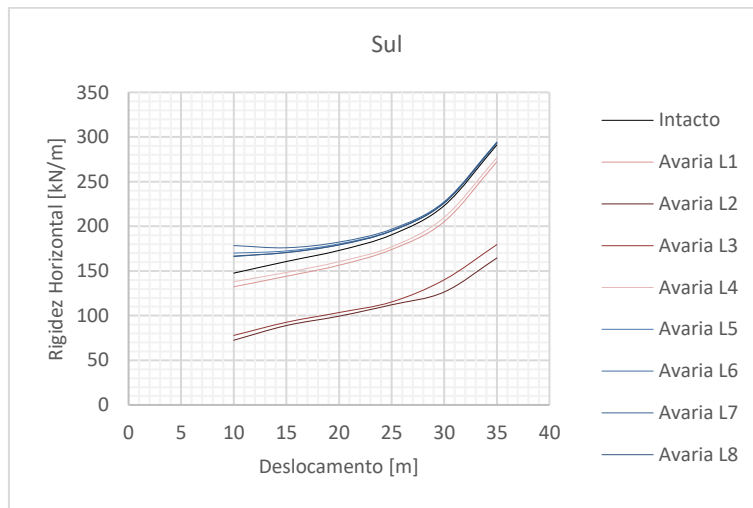


Figura 7. Curva de rigidez para modelos com deslocamento em Sul

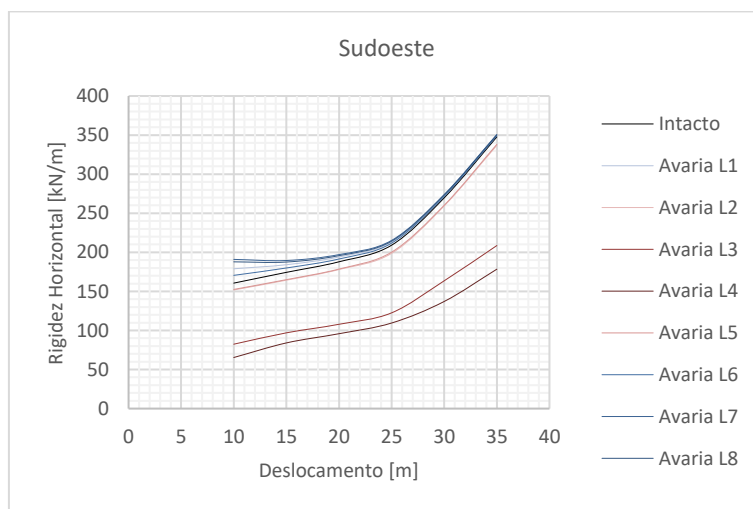


Figura 8. Curva de rigidez para modelos com deslocamento em Sudoeste

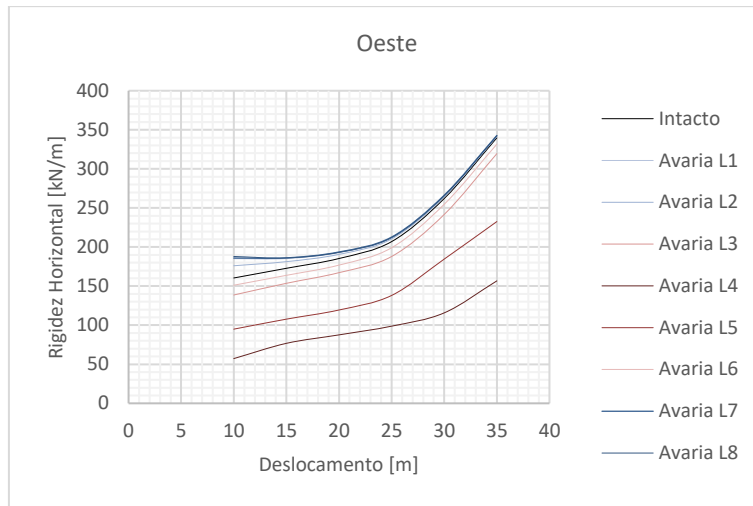


Figura 9. Curva de rigidez para modelos com deslocamento em Oeste

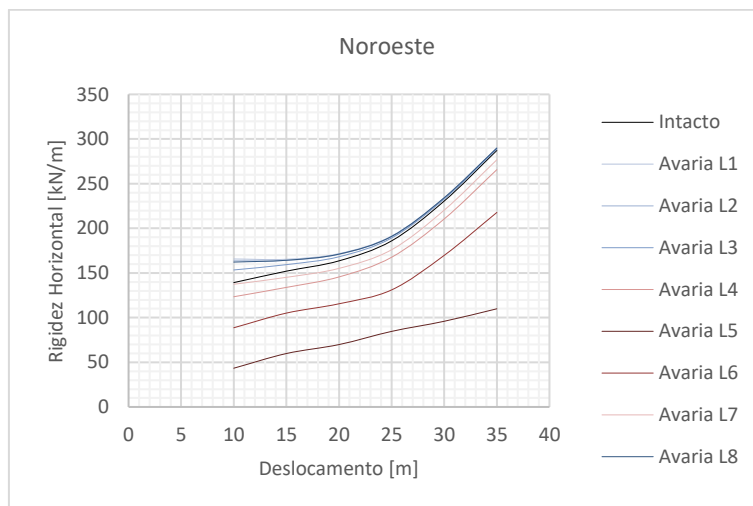


Figura 10. Curva de rigidez para modelos com deslocamento em Noroeste

Por outro lado, observa-se que as curvas azuis (aumento de rigidez na avaria) tendem a ficar muito próximas do valor intacto conforme o *offset* aumenta (posição *far*), mas se afastam levemente para *offsets* menores (posição *near*). Percebe-se ainda que, para cada direção de deslocamento, há sempre 4 linhas que, quando avariadas, provocam aumento na rigidez horizontal do sistema. Se compararmos com a Fig. 2, percebe-se que são sempre as 4 linhas mais proximamente alinhadas à direção de deslocamento. Assim: para deslocamento da plataforma em Norte (Fig. 3), a avaria das linhas de 1 a 4 geram este efeito; para Nordeste, são as de 2 a 5; para Leste, são as de 3 a 6; para Sudeste, são as de 4 a 7; para Sul, são as de 5 a 8; para Sudoeste, são as de 6 a 8 e a 1; para Oeste, são as 7, 8, 1 e 2; para Noroeste, são as 8 e de 1 a 3. Numa situação intacta, estas seriam as linhas de ancoragem que estariam menos solicitadas, e o rompimento delas tende a deixar as demais linhas mais solicitadas.

Considerando que as linhas de ancoragem, individualmente, também têm comportamento não-linear de rigidez em relação ao seu próprio nível de tração e, de forma análoga, à sua taxa de deformação axial, é de se esperar que isto reflita no comportamento global da estrutura. Assim, se as linhas de ancoragem mais solicitadas estão sempre alinhadas de forma oposta à direção do *offset* e se porventura há avaria de uma das linhas menos solicitadas, alinhada ao bordo na mesma direção de *offset*, o nível de tração desta linha avariada será redistribuído para as linhas restantes. Logo, para as linhas que já estavam mais solicitadas, esse acréscimo de tração gerará, para o sistema como um todo, um aumento mais acentuado de rigidez. Isto pode explicar o motivo pelo qual nas posições *near* há

uma percepção maior, relativamente, do aumento de rigidez no sistema, qual seja: o aumento de rigidez proporcionado pela redistribuição de carga nas linhas mais tracionadas é mais considerável do que o efeito da perda de uma das linhas que já eram menos tracionadas no sistema.

5.2 Mapas polares de rigidez horizontal

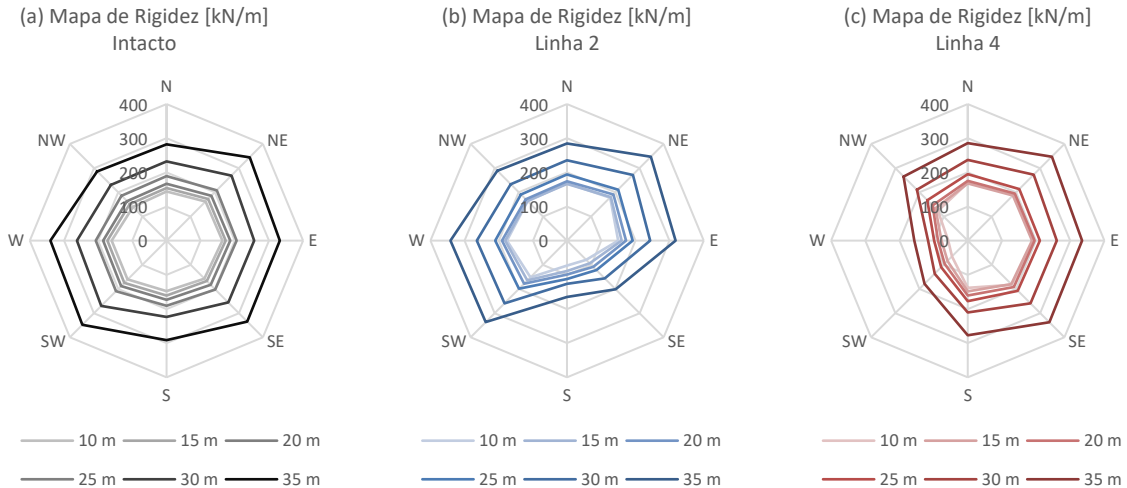


Figura 11. Mapas de rigidez horizontal, modelos: (a) intacto, (b) com avaria da linha 2 e (c) com avaria da linha 4

Nesta seção estão apresentados na Fig. 11 os mapas polares de rigidez horizontal para o modelo intacto e para as linhas originalmente menos e mais tracionadas do sistema – linhas 2 e 4 respectivamente (conforme Tab. 3), ilustrando o efeito de avaria de uma linha no valor da rigidez do sistema a depender do posicionamento da plataforma. A comparação entre os modelos intacto e com avaria para as linhas 2 e 4 é apresentado com mais detalhes nas Figs. 12 e 13, respectivamente, que mostram os mapas polares de rigidez horizontal para cada *offset*.

Através dos mapas de rigidez apresentados nas Figs. 11(b), 11(c), 12 e 13, observa-se que quando há deslocamento da plataforma no sentido *far* da linha onde foi considerada a avaria, acontece uma queda acentuada nos valores obtidos de rigidez, explicitando a contribuição da rigidez dessas linhas quando aplicado *offset* na direção oposta. Isto é, a maior contribuição da linha para a rigidez do sistema se dá para deslocamentos alinhados à direção dessa linha, mas no sentido de afastamento desta, o que aumentaria a tração. Já para o deslocamento da plataforma no sentido *near* ou ortogonal da linha rompida a rigidez é parecida e em alguns casos há até mesmo um ligeiro aumento.

Não é intuitivo pensar que o rompimento de uma linha aumente a rigidez do sistema, mas isso é constatado para alguns casos onde a plataforma exigiria menor contribuição da linha rompida para o deslocamento aplicado. Quando uma linha se rompe, a plataforma assume uma nova posição de equilíbrio, com uma redistribuição das trações na ancoragem de modo a compensar a perda de tração da linha rompida, o que pode causar um grande aumento de rigidez das linhas não-rompidas devido à não-linearidade dessa propriedade. À medida que a plataforma se desloca no sentido de aproximação da linha rompida a rigidez do sistema em avaria tende a se aproximar da rigidez do sistema intacto justamente porque a linha rompida seria menos solicitada e, portanto, contribuiria menos para o sistema.

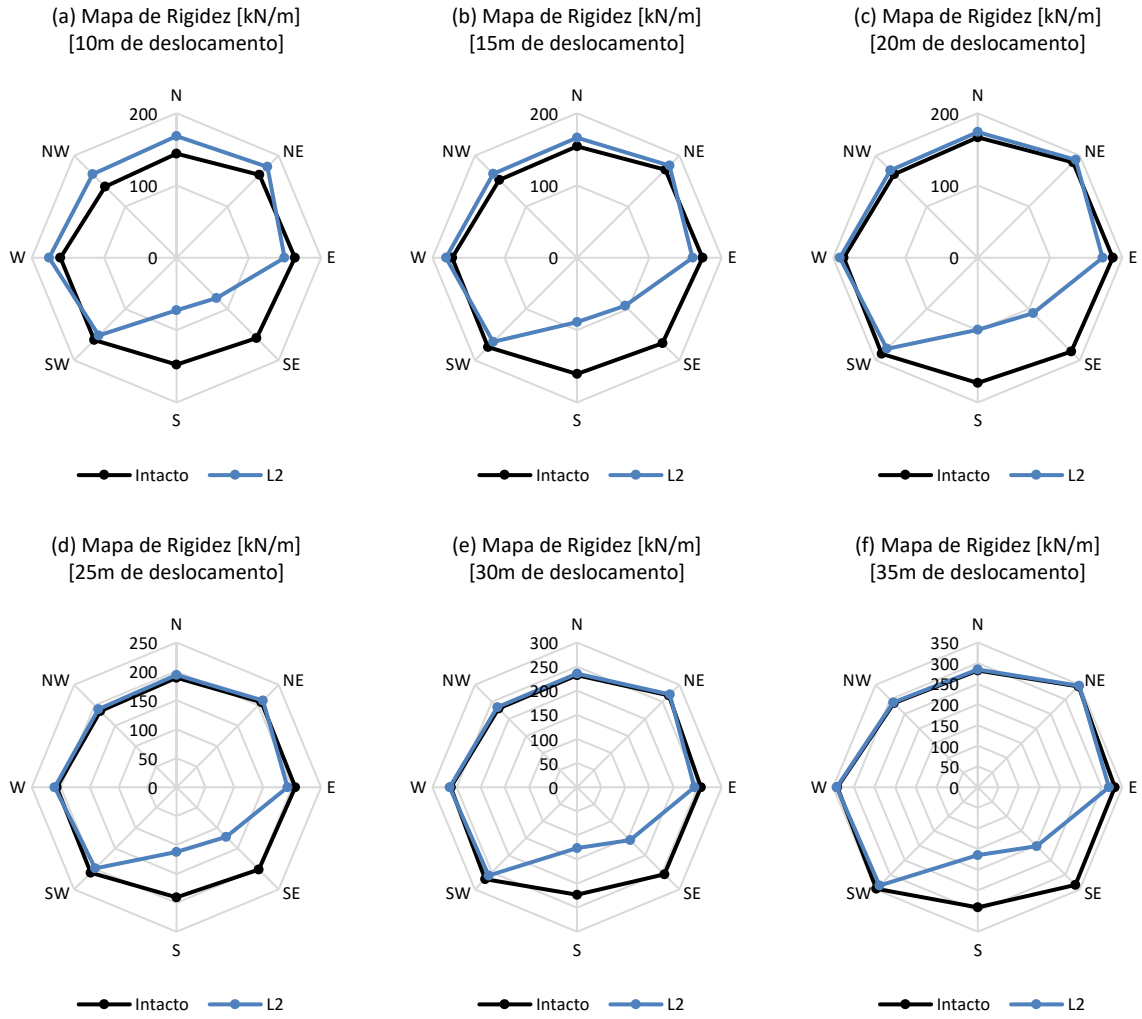


Figura 12. Mapas de rigidez horizontal, modelos intacto e com avaria da linha 2, *offsets*: (a) 10m, (b) 15m, (c) 20m, (d) 25m, (e) 30m, (f) 35m

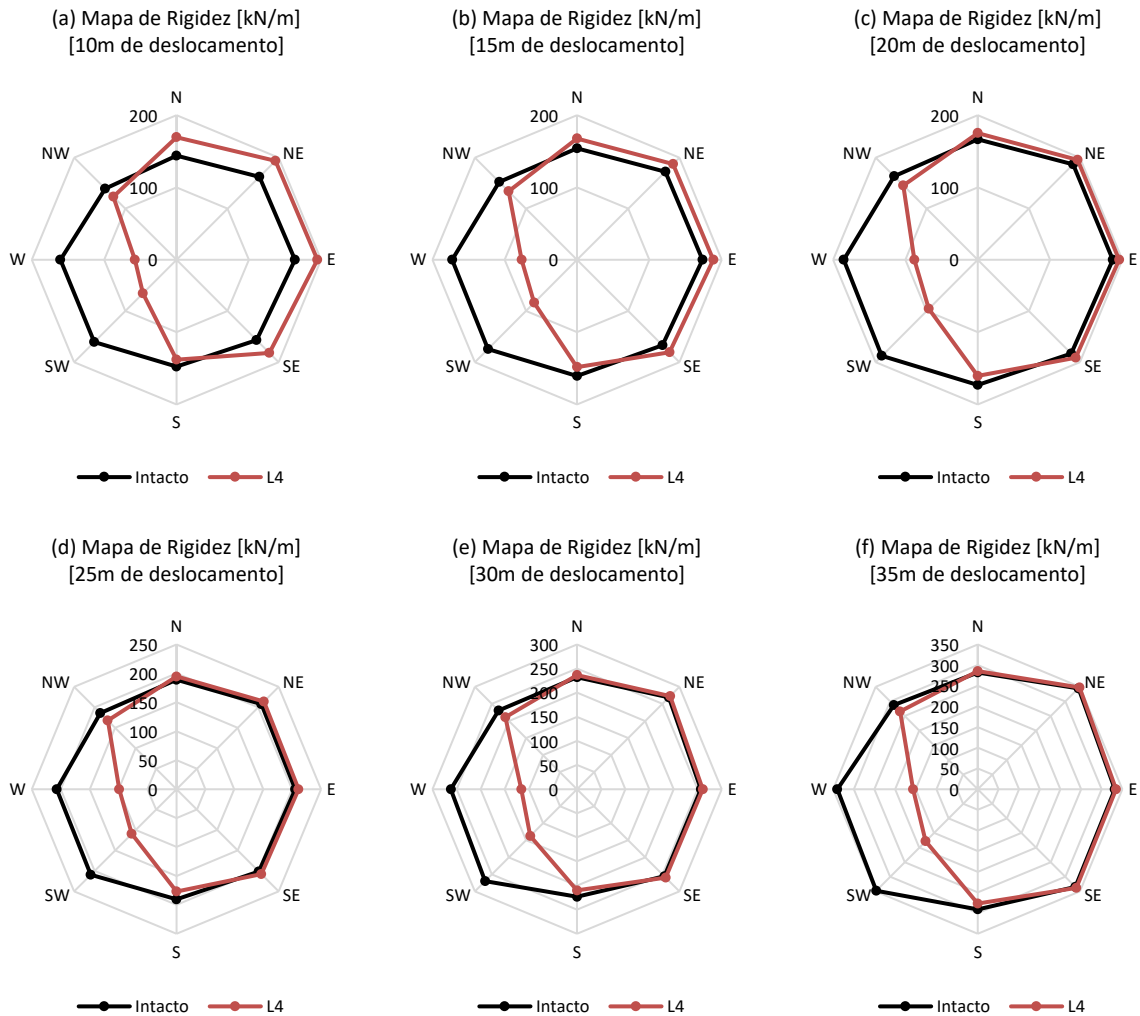


Figura 13. Mapas de rigidez horizontal, modelos intacto e com avaria da linha 4, *offsets*: (a) 10m, (b) 15m, (c) 20m, (d) 25m, (e) 30m, (f) 35m

6 Conclusões

A proposta deste trabalho foi de estudar a influência na rigidez horizontal do *offset* e da condição de avaria de uma linha de ancoragem para uma unidade *offshore* do tipo plataforma semissubmersível com sistema de ancoragem *spread mooring*. De acordo com os resultados obtidos, chega-se à conclusão de que tanto o *offset* da plataforma quanto o rompimento de uma das linhas de ancoragem do sistema têm de fato influência na rigidez horizontal da unidade flutuante.

Foi possível observar o comportamento não-linear da rigidez do sistema no plano horizontal. Nas posições *near* pode haver aumento de rigidez do sistema com a avaria de uma linha que esteja alinhada à direção de *offset*, sendo este efeito relativamente atenuado conforme se aumenta o *offset*. No entanto, para o rompimento de linhas de ancoragem com alinhamento oposto à direção de *offset*, há perda de rigidez mais claramente evidenciada.

Para o sistema estudado, nota-se também que a inclinação da curva de rigidez horizontal torna-se mais acentuada a partir de um determinado valor de *offset*, que, neste caso, corresponde a aproximadamente 2.5% da lâmina d'água. Estes resultados descrevem um comportamento que pode ser útil para uma eventual identificação de avaria e em quais condições de passeio da plataforma ela seria mais notável. Além disso, lançando mão da sabida relação entre rigidez e período natural de um sistema, abrem-se caminhos para o desenvolvimento de ferramentas que possam acompanhar e avaliar estes processos.

Em termos de comportamento geral da estrutura, o sistema de ancoragem simetricamente distribuído tem a vantagem de fornecer certa redundância contra a avaria de linha de ancoragem. Isto contribui para que a plataforma siga capaz de resistir a carregamentos atuantes em diferentes direções, além de influenciar no fato de a avaria de uma linha nem sempre levar a uma diminuição na rigidez horizontal – e, por conseguinte, a um aumento no período natural do sistema.

Além do alinhamento em relação ao grau de liberdade considerado, efeitos sobre a rigidez horizontal do sistema também estão diretamente relacionados aos níveis de tração das linhas de ancoragem. Isto pode ser observado também nas variações obtidas com o *offset*. A configuração das linhas de ancoragem, que lhes sujeitam a diferentes níveis de tração, permite à plataforma tender a uma configuração/aproamento mais complacente às ações ambientais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras, à Fundação COPPETEC, ao CNPq e à CAPES pelo suporte financeiro fundamental para a realização deste trabalho.

Referências

- [1] S. K. Chakrabarti. *Handbook of offshore engineering*. Elsevier, 2005.
- [2] A. R. C. Girón. *Projeto integrado de sistemas de ancoragem e risers em plataformas flutuantes de produção de petróleo*. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, 2013.
- [3] R. M. Kochem. *Estudo de diferentes concepções de sistemas de ancoragem em lâmina d'água profunda*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, 2016.
- [4] V. L. F. Matos. *Movimentos ressonantes lentos no plano vertical em plataformas semi-submersíveis*. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, 2009.
- [5] M. W. Figueiredo. *Estudo de cargas em cabeça de poço submarino em operações de completação*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, 2001.
- [6] F. N. Corrêa. *Aplicação de metodologias híbridas em estudos paramétricos sobre o comportamento de sistemas offshore*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, 2003.
- [7] API RP 2 SK. *Design and analysis of stationkeeping systems for floating structures*. 3. ed., American Petroleum Institute, 2005.
- [8] A. J. J. Carbono. *Otimização da disposição de linhas de ancoragem utilizando algoritmos genéticos*. Dissertação de mestrado, PUC-RJ, 2005.
- [9] T. A. G. Lacerda. *Análise de sistemas de ancoragem de plataformas flutuantes*. Projeto final de graduação, Poli-UFRJ, 2005.
- [10] P. Y. Kawasaki. *Análise de linhas de ancoragem de plataformas oceânicas considerando diversos tramos e o trecho enterrado da linha*. Projeto final de graduação, Poli-UFRJ, 2010.
- [11] A. D. Lima. *Avaliação de formulações de análise e metodologias de projeto de sistemas de ancoragem de plataformas offshore considerando aspectos do projeto de risers*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, 2011.
- [12] C. S. Seckler. *Metodologia baseada em inspeção e retroanálise para verificação e ajustes de sistemas de ancoragem de unidades flutuantes de produção de petróleo offshore*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, 2011.
- [13] S. S. Rao. *Mechanical vibrations*. 5. ed., Prentice Hall, 2011.
- [14] K. J. Bathe. *Finite elements procedures*. Prentice Hall, 1996.
- [15] E. D. de Araújo Neto, B. M. Jacobvazzo, F. N. Corrêa, B. P. Jacob. *Numerical evaluation of a subsea equipment installation method designed to avoid resonant responses*. Applied Ocean Research 88, p. 288-305, 2019.
- [16] B. P. Jacob, R. A. Bahiense, F. N. Corrêa, B. M. Jacobvazzo. *Parallel implementations of coupled formulations for the analysis of floating production systems, part I: coupling formulations*. Ocean Engineering 55, p. 206-218, 2012.

- [17] F. N. Correa, B. P. Jacob, W. J. Mansur. *Formulation of an efficient hybrid time-frequency domain solution procedure for linear structural dynamic problems*. Computers & Structures 88, p. 331-346, 2010.
- [18] N. M. Newmark. *A method of computation for structural dynamics*. Journal of the Engineering Mechanics Division 85, p. 67-94, 1959.
- [19] W. L. Wood, M. Bossak, O. C. Zienkiewicz. *An alpha modification of Newmark's method*. International Journal for Numerical Methods in Engineering 15, p. 1562-1566, 1980.
- [20] B. P. Jacob, N. F. F. Ebecken. *Adaptative time integration of nonlinear structural dynamic problems*. European Journal of Mechanics 12, p. 277-298, 1993.
- [21] B. P. Jacob, N. F. F. Ebecken. *Towards an adaptive semi-implicit solution scheme for nonlinear structural dynamic problems*. Computer & Structures 52, p. 495-504, 1994.
- [22] B. P. Jacob, N. F. F. Ebecken. *An optimized implementation of the Newmark/Newton-Raphson algorithm for the time integration of nonlinear problems*. Communications in Numerical Methods in Engineering 10, p. 983-992, 1994.
- [23] M. V. Rodrigues, B. P. Jacob. *Specialized numerical tools for coupled analysis of floating units and lines*. Proceedings of the XXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE, 2003.