

ANÁLISE DE INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM DOLFINS DE AMARRAÇÃO E ATRACAÇÃO

Morgana Drieli Wegmann (Norsk Hydro) E-mail: morganaweg.eng@gmail.com

Mauro de Vasconcellos Real (FURG) E-mail: mauroreal@furg.br

Antônio Marcos de Lima Alves (FURG) E-mail: antonioalves@furg.br

Resumo: O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da interação solo-estrutura nos elementos das fundações de um dolfim de amarração e atracação. O dolfim analisado é composto por uma laje horizontal de concreto armado disposta sobre estacas metálicas inclinadas, sendo as estacas compostas cada uma por dois perfis W610x125 soldados lado a lado pelos seus flanges. Para considerar a interação solo-estrutura, foi utilizada como base a metodologia de Winkler (1867). Os modelos computacionais desenvolvidos no trabalho foram elaborados no software ANSYS. Os resultados do modelo que considera a interação solo-estrutura foram comparados com os resultados de modelos convencionais de projeto. Pode-se concluir que a metodologia convencional de projeto para o tipo de estrutura analisada nesse trabalho continua sendo válida, pois fornece resultados a favor da segurança. Em contrapartida, a consideração da interação solo-estrutura apresentou solicitações menores nos elementos mais carregados da fundação, o que pode trazer vantagens econômicas ao projeto.

Palavras-chave: Estruturas portuárias, dolfim, interação solo-estrutura, ANSYS.

ANALYSIS OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION IN MOORING DOLPHINS

Abstract: This study aims to analyze the influence of the soil-structure interaction on the foundation elements of an anchoring and mooring dolphin. The analyzed dolphin consists of a horizontal slab of reinforced concrete arranged on inclined metal piles, each composed of two W610x125 profiles welded side by side by their flanges. Winkler's (1867) methodology was used as a theoretical basis to consider the soil-structure interaction. The computational models developed in the work were prepared on the software ANSYS. The results of the model that considers the soil-structure interaction were compared with the results of conventional project models. Thus, it can be concluded that the conventional project methodology for the type of structure analyzed in this study remains valid, as it provides results in favor of safety. On the other hand, the consideration of the soil-structure interaction presented smaller requests on the most loaded elements of the foundation, which can bring economic benefits to the project.

Keywords: Port structures, dolphin, soil-structure interaction, ANSYS.

1. Introdução

Dolfins são estruturas portuárias que desempenham funções de amarração e atracação de embarcações. São bastante frequentes em terminais de minérios, mas também são encontrados em terminais diversos e estaleiros (ALFREDINI & ARASAKI, 2009). São obras importantes pois absorvem os esforços de atracação e a energia de impacto das embarcações garantindo a segurança das mesmas para realizar as suas operações.

Os dolfins são estruturas geralmente constituídas por laje de concreto armado apoiada sobre estacas metálicas ou em concreto armado ou protendido (TSINKER, 2004). Do ponto de vista da sua utilização os dolfins podem ser classificados como sendo de amarração ou de atracação.

Os dolfins de amarração, além das cargas de peso próprio e sobrecarga acidental, recebem esforços oriundos dos cabos de amarração das embarcações a eles fixadas. Esses esforços agem sobre os dolfins geralmente via cabeços de amarração, peças

metálicas construídas exclusivamente para receber as amarras das embarcações. Os dolphins de atracação, além do seu peso próprio e sobrecarga acidental, recebem esforços oriundos do impacto proveniente da acostagem das embarcações. Os esforços de impacto agem sobre os dolphins através de defensas de atracação, que são elementos de interface entre as embarcações e as estruturas de acostagem, com finalidade de proteger ambas dos esforços de impacto através da absorção da energia cinética advindas das embarcações (ALFREDINI & ARASAKI, 2009).

O modo convencional de projeto de qualquer estrutura geralmente considera que os seus apoios (fundações) são indeslocáveis. Porém, na realidade os elementos de fundação sofrem deformações quando submetidos à aplicação de cargas, fazendo com que as estruturas sofram deslocamentos e redistribuição de esforços. Uma mesma estrutura submetida às mesmas ações externas apresenta reações de apoio que variam conforme as condições do maciço de solo em que ela se encontra (AOKI, 1997).

A interação solo-estrutura (ISE) tem sido frequentemente estudada no contexto do projeto de edifícios, analisando os efeitos dos deslocamentos (recalques) das fundações e a conseqüente redistribuição dos esforços nos pilares e vigas (GUSMÃO, 1994). Estudos que abordam a ISE em obras portuárias são ainda escassos na literatura. As estruturas de fundações profundas, constituídas por estacas ou tubulões, quando utilizadas em estruturas offshore são submetidas a significativas cargas horizontais, que se comportam de modo bastante interativo com o maciço de solo. Devido a esta forte interação, quando as ações sobre as estruturas induzem a deslocamentos horizontais e recalques verticais no maciço de solo, torna-se importante o estudo da interação solo-estrutura.

É neste contexto que o presente trabalho está inserido, através de um estudo da ISE no projeto de estruturas portuárias. As estruturas analisadas tiveram como modelo o projeto de três dolphins de amarração e atracação do Cais Norte do Estaleiro Rio Grande, em Rio Grande/RS. Desse projeto foram retirados os modelos geométricos, os materiais utilizados e os carregamentos externos característicos atuantes nas estruturas.

2. Materiais e métodos

2.1 Descrição dos dolphins analisados

Os dolphins de amarração e atracação analisados neste trabalho são constituídos de uma laje horizontal de concreto armado disposta sobre vinte estacas metálicas inclinadas em rampa de 1:4. Para a modelagem computacional foram utilizadas as dimensões da laje igual a 8,0 m x 6,5 m, espessura de 1,5 m e o concreto com f_{ck} de 40 MPa. Já as estacas metálicas são compostas cada uma por dois perfis W610x125 (Aço ASTM A 572) soldados lado a lado pelos seus flanges.

Assim como as dimensões da estrutura, os carregamentos atuantes também foram retirados do memorial de cálculo do projeto, que consistem em peso próprio, sobrecarga acidental, forças de amarração e força de atracação.

Para a modelagem computacional, o peso próprio da estrutura e a sobrecarga acidental foram considerados como forças distribuídas aplicadas na área da laje. Os esforços provenientes das amarras das embarcações são geralmente aplicados aos cabeços de amarração, para efeito da modelagem da estrutura. Esses esforços são transferidos para a laje onde os cabeços são fixados, fazendo surgir momentos fletores na estrutura, calculados como forças atuantes multiplicadas pela distância vertical das mesmas até o eixo de cálculo da laje.

Os esforços de impacto nas estruturas de acostagem são aplicados nas defensas de atracação. A implementação desses esforços no modelo computacional também deve considerar a transferência de momentos para a estrutura, pois o ponto de aplicação das cargas possui excentricidade em relação ao eixo de referência da laje.

Os carregamentos considerados no modelo e seus respectivos valores estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Esforços considerados na análise das estruturas

Ação	Unidade	Esforço Característico
Peso Próprio	kN/m ²	54,54
Sobrecarga Acidental	kN/m ²	5,00
Amarração - Fx	kN	-1280,00
Amarração - Fz	kN	640,00
Amarração - Mx	kN.m	1241,60
Amarração - Mz	kN.m	2483,20
Impacto - Fz	kN	-901,00
Impacto - Mx	kN.m	1081,20

Foram analisados oito cenários de carregamento a fim de realizar análises paramétricas entre o modelo convencional de projeto e o modelo que considera a ISE. As combinações de carregamento são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2: Combinações de carregamentos utilizadas nas análises

Combinação	Ações presentes	Dolfin
COMB 1	Peso Próprio + Amarração	Amarração
COMB 2	Peso Próprio + Sobrecarga + Amarração	Amarração
COMB 3	Peso Próprio + Impacto	Atracação
COMB 4	Peso Próprio + Sobrecarga + Impacto	Atracação
COMB 5	Peso Próprio + Sobrecarga	Amarração
COMB 6	Peso Próprio	Amarração
COMB 7	Amarração	Amarração
COMB 8	Impacto	Atracação

2.2 Modelo convencional (MC)

Nas estruturas portuárias como os dolfin, as ações horizontais representam a grande parcela de esforços atuantes, de forma que são de fundamental importância na análise estrutural. Quando submetidos a esses carregamentos, os apoios da estrutura sofrem deslocamentos horizontais que podem apresentar valores significativos, e em geral o dimensionamento das fundações está condicionado a estes deslocamentos. Na metodologia convencional de cálculo as fundações profundas são substituídas por modelos de pilares engastados na base (SANTOS & OLIVEIRA, 2018).

Um método de fácil aplicação e muito utilizado no projeto convencional de fundações profundas é o método de Davisson e Robinson (1965), onde é determinado um comprimento (L_s) que somado ao comprimento livre (L_u) da estaca (distância entre o leito marinho e a laje) conduz a um pilar fictício rigidamente engastado, de comprimento $L_e = L_u + L_s$. Segundo Davisson e Robinson (1965), esse pilar fictício

apresenta esforços internos e deslocamentos muito próximos aos da estaca real. A profundidade a partir da qual uma estaca pode ser considerada como perfeitamente engastada no solo é $L_s = 1,8 L_0$, sendo L_0 calculado pela expressão:

$$L_0 = \sqrt[3]{\frac{E_p \cdot I}{n_h}} \quad (1)$$

onde E_p é o módulo de elasticidade do material da estaca, I é o momento de inércia da seção transversal e n_h é a constante de reação horizontal do solo.

2.3 Modelo com interação solo-estrutura (ISE)

A modelagem do efeito do solo no comportamento da estrutura pode ser agrupada basicamente em dois tipos (SANTOS, 2008), sendo:

a) Modelos do meio contínuo, no qual o solo é considerado como um meio elástico contínuo. Nestes modelos é possível simular a interface solo-estaca e também admitir leis de comportamento elastoplástico para o solo.

b) Modelos do meio discreto, no qual o solo é assimilado a uma série de molas independentes com comportamento elástico linear (modelo de Winkler), ou elástico não-linear, através de curvas características.

O método do meio discreto, apesar de ser mais simples, é muito utilizado na prática e pode incorporar não linearidades do solo, variação do coeficiente de reação do solo com a profundidade e pode ser aplicado em solos estratificados.

Neste trabalho, a modelagem do solo na análise da ISE foi baseada na teoria da flexão de uma coluna com apoios elásticos. Nessa metodologia se considera que a reação do solo (p) é proporcional ao deslocamento horizontal da estaca (y), conforme a seguinte equação:

$$E_p \cdot I \cdot \frac{d^4 y}{dz^4} = p = -K_H \cdot y \quad (2)$$

O valor de K_H (módulo de reação horizontal do solo) é de natureza bastante complexa devido à sua variação ao longo da profundidade e da dificuldade de determinação experimental. Terzaghi (1955) indica que K_H é constante com a profundidade em solos coesivos pré-adensados, e varia (aproximadamente linearmente) com a profundidade em solos granulares. Para o caso de areias, a variação de K_H pode ser reescrita na forma da Equação 3, na qual n_h é a constante de reação horizontal do solo.

$$K_H = n_h \cdot z \quad (3)$$

2.4 Método dos Elementos Finitos (MEF)

Uma análise estrutural tem como objetivo principal determinar os efeitos das ações em uma estrutura permitindo que seja realizada uma previsão do comportamento da mesma quando submetida aos seus carregamentos. As metodologias de cálculos são procedimentos matemáticos resultantes de hipóteses adotadas na concepção do modelo estrutural. Destes procedimentos resultam a determinação dos esforços internos na estrutura, as reações de apoios, os deslocamentos e rotações, e as tensões e deformações (MARTHA, 2017).

O método dos elementos finitos (MEF) é um método discreto para solução de equações diferenciais, sendo muito utilizado no campo da engenharia estrutural. Pode ser definido como um método numérico aproximado, no qual o domínio do problema é discretizado em subdomínios de geometria mais simples (AGUIAR, 2007). Os elementos discretos possuem formas simplificadas, como formatos lineares quando da modelagem de estruturas reticuladas, ou triangulares e quadriláteros quando da modelagem de estruturas planas. A divisão em subdomínios é denominada malha de elementos finitos, e a solução do problema são os valores dos deslocamentos e rotações nos nós da malha utilizada.

Neste trabalho, a construção dos modelos computacionais foi desenvolvida com o software ANSYS®, que utiliza o MEF para análises estruturais, apresentando uma enorme variedade de tipos de análises e de elementos. Para a construção dos modelos foram utilizados três tipos de elementos, cada um deles apropriados respectivamente à parte da estrutura simulada.

Para as estacas metálicas, constituídas cada uma por dois perfis W soldados, foram utilizados os elementos do tipo Beam188. Esse elemento conta com dois nós e seis graus de liberdade em cada nó, que incluem translações e rotações nas três direções (x, y e z), aplicando-se a geometrias de espessura reduzida e elevado comprimento. O elemento é baseado na teoria de Timoshenko, suportando também a deformação ao corte, pode ser utilizado em condições de plasticidade e pode ser definido através de uma seção.

Para a laje de concreto armado foram utilizados os elementos do tipo Shell181. Esse elemento é aconselhado para análise de estruturas finas a moderadamente grossas, sendo um elemento de quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó: translação nas três direções, e rotações sobre os três eixos. O elemento é adequado em qualquer tipo de deformação, quer seja linear ou não-linear, é utilizado em análises de pressões distribuídas.

O elemento do tipo Combin14 é um elemento de rigidez axial ou à torção que pode ser utilizado em modelos com até três dimensões. Foram utilizados para modelar o solo circundante nas estacas, representado por molas lineares igualmente espaçadas ao longo da profundidade. A mola opera na direção segundo a qual os nós se encontram alinhados. Também é possível adicionar ao elemento um coeficiente de amortecimento, porém no trabalho o amortecimento não foi utilizado por não ser o interesse da análise.

3. Resultados e discussão

3.1 Modelagem do solo

A partir do boletim de sondagem do ensaio de penetração (SPT), realizado na obra em estudo, foi possível obter as características do perfil de terreno. Para a construção dos dolphins, a superfície do terreno em relação ao nível d'água se encontra na profundidade de 12 m, correspondendo a uma camada de argila com areia fina que se estende até a profundidade de 38 m. Após essa camada encontra-se uma camada de areia fina muito compacta, sendo que a ponta das estacas se encontra na profundidade de 40 m.

No modelo computacional, o solo foi representado como um sistema independente, com apoios elásticos lineares (molas) igualmente espaçadas entre si. Os coeficientes de rigidez das molas foram calculados através da Equação 4, na qual ΔZ representa o comprimento de influência da rigidez da mola, que é igual ao espaçamento entre elas.

$$K = K_H \cdot \Delta Z \quad (4)$$

Em virtude de haver resultados de uma prova de carga horizontal da obra em estudo, foi realizada uma retroanálise desses dados a partir do modelo de solo desenvolvido no trabalho. Esse processo foi necessário para obter um valor de n_h do solo compatível com o perfil de terreno, e posteriormente realizar o cálculo de K_H ao longo da profundidade.

A prova de carga analisada está disponível no trabalho de Santana et al. (2014), o qual apresenta o resultado de prova de carga horizontal realizada em estaca metálica em uma obra realizada no Estaleiro Rio Grande, em local próximo de onde seriam construídos os dolphins de amarração e atracação utilizados para estudo nesse trabalho. Foi utilizada na análise a curva correspondente ao Ensaio 1, extrapolada para tempo infinito (WEGMANN, 2018).

Para obter o valor de n_h , os testes foram realizados em um modelo de estaca isolada desenvolvido no software ANSYS® com elemento do tipo Beam188 para a estaca, e Combin14 para as molas lineares. No modelo computacional foi aplicada a carga horizontal igual a 58,84 kN, correspondente ao valor que resultou no deslocamento máximo, para tempo infinito, da prova de carga. A partir da solução do modelo foi verificado o deslocamento no topo da estaca, e o valor de n_h foi sendo alterado sucessivamente até que o deslocamento atingisse aproximadamente 22,00 mm (valor indicado na prova de carga - y_{pc}). Os resultados deste estudo encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3: Resultado da retroanálise de prova de carga horizontal para obter o valor de n_h do solo

n_h inicial (kN/m ³)	$y_{m\acute{a}x}$ ANSYS (mm)	y_{pc} (mm)
6317,3	20,05	
5000,00	23,11	22,00
5150,00	22,71	
5250,00	22,50	

A partir dos resultados obtidos na retroanálise da prova de carga horizontal, o valor adotado para o n_h do solo foi 5250 kN/m³. Posteriormente foi analisada a influência do espaçamento das molas no valor final do deslocamento horizontal, sendo que os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 4. Assim, admitindo-se um erro de até 5%, o espaçamento adotado para as molas foi de 0,5 m. A partir do valor de n_h , foram calculados 60 coeficientes de rigidez de mola, para serem aplicados ao longo de cada estaca, os seus valores são apresentados na Tabela 5.

Tabela 4: Teste de espaçamento das molas lineares

Espaçamento das molas (m)	$y_{m\acute{a}x}$ ANSYS (mm)	y_{pc} (mm)	Erro (%)
1,00	20,74	22,00	5,84
0,50	22,50	22,00	2,11
0,30	22,81	22,00	3,44

Tabela 5: Valores adotados para os coeficientes de rigidez das molas

Numeração	K (kN/m)	Numeração	K (kN/m)	Numeração	K (kN/m)
K1	164,06	K21	26250,00	K41	52500,00
K2	1312,50	K22	27562,50	K42	53812,50
K3	2625,00	K23	28875,00	K43	55125,00
K4	3937,50	K24	30187,50	K44	56437,50
K5	5250,00	K25	31500,00	K45	57750,00
K6	6562,50	K26	32812,50	K46	59062,50
K7	7875,00	K27	34125,00	K47	60375,00
K8	9187,50	K28	35437,50	K48	61687,50
K9	10500,00	K29	36750,00	K49	63000,00
K10	11812,50	K30	38062,50	K50	64312,50
K11	13125,00	K31	39375,00	K51	65625,00
K12	14437,50	K32	40687,50	K52	66937,50
K13	15750,00	K33	42000,00	K53	132700,86
K14	17062,50	K34	43312,50	K54	193500,77
K15	18375,00	K35	44625,00	K55	197151,72
K16	19687,50	K36	45937,50	K56	250464,14
K17	21000,00	K37	47250,00	K57	255018,04
K18	22312,50	K38	48562,50	K58	259571,93
K19	23625,00	K39	49875,00	K59	241488,25
K20	24937,50	K40	51187,50	K60	280360,05

3.2 Modelagem da estrutura

O primeiro modelo computacional desenvolvido foi o modelo apresentado no memorial de cálculo da estrutura, chamado nesse trabalho de Modelo Convencional (ANSYS), o qual é apresentado na Figura 1. O modelo é composto pelos elementos Shell181 e Beam188, não considerando as molas lineares, e as estacas são parcialmente enterradas. A Figura 2 apresenta os resultados da implementação dos esforços de amarração (Fig. 2a) e atracação (Fig. 2b).

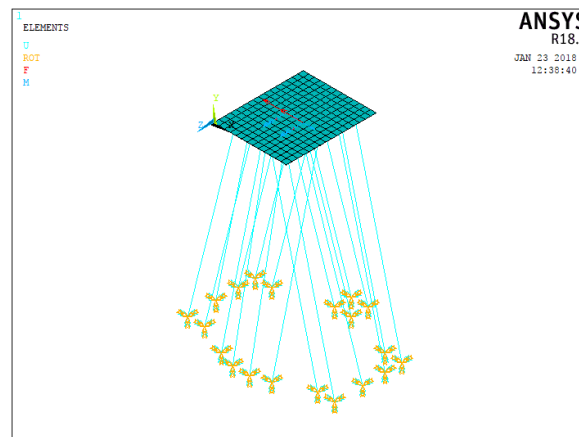


Figura 1 – Modelo Convencional (ANSYS) de cálculo do dolfim

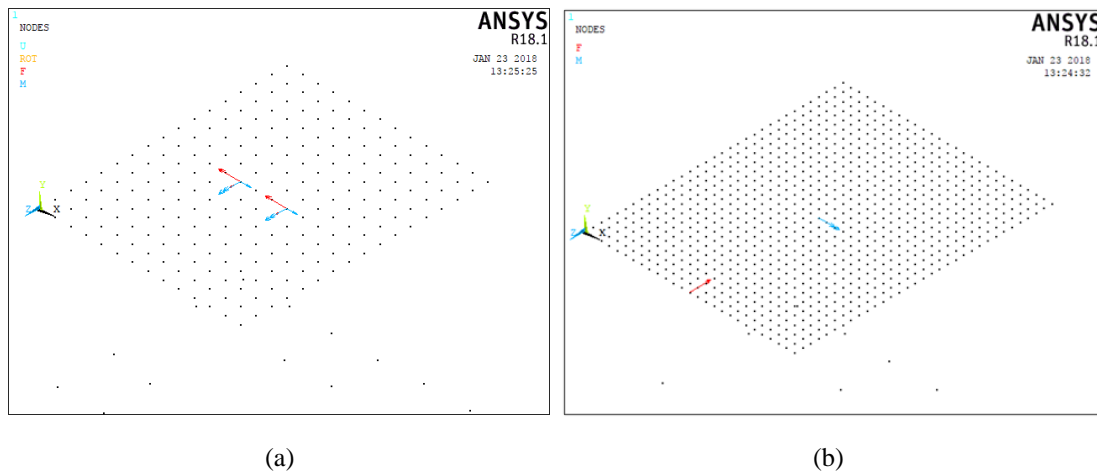


Figura 2: Esforços de amarração (a) e atração (b) aplicados ao Modelo Convencional (ANSYS)

O modelo que considerada a ISE com a introdução do elemento Combin14 para as molas é apresentado na Figura 3, esse modelo é chamado de Modelo ISE (ANSYS).

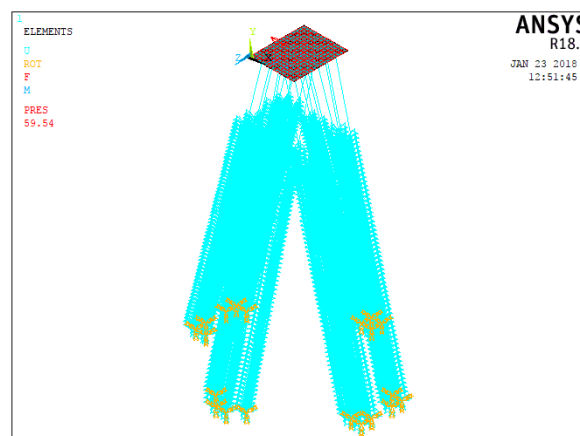


Figura 3: Modelo ISE (ANSYS) da estrutura do dolfin

3.3 Resultados para cenários diversos de carregamento

Nos resultados que se apresentam a seguir, são utilizadas as seguintes designações:

- Modelo Convencional (MC): resultados encontrados no memorial de cálculo das estruturas, obtidos com o software SAP2000.
- Modelo Convencional (ANSYS): resultados obtidos com o modelo da Figura 1 no software ANSYS.
- Modelo ISE (ANSYS): resultados obtidos com o modelo da Figura 3 no software ANSYS.

Primeiramente foram obtidos os resultados do Modelo ISE para as quatro combinações de carregamento do memorial de cálculo das estruturas, posteriormente foram obtidos resultados de outras combinações dos carregamentos a fim de realizar análises paramétricas do modelo em relação à influência do carregamento na ISE.

A Figura 4 apresenta a comparação dos resultados obtidos no Modelo Convencional (MC) e no Modelo ISE (ANSYS), para a COMB 1 (Fig. 4a) e COMB 2 (Fig. 4b).

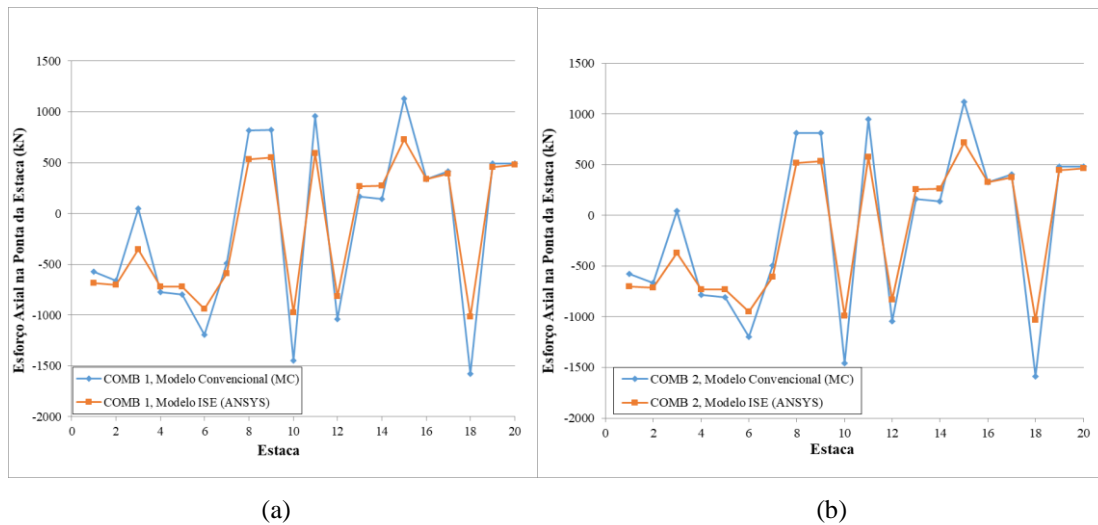


Figura 4: Comparação dos resultados das reações axiais entre Modelo Convencional (MC) e Modelo ISE (ANSYS) para as combinações COMB 1 (a) e COMB 2 (b)

Para a COMB 1, do total de estacas, em treze delas os esforços solicitantes diminuíram com a aplicação do Modelo ISE, em seis os esforços aumentaram e apenas na estaca 3 ocorreu inversão de esforços, de tração para compressão, porém o valor do seu carregamento permaneceu baixo. Percebe-se de maneira geral que na maioria das estacas o esforço axial foi reduzido com o Modelo ISE, de forma mais significativa nas estacas mais carregadas.

Para a COMB 2, a diferença de esforços entre os modelos foi próxima da encontrada na análise da COMB 1. A semelhança nos resultados obtidos para ambas as combinações se deve ao fato de que a sobrecarga acidental não apresenta um valor elevado, de forma que não ocorrem alterações significativa nas reações das estacas.

A Figura 5 apresenta a comparação dos resultados obtidos no Modelo Convencional (MC) e no Modelo ISE (ANSYS), para a COMB 3 (Fig. 5a) e COMB 4 (Fig. 5b). Em relação aos resultados obtidos na COMB 3, as estacas mais solicitadas tanto no Modelo Convencional (MC) como no Modelo ISE (ANSYS) permaneceram as mesmas, entretanto sofreram uma pequena redução nos seus esforços. As estacas com maior aumento em valor absoluto foram aquelas menos solicitadas. Na análise da COMB 4, as estacas com os maiores esforços axiais continuaram as mesmas da análise para a COMB 3, as quais sofreram uma redução na solicitação.

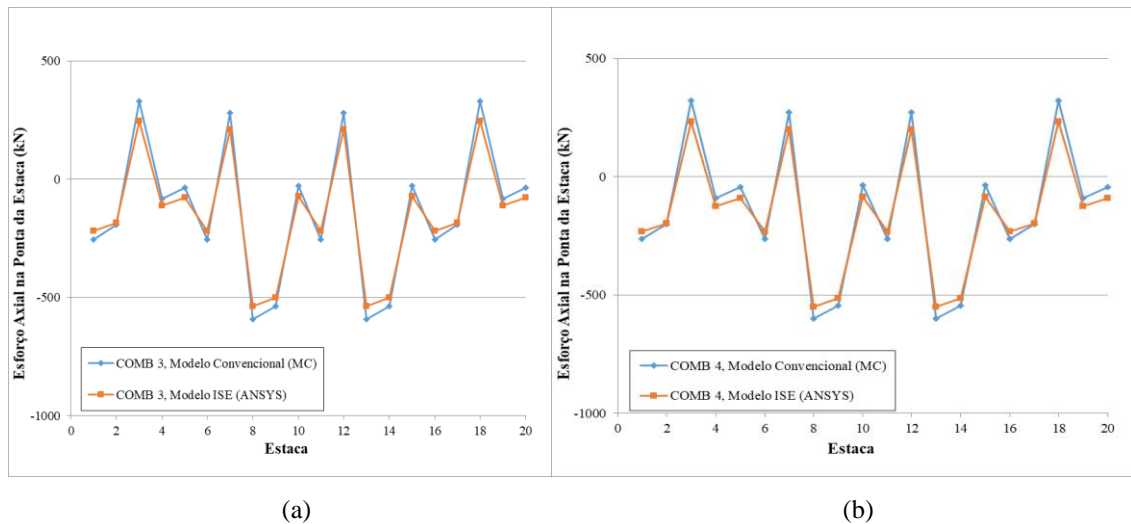


Figura 5: Comparação dos resultados das reações axiais entre Modelo Convencional (MC) e Modelo ISE (ANSYS) para as combinações COMB 3 (a) e COMB 4 (b)

A Figura 6 apresenta a comparação dos resultados obtidos no Modelo Convencional (ANSYS) e no Modelo ISE (ANSYS), para a COMB 5 (Fig. 6a) e COMB 6 (Fig. 6b). O objetivo dessa análise é avaliar a influência do carregamento vertical nos esforços axiais das estacas para os dois modelos computacionais.

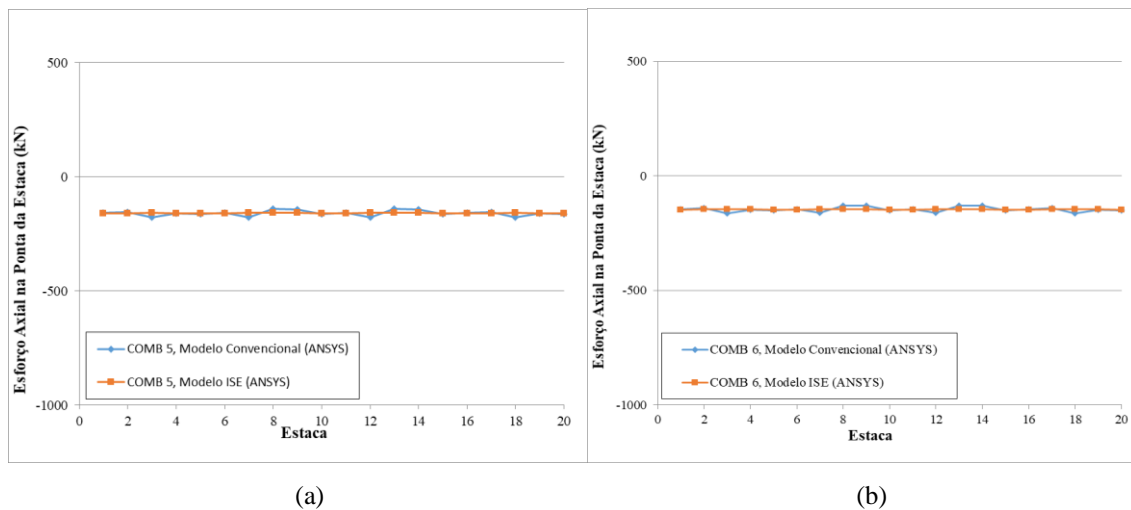


Figura 6: Comparação dos resultados das reações axiais entre Modelo Convencional (ANSYS) e Modelo ISE (ANSYS) para as combinações COMB 5 (a) e COMB 6 (b)

Com o Modelo ISE (ANSYS), os esforços axiais foram redistribuídos atingindo uma uniformização na reação das estacas. O maior esforço de compressão nas estacas para o Modelo ISE (ANSYS) foi de 161 kN, enquanto no Modelo Convencional (ANSYS) o maior valor é de 178 kN, o que representa uma redução de 10%. Os resultados obtidos na COMB 6, foram semelhantes aos resultados da COMB 5. No Modelo ISE (ANSYS) os esforços axiais nas estacas foram redistribuídos tendendo à uniformização de reações.

A Figura 7 apresenta a comparação dos resultados obtidos no Modelo Convencional (ANSYS) e no Modelo ISE (ANSYS), para as COMB 7 (Fig. 7a) e COMB 8 (Fig. 7b).

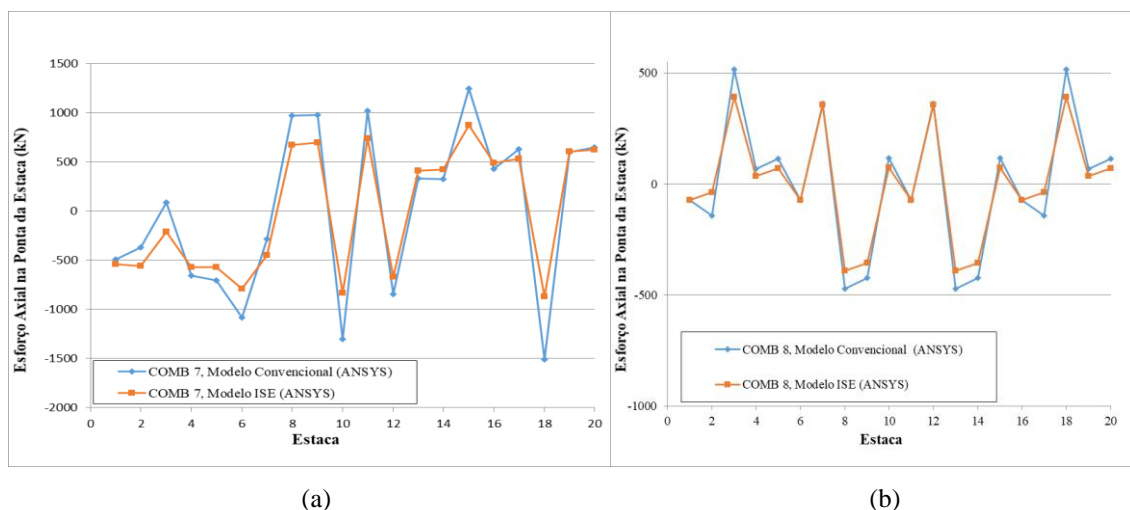


Figura 7: Comparação dos resultados das reações axiais entre Modelo Convencional (ANSYS) e Modelo ISE (ANSYS) para as combinações COMB 7 (a) e COMB 8 (b)

Para a COMB 7, de forma geral, com o Modelo ISE, sete estacas tiveram um aumento em seu esforço axial e doze apresentaram uma redução nos esforços. A única estaca que sofreu inversão de esforços foi a 3, porém esse valor trata-se do menor esforço de compressão obtido no Modelo ISE (ANSYS). Já para a COMB 8, percebe-se que no Modelo ISE (ANSYS) os esforços em todas as estacas diminuíram em relação aos resultados do Modelo Convencional (ANSYS), tanto para os esforços de tração como para os de compressão. Em geral a diferença foi mais significativa nas estacas com maior esforço axial.

4. Conclusões

Neste trabalho, foram observadas as reações axiais das estacas de um delfim de amarração e atracação, considerando um modelo convencional de projeto e um modelo com interação solo-estrutura (ISE). Foram analisados vários cenários de carregamento a fim de verificar a influência de cada um nos resultados do modelo que considera a ISE.

Os cenários de carregamento com maior variação nos esforços axiais das estacas, comparando o modelo convencional de projeto e o modelo que considera a ISE, são as COMB 1, COMB 2 e COMB 7.

Na COMB 1, em que são considerados os carregamentos de peso próprio e as forças atuantes nos cabeços de amarração do delfim, percebeu-se que na maioria das estacas o esforço axial foi reduzido com o modelo ISE, e que isso ocorreu de forma mais significativa nas estacas mais carregadas. Em relação ao esforço de compressão, a estaca 18 apresentou um valor igual a 1579 kN para o modelo convencional de projeto, e valor igual a 1017 kN para o modelo que considera a ISE, ou seja, uma redução de 562 kN ou 36% na sua solicitação. Já em relação ao esforço de tração na estaca mais solicitada, respectivamente a estaca 15, o valor passou de 1128 kN para 729 kN com redução de 399 kN ou 35%.

Na COMB 2, em que são considerados os carregamentos de peso próprio, amarração e sobrecarga acidental, os resultados obtidos foram semelhantes ao da COMB 1. Isso se deve ao fato da sobrecarga acidental não apresentar um valor elevado.

Na COMB 7, em que são considerados os carregamentos referentes as forças atuantes nos cabeços de amarração do delfim, também foram observadas reduções nas

solicitações das estacas. A estaca 15 apresentou esforço de tração igual a 1243 kN no modelo convencional de projeto, já no modelo ISE apresentou um valor de solicitação igual a 876 kN, que corresponde a uma redução de 367 kN ou 29%. A estaca 18 apresentou valor de compressão igual a 1508 kN no modelo convencional de projeto, já e no modelo ISE esse valor foi reduzido para 872 kN, com 636 kN ou 42% de variação.

As combinações de carregamento que apresentaram a menor variação nos esforços, em relação ao modelo convencional de projeto e o modelo que considera a ISE, foram as COMB 5 e COMB 6. As COMB 3, COMB 4 e COMB 8 apresentaram variações menores nos esforços axiais das estacas, quando comparado o modelo convencional de projeto com o modelo que considera a ISE.

Da análise global dos resultados observou-se que os esforços axiais nas estacas diminuíram quando considerada a ISE, sendo que para alguns tipos de carregamento essa variação foi mais significativa do que para outros. Dessa forma conclui-se que a metodologia convencional de projeto para o tipo de estrutura analisada continua sendo válida, pois fornece resultados conservativos, ou seja, estão a favor da segurança. Em contrapartida, a consideração da ISE resultou em solicitações menores nos elementos mais carregados da fundação, o que pode trazer vantagens econômicas ao projeto. A ISE é um fator de grande importância para estruturas do segmento industrial e offshore, dada a sua natureza não convencional. Importante destacar que, para considerar a ISE em um caso concreto é necessário obter valores confiáveis para os parâmetros do solo, já que esse tipo de análise é muito sensível em relação a esses parâmetros.

Referências

- AGUIAR, C.S.** *Interação solo-estrutura de fundações offshore do tipo estaca*. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil, Universidade federal do Rio de Janeiro, 2007.
- ALFREDINI, P. & ARASAKI, E.** *Engenharia Portuária*. 2ª Ed., Ed. Blucher, São Paulo, 2009.
- AOKI, N.** *Aspectos geotécnicos da interação estrutura – maciço de solos*. XVII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, São Carlos, Vol.1, pp. vii-xx, 1997.
- DAVISSON, M.T. & ROBINSON, K.E.** *Bending and buckling of partially embedded piles*. In: ICSMFE, 6., 1965, Montreal. Proceedings... Montreal, 1965. v.2, 1965
- GUSMÃO, A.D.** *Aspectos relevantes da interação solo-estrutura em edificações*. Solos e Rochas, vol. 17, no. 1, pp. 47–55, 1994.
- MARTHA, L.F.** *Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos*. 2ª Ed., GEN LTC, Rio de Janeiro, 2017.
- SANTANA, C.M.; GUIMARÃES, G.V.M.; JANNUZI, G.M.F. & DANZIGER, F.A.B.** *Provas de carga em estacas carregadas transversalmente no Dique Seco do Estaleiro Rio Grande*. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, 2014.
- SANTOS, M.J.A.P. & OLIVEIRA, L.O.S.B.** *P Abordagem prática na determinação dos coeficientes de reação horizontal do solo*. X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, CBPE, Rio de Janeiro, 2018.
- SANTOS, J.A.** *Fundações por estacas ações horizontais*. Instituto Superior Técnico. Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura. Mestrado em Engenharia Civil. Obras Geotécnicas, 2008.
- TERZAGHI, K.** *Evaluation of coefficients of subgrade reaction*. Géotechnique, Vol. 5, No. 4, pp. 297–326, 1955.
- TSINKER, G.P.** *Port Engineering – Planning, construction, maintenance and security*. Wiley, New Jersey, 2004.
- WEGMANN, M.D.** *Análise da interação solo-estrutura em dolphins de amarração e atracação*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, 2018.