



ANÁLISE PROBABILÍSTICA DAS REAÇÕES NAS ESTACAS DE UM CAIS DE CONTÊINERES

André Pereira Ramos

João Paulo Silva Lima

Mauro de Vasconcellos Real

andreros2209@gmail.com

joaop_1005@hotmail.com

mvrealgm@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande

Avenida Itália, km. 8, Campus Carreiros, 96201-900, Rio Grande, RS, Brasil

Resumo. Neste trabalho aplicou-se o método de simulações de Monte Carlo ao modelo estrutural de um cais de contêineres com o objetivo de verificar as distribuições de probabilidade das reações máximas da estrutura. Duas combinações de carregamentos externos atuantes foram apresentadas, ambas simulando condições reais de funcionamento do terminal portuário. Aos parâmetros de entrada das simulações – ações externas devidas ao peso próprio, sobrecarga, forças de amarração e equipamentos – foram atribuídas distribuições de probabilidade baseando-se na bibliografia ou em dados obtidos pelos autores. O modelo estrutural em elementos finitos e as simulações de Monte Carlo foram elaborados no software ANSYS®, em sua interface APDL Mechanical, enquanto que as análises estatísticas foram executadas com software Statistica®. Os resultados demonstram que, para as duas situações estudadas, assim como as ações externas mais significativas para os valores das reações, as forças e momentos de reações nas bases das estacas do cais considerado ajustam-se adequadamente a distribuições normais de probabilidade.

Palavras-chave: estruturas acostáveis, cais de contêineres, método de monte carlo, análise probabilística, método dos elementos finitos.

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução tecnológica dos meios de produção e o aumento da população mundial ocorrida especialmente no último século, a demanda por produtos dos mais variados gêneros aumentou consideravelmente, conduzindo à necessidade de uma cadeia logística que suportasse as novas demandas. Nesse contexto, fatores como o aprimoramento das técnicas de construção naval, permitindo navios cada vez maiores, o avanço da tecnologia empregada nos equipamentos e a containerização fizeram com que os complexos portuários se tornassem fundamentais nas cadeias de suprimentos hoje existentes.

O Brasil, país com extensa faixa litorânea voltada ao Oceano Atlântico, possui atualmente quase a totalidade do seu comércio exterior e uma parte considerável do seu comércio interno dependentes do transporte aquaviário. Dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2015) informam que as cinco mercadorias mais movimentadas nos portos brasileiros – minério de ferro, combustíveis, contêineres, soja e bauxita – responderam, em 2014, por 76% de toda a movimentação de carga no Brasil.

Os sistemas estruturais em geral possuem importância fundamental para o funcionamento das instalações das quais fazem parte, uma vez que são as responsáveis pela estabilidade das construções. As estruturas portuárias, além disso, possuem uma parcela adicional de importância, pois do seu adequado funcionamento dependem cadeias inteiras de suprimentos cujas interrupções acarretariam em inúmeros prejuízos à sociedade.

Destacam-se no âmbito deste trabalho as obras portuárias acostáveis, estruturas destinadas à atracação e amarração de embarcações, que permitem a realização de operações de carga e descarga das mesmas. Quanto à sua natureza estrutural, tais estruturas podem ser classificadas em contínuas (cais e píers) ou discretas (dólfins). As estruturas contínuas são ainda classificadas em estruturas de paramento aberto ou fechado (Mason, 1981).

Do ponto de vista estrutural, cada função para as quais são projetadas as estruturas acostáveis acarreta em diferentes peculiaridades nas mesmas. A estrutura analisada neste trabalho, pertencente ao TECON – Terminal de Contêineres do Porto Organizado do Rio Grande, devido à natureza da carga que movimenta, apresenta como principal peculiaridade as ações provenientes dos seus equipamentos, específicos para o transporte de cargas containerizadas.

O cais em questão localiza-se na entrada do canal de acesso da Barra do Rio Grande, na entrada da Lagoa dos Patos, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Trata-se de uma estrutura de 900 m de comprimento cujo arranjo estrutural é subdividido em módulos de 50 m cada.

De acordo com Nowak e Collins (2000), incertezas são inerentes a todas as etapas dos projetos de engenharia, e suas causas podem ser classificadas em naturais e humanas. As causas naturais decorrem da imprevisibilidade das ações como os ventos, correntes, ondas e sobrecargas, enquanto que as causas humanas referem-se a afastamentos intencionais ou não do projeto tido como ideal. Na fase de projeto, essas incertezas são devidas a aproximações, erros de cálculo e de comunicação; enquanto que na fase de execução das obras são devidas ao uso inadequado de materiais, métodos de construção, mudanças em relação ao que foi projetado; e na fase de operação e uso, essas incertezas ocorrem quando da ação de sobrecargas, da manutenção e uso inadequados, entre outros.

Por conta dessas incertezas, os carregamentos, os parâmetros de materiais e geométricos e as capacidades resistentes das estruturas são, na verdade, variáveis aleatórias. Com isso,

procurou-se neste trabalho apresentar um estudo de caso com o objetivo de se verificar a variabilidade das reações nas estacas de fundação de um cais de contêineres.

2 METODOLOGIA

2.1 Variáveis aleatórias

Variáveis aleatórias são artificios matemáticos utilizados para a representação analítica de certos eventos, e seus valores podem ser definidos dentro de uma faixa de valores possíveis (Ang & Tang, 2007).

Sendo X uma variável aleatória, e x os seus possíveis valores, a distribuição de probabilidades de X pode ser descrita pela sua função distribuição de probabilidade acumulada (CDF) F_X , sendo que

$$F_X \equiv P(X \leq x) \quad (1)$$

Para variáveis aleatórias contínuas, probabilidades de ocorrência são associadas não a valores, mas a intervalos de x , fazendo com que a probabilidade de ocorrência em um ponto exato onde $X = x$ seja nula. Com isso, as distribuições de probabilidade de variáveis contínuas são dadas pelas chamadas funções densidade de probabilidade (PDF), descritas como $f_X(x)$, de tal forma que a probabilidade de ocorrência de um dado valor de X no intervalo (a, b) seja dada por

$$P(a < X \leq b) = \int_a^b f_X(x) dx \quad (2)$$

As propriedades estatísticas de uma variável aleatória são completamente descritas se a forma de suas distribuições e seus parâmetros forem conhecidos (Ang & Tang, 2007). Nesse sentido, alguns parâmetros são muito úteis para o entendimento do comportamento dessas variáveis, sendo esses os valores centrais e as medidas de dispersão.

Os valores centrais representam parâmetros de grande interesse no estudo de fenômenos aleatórios, uma vez que representam os valores médios, ou esperados, dessas variáveis. Sendo X uma variável aleatória contínua, com função densidade de probabilidade $f_X(x)$, o seu valor médio $E(X)$ é dado por

$$E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_X(x) dx \quad (3)$$

Outras medidas centrais de variáveis aleatórias também muito utilizadas são a moda e a mediana.

As medidas de dispersão, por sua vez, referem-se ao quanto se afastam dos valores centrais os possíveis valores que as variáveis aleatórias podem assumir. Sendo esses afastamentos em torno do valor médio, uma medida de dispersão bastante utilizada é a variância $Var(X)$.

Sendo $\mu(X) = E(X)$, para uma variável aleatória X

$$Var(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_X)^2 f_X(x) dx \quad (4)$$

Ou, desenvolvendo a expressão 4,

$$Var(X) = E(X^2) - \mu_X^2 \quad (5)$$

Outra medida de dispersão bastante utilizada é o desvio-padrão, dado por

$$\sigma_X = \sqrt{Var(X)} \quad (6)$$

A variância e o desvio-padrão, apesar de extremamente úteis, podem sozinhos não dar uma ideia do quão dispersos das medidas centrais estão os valores possivelmente assumidos por X . Assim, também é muito útil o parâmetro chamado de coeficiente de variação, que relaciona a dispersão dos valores com o valor central da distribuição.

O coeficiente de variação de uma variável aleatória X é dado por

$$\delta_X = \frac{\sigma_X}{\mu_X} \quad (7)$$

2.2 Distribuições de probabilidade

Existem diversas distribuições de probabilidade, que se ajustam aos mais variados comportamentos dos fenômenos aleatórios. No âmbito deste trabalho, merecem destaque as distribuições Normal ou Gaussiana e a de Weibull.

A distribuição de probabilidades mais conhecida e utilizada é a distribuição Normal ou Gaussiana, cuja função densidade de probabilidade é dada por

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (8)$$

onde μ e σ são, respectivamente, a média e o desvio-padrão da variável aleatória X .

A distribuição de Weibull, que também é amplamente utilizada no âmbito da engenharia, possui sua função densidade de probabilidade dada pela expressão

$$f_X(x) = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k\right] \quad (9)$$

A função distribuição de probabilidade acumulada correspondente é dada por

$$F_X(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k\right] \quad (10)$$

onde k e λ são os parâmetros de forma e escala, respectivamente, que governam a distribuição.

2.3 Análise estrutural e modelagem computacional

De acordo com Martha (2010), a análise estrutural é a etapa de um projeto de engenharia na qual é realizada a previsão do comportamento da estrutura quando atuam os seus carregamentos.

O Terminal de Contêineres do Porto do Rio Grande possui uma estrutura de acostagem de 900 m de comprimento, sendo essa subdividida em módulos de 50 m de comprimento e 20 m de largura. A estrutura consiste em um cais de paramento aberto com elementos em concreto armado e protendido de classe C50. A estrutura possui uma laje com espessura de 0,20 m disposta sobre vigas longitudinais e transversais de seções diversas, que apoiam-se em 60 estacas de concreto armado circulares vazadas de diâmetros externos de 0,80 m e internos de 0,50 m, sendo 24 estacas inclinadas.

A construção do modelo computacional foi feita através do software ANSYS®, v. 16, que utiliza o método dos elementos finitos para a resolução de problemas estruturais, entre outros. O programa possui dois modos básicos de apresentação: o ANSYS® APDL *Mechanical*, interface clássica que contém todas as funcionalidades do produto, e o ANSYS® *Workbench*, que possui interface mais moderna e com forte apelo gráfico, se tratando de uma evolução da interface clássica. O ANSYS® APDL *Mechanical* foi a interface utilizada neste trabalho.

Segundo Kim & Sankar (2011), uma das vantagens do ANSYS® é a capacidade de programação pelo usuário uma vez que o software possui milhares de comandos relacionados à criação de geometria, malha, condições de contorno, entre muitos outros aspectos. Tal característica é de fundamental importância para os objetivos deste trabalho, dada a necessidade de se buscar, a cada loop das simulações de Monte Carlo, os máximos valores das reações nas estacas da estrutura.

Um passo importante em uma análise em elementos finitos é a escolha do tipo de elemento a ser utilizado, que deve ter capacidade de simular adequadamente a estrutura considerada. Para modelagem da estrutura foi utilizado o elemento *Beam 189*, apropriado para a análise de vigas delgadas à moderadamente espessas. O elemento é baseado na teoria de vigas de Timoshenko, sendo considerados os efeitos de deformações por cisalhamento. Os elementos desse tipo utilizam na sua formulação funções de interpolação quadráticas, sendo adequados para aplicações em análises lineares e não-lineares com grandes deformações e/ou rotações. A Figura 1 apresenta o modelo teórico do elemento utilizado.

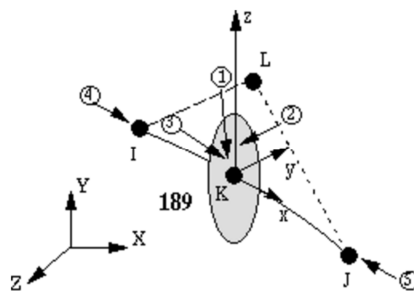


Figura 1. Elemento tipo Beam189 (ANSYS, 2016).

A estrutura foi modelada apenas com elementos lineares, com a rigidez da laje existente tendo sido transferida, para efeitos de inserção no software, às vigas longitudinais e transversais. As estacas foram consideradas engastadas na base. O modelo computacional gerado é apresentado nas Figuras 2 e 3.

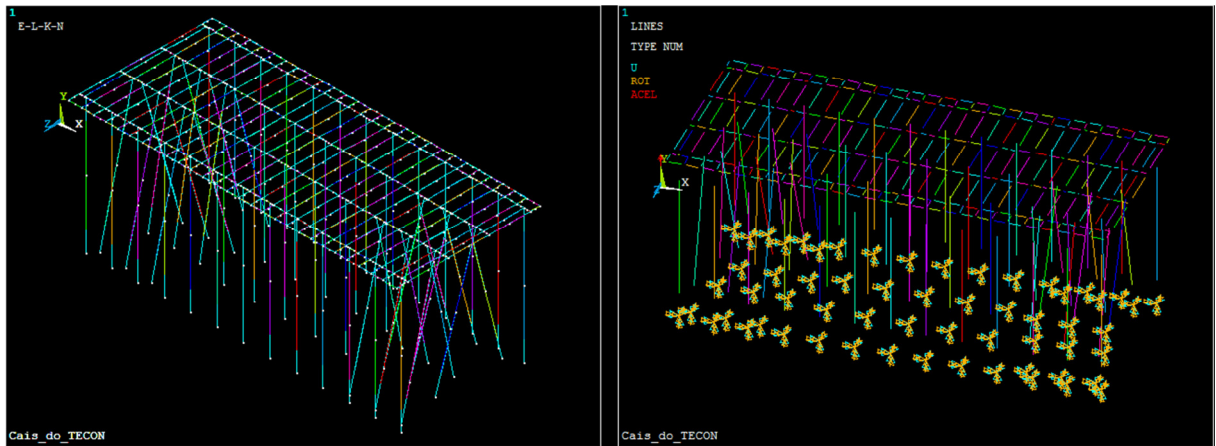


Figura 2. Vistas tridimensionais do modelo gerado para análise estrutural de um cais de contêineres.

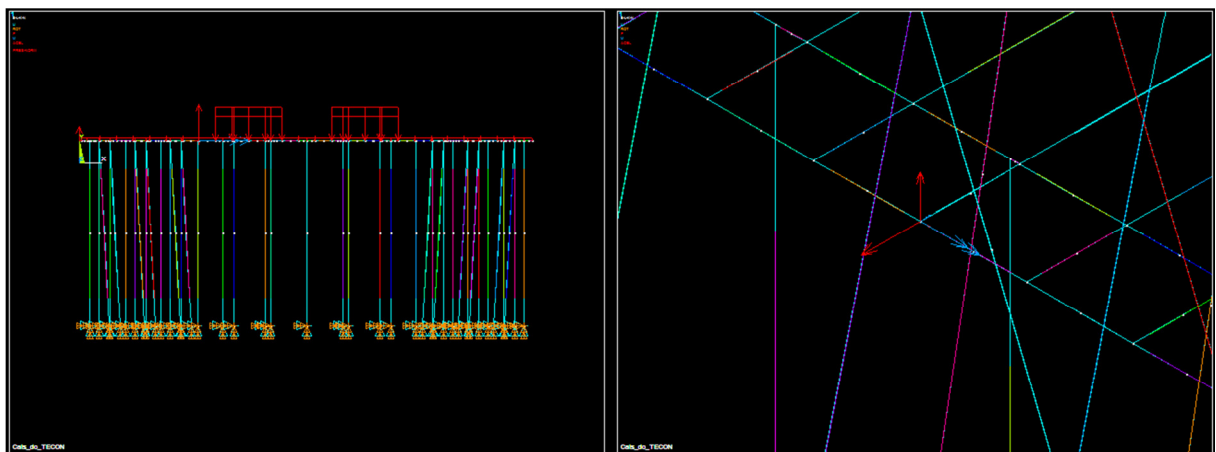


Figura 3. Vista frontal e detalhe mostrando as forças aplicadas na estrutura, para a combinação 1.

2.4 Ações em um cais de contêineres e suas variabilidades

Thoresen (2014) divide as ações que agem sobre as estruturas portuárias de acostagem em três categorias: ações provenientes do lado marítimo, oriundas principalmente da atracação e amarração das embarcações; ações na estrutura propriamente dita, provenientes do peso próprio, sobrecargas e ações de equipamentos; e ações provenientes do lado terrestre, que se referem aos aterros dispostos na retaguarda das estruturas.

Uma etapa importante na execução deste trabalho é a estimativa das variabilidades de cada ação atuante na estrutura. Para ações como peso próprio, encontra-se facilmente na bibliografia pertinente medidas para a sua variabilidade. Já para ações como as de amarração ou de equipamentos sobre uma estrutura acostável esse processo torna-se mais complexo. Procurou-se portanto estimar as variabilidades dessas ações a partir da consideração das variabilidades dos seus principais fatores, conforme exposto abaixo.

Peso próprio da estrutura. Segundo a NBR 6118:2014, pode-se adotar para a massa específica do concreto armado 25 kN/m^3 . De acordo com o *Joint Committee on Structural Safety* (JCSS, 2001), as cargas de peso próprio podem ser assumidas como possuindo distribuição normal de probabilidade. Nowak & Collins (2000) atribuem valores entre 0,08 e 0,10 para coeficientes de variação para o peso de materiais em geral, sendo esse último o valor adotado.

Peso Próprio da Camada de Pavimentação. O cais analisado neste trabalho possui sobre a laje uma camada de pavimentação em blocos intertravados de concreto sobre base em areia, possuindo uma carga distribuída média de $9,2 \text{ kN/m}^2$. Também se adotou coeficiente de variação igual a 0,10 para o peso próprio da camada de pavimentação.

Sobrecarga Acidental. De acordo com Thoresen (2014), contêineres de 20 pés em pilhas de até duas unidades produzem sobrecargas distribuídas na faixa de $25\text{-}35 \text{ kN/m}^2$, dependendo dos produtos contidos no interior dos mesmos. O autor indica que para estruturas sobre as quais ocorra tráfego de contêineres devem ser atribuídas sobrecargas mínimas de 40 kN/m^2 . Esse foi o valor adotado para a sobrecarga média na estrutura, com um coeficiente de variação de 0,2.

Amarração. As forças de amarração são transmitidas às estruturas acostáveis pelos cabos de amarração, sendo provenientes principalmente da ação de ventos, correntes e ondas agindo no corpo das embarcações. Foram consideradas neste trabalho somente as ações de ventos e correntes.

Principal documento na área de projetos de estruturas portuárias, a norma britânica BS-6349-I apresenta as seguintes expressões para o cálculo de forças ambientais em embarcações.

Para forças devidas ao vento:

$$F_{TW} = C_{TW} \rho_A A_L V_W^2 \times 10^{-4} \quad (11)$$

$$F_{LW} = C_{LW} \rho_A A_L V_W^2 \times 10^{-4} \quad (12)$$

onde:

F_{TW} e F_{LW} são as forças transversais e longitudinais devidas ao vento, respectivamente (kN);

C_{TW} e C_{LW} são os coeficientes de força de vento transversais e longitudinais, respectivamente;

ρ_A é a densidade do ar (kg/m^3);

A_L é a área de projeção longitudinal da embarcação, acima da linha d'água (m^2);

V_W é a velocidade do vento a uma altura de 10 m acima da linha d'água (m/s).

Para forças devidas à corrente marítima:

$$F_{TC} = C_{TC} C_{CT} \rho L_{BP} d_m V_C'^2 \times 10^{-4} \quad (13)$$

$$F_{LC} = C_{LC} C_{CL} \rho L_{BP} d_m V_C'^2 \times 10^{-4} \quad (14)$$

onde:

F_{TC} e F_{LC} são as forças transversais e longitudinais devidas às correntes marítimas, respectivamente (kN);

C_{TC} e C_{LC} são os coeficientes de arrasto, transversais e longitudinais, respectivamente;

C_{CT} e C_{CL} são os coeficientes de correção devido à profundidade, para forças transversais e longitudinais, respectivamente;

ρ é a densidade da água (kg/m^3);

L_{BP} é a distância entre perpendiculares da embarcação (m);

d_m é o calado médio (m);

V_C' é a velocidade da corrente na direção considerada, na profundidade média da embarcação (m/s).

A referida norma apresenta valores para todos os coeficientes necessários ao cálculo desses esforços, sendo esses variáveis em função do tipo de embarcação e do ângulo que os forçantes ambientais fazem com o corpo dos navios. Os parâmetros da embarcação foram fixados baseando-se no navio porta-contêiner *Hanjin Seattle*, que possui comprimento total de 335 m e porte bruto de 102.529 t.

Conforme recomendações da BS-6349-IV, os carregamentos em cada ponto de fixação da embarcação podem ser calculados simplificando-se o sistema de amarração através da consideração de que as forças longitudinais são resistidas pelos chamados *springs*, cabos fixados nos costados das embarcações e com pequenas angulações em relação à linha de cais, e de que as forças perpendiculares são resistidas por cabos transversais localizados na popa e na proa dos navios. Tsinker (1997) propõe que no mínimo oito cabeços devem trabalhar simultaneamente quando da amarração de navios com comprimento maior que 300 m. Tendo em vista a dimensão do navio escolhido para as análises, foi considerado que dois cabeços suportarão as cargas transversais devidas ao vento (um na popa e outra na proa, localizados portanto em módulos estruturais independentes) e 6 cabeços trabalharão para suportar as cargas longitudinais de ventos e correntes, dos quais 3 efetivos para esforços longitudinais no sentido popa-proa e 3 no sentido proa-popa.

Fixando-se então as propriedades geométricas da embarcação considerada, as variáveis aleatórias consideradas nos esforços de amarração foram as velocidades dos ventos e correntes.

Olinto, Pinto e Halal (2002) apresentam distribuições para velocidades médias do vento na cidade de Rio Grande/RS, baseadas em dados observados em estação meteorológica localizada nas proximidades do terminal de contêineres em estudo. Os autores utilizaram a distribuição de Weibull para descrever as velocidades de ventos no local, com parâmetros de escala de 7,56 m/s e de forma igual a 2,7. Tais parâmetros foram os adotados neste trabalho para representar a variabilidade das velocidades de vento agindo no corpo da embarcação considerada. Ressalta-se que a distribuição adotada não se aplica a situações de ventos extremos, porém a mesma é adequada para situações de operação dos equipamentos.

Para as velocidades de correntes marítimas agindo na embarcação considerada adotou-se distribuição normal, com valor médio de 1,0 m/s e coeficiente de variação igual a 0,2.

Equipamentos. Os equipamentos utilizados em terminais de contêineres são em boa parte específicos para esse tipo de terminal. Foram considerados neste trabalho os dois principais tipos de equipamentos atuantes em estruturas desse tipo, os portêineres e os guindastes móveis portuários. Os mesmos são apresentados na Figura 4.



Figura 4. Principais equipamentos utilizados em terminais de contêineres – Portêineres e Guindastes Móveis Portuários (Fonte: Liebherr, 2016).

Os portêineres são guindastes de grande porte responsáveis pelas operações de carga e descarga de contêineres. São estruturas montadas sobre trilhos, podendo movimentar-se no sentido longitudinal dos terminais portuários. Esses equipamentos possuem um arranjo estrutural que permite o acesso de tratores de pátio e caminhões sob a sua lança de movimentação, permitindo o carregamento e descarregamento de contêineres diretamente nos seus veículos de transporte. Para o cálculo das ações dos portêineres, foi fixada a situação de contêineres suspensos no extremo da lança. Tal condição, dado o considerável momento gerado pelo posicionamento da carga, faz com que as ações no trilho mais próximo ao mar possuam valores maiores do que aquelas no trilho mais próximo à retaguarda do cais. Tal consideração de análise também é recomendada pela norma britânica BS-6349-I. Para determinação dos parâmetros geométricos do equipamento, adotou-se o portêiner post-panamax constante no catálogo da Empresa Liebherr (Liebherr, 2016). Adotou-se um peso próprio do equipamento de 12.400 kN.

Os guindastes móveis portuários são equipamentos alternativos aos portêineres, possuindo menor porte e maior versatilidade. São dotados de pneus que permitem sua livre locomoção, sendo também amplamente utilizados em terminais destinados à movimentação de diversos tipos de carga. Na verificação das ações impostas à estrutura pelos guindaste móveis portuários, foi considerada situação de içamento a 45°, que apresenta valores mais elevados em uma das patolas de apoio. Para determinação dos parâmetros geométricos do equipamento, adotou-se o modelo 6 do catálogo da Empresa Terex (Terex, 2010), que possui peso próprio de 4200 kN. As ações estruturais desses equipamentos são em grande parte dependentes do peso do contêiner movimentado e do raio de atuação da lança de cada guindaste. Com isso, fixou-se o posicionamento dos equipamentos em relação à estrutura em

cada combinação, adotando-se o raio máximo de atuação em função do peso de cada contêiner.

A variável aleatória considerada para as ações dos equipamentos foi somente o peso dos contêineres. Para obtenção da distribuição estatística dos pesos dos contêineres movimentados no TECON Rio Grande, foram analisados dados referentes à toda movimentação ocorrida no terminal no ano de 2015. Tais dados foram adquiridos no portal eletrônico da ANTAQ, que disponibiliza para acesso público dados detalhados referentes à movimentação de cargas nos portos brasileiros ocorrida a partir de 2011. Os dados foram ajustados à distribuição de Weibull, com parâmetros de escala de 26,83 ton e de forma 6,77.

A Tabela 1 apresenta o resumo dos parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias de entrada consideradas neste trabalho. Na Figura 5 são apresentadas as funções densidade de probabilidade (PDF) dessas variáveis.

Tabela 1. Variáveis aleatórias consideradas.

Ação Estrutural	Distribuição de Probabilidade	Parâmetro 1		Parâmetro 2	
		Valor	Tipo	Valor	Tipo
Peso Próprio Estrutura	Normal	25 kN/m ³	Valor Médio	2,5 kN/m ²	Desvio-Padrão
Peso Próprio Pavimentação	Normal	9,2 kN/m ²	Valor Médio	0,92 kN/m ²	Desvio-Padrão
Sobrecarga Acidental	Normal	40 kN/m ²	Valor Médio	8,0 kN/m ²	Desvio-Padrão
Amarração V_{vento}	Weibull	7,56 m/s	Fator de escala	2,7	Fator de forma
Amarração V_{corrente}	Normal	1,0 m/s	Valor Médio	0,2 m/s	Desvio-Padrão
Equipamentos $P_{\text{contêiner}}$	Weibull	26,83 ton	Fator de escala	6,77	Fator de forma

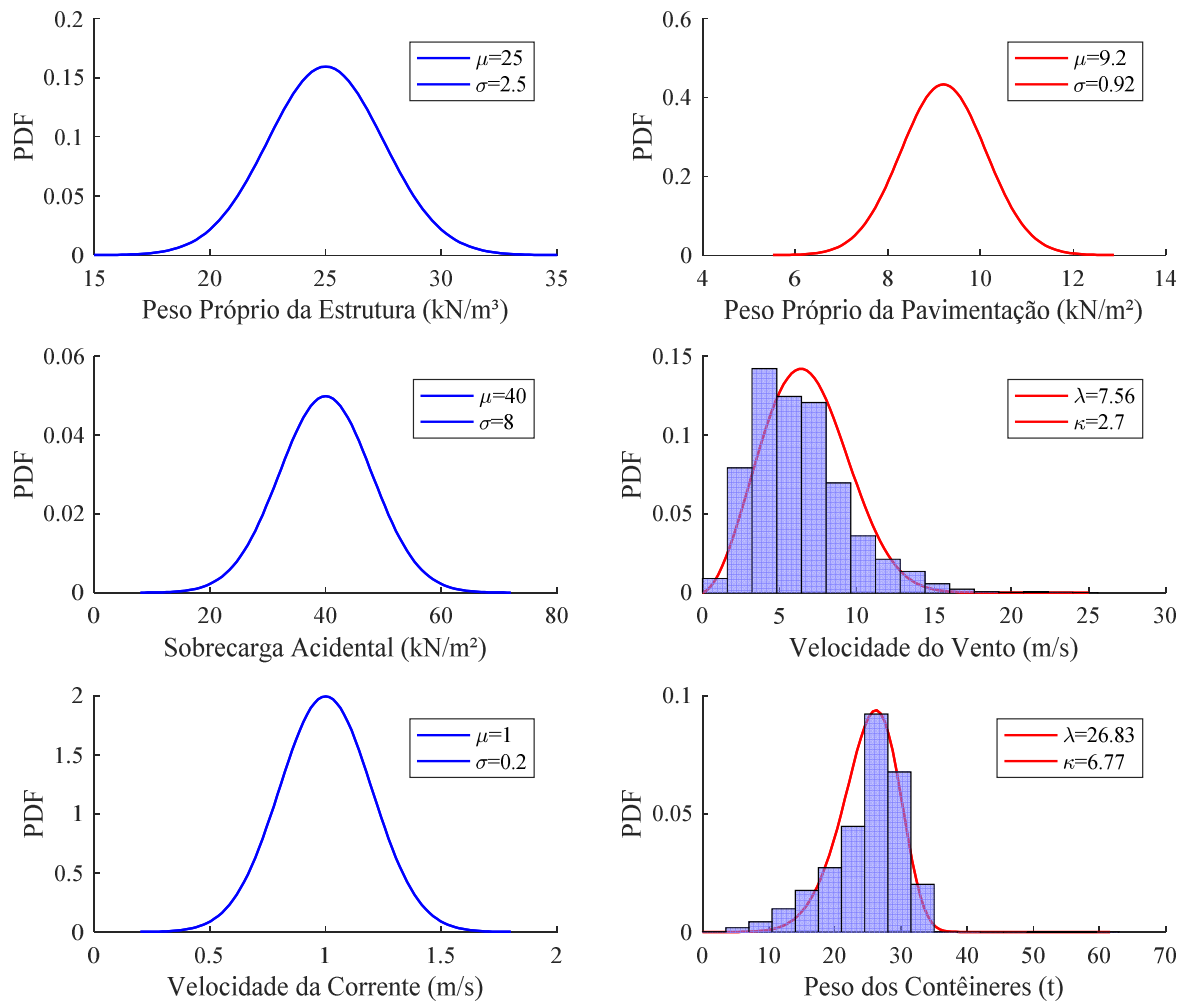


Figura 5. Funções Densidade de Probabilidade (PDF) e parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias consideradas.

2.5 Combinações de esforços

Dois cenários de combinações de esforços foram considerados no presente trabalho, sendo ambos apresentados na Figura 6. Os módulos estruturais circulados são aqueles analisados em cada combinação.

Na combinação 1, além do peso próprio total da estrutura e da sobrecarga acidental, foram consideradas forças de vento transversais, afastando a embarcação do cais, forças de corrente longitudinais e um portêiner atuando no centro do módulo considerado.

Na combinação 2, além do peso próprio total da estrutura e da sobrecarga acidental, foram considerados vento e corrente longitudinais e um guindaste móvel portuário atuando em um dos cantos do módulo considerado.

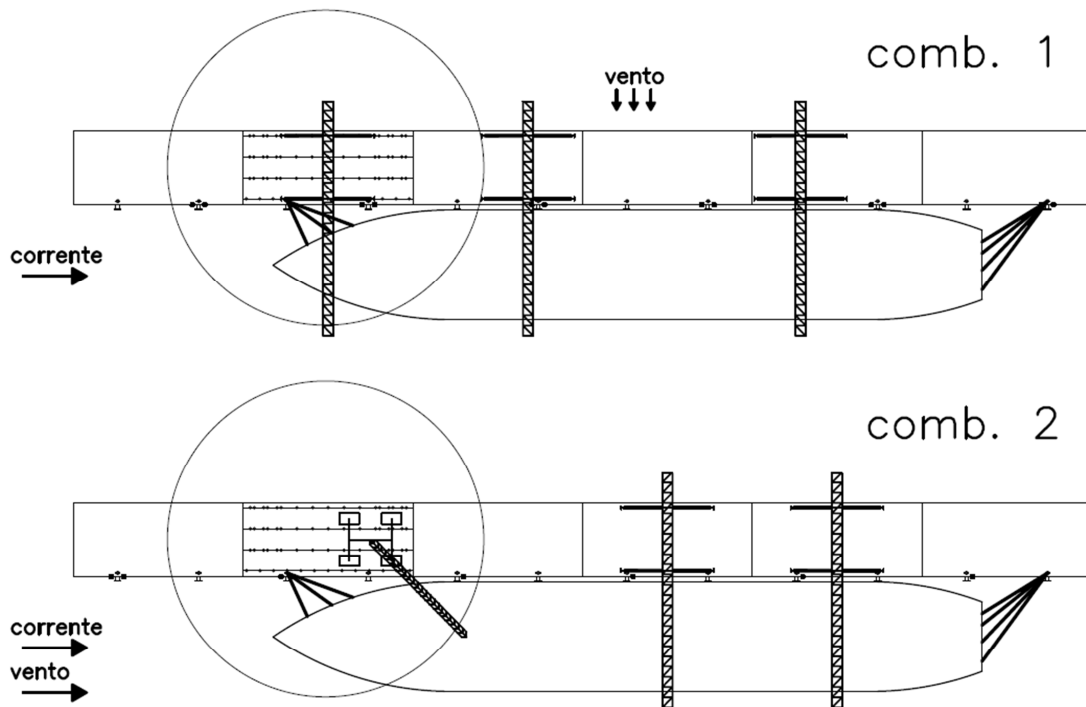


Figura 6. Combinações de esforços analisadas.

2.6 O Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo consiste em se estimar a distribuição de probabilidades das respostas geradas por um modelo numérico alimentado por variáveis aleatórias com distribuições de probabilidade pré-determinadas. São feitas n simulações no modelo, sendo que em cada uma delas os parâmetros de entrada recebem valores diferentes, obedecendo as suas respectivas distribuições de probabilidade. Tais valores de entrada, variáveis a cada simulação, produzem diferentes valores de saída que, agrupados, formarão o universo estatístico das respostas do modelo.

Em análises probabilísticas de estruturas, o modelo numérico objeto das simulações geralmente é elaborado em elementos finitos, sendo que os dados de entrada consistem nos parâmetros dos materiais e geométricos dos elementos e nas ações externas atuantes, e os parâmetros de saída os valores de reações, deslocamentos, esforços internos, entre outros.

É essencial a obtenção de saídas para os múltiplos possíveis valores que os parâmetros de entrada podem assumir, devendo o processo de amostragem ser distribuído de maneira satisfatória. Além disso, é importante também que não haja coincidência de valores amostrais. Dessa forma, os dois principais critérios de um processo de amostragem são o adequado preenchimento do espaço amostral e a ausência de colapsos entre os valores amostrados (Janssen, 2013).

Há diversos processos de amostragem empregados pelo método de Monte Carlo. Dois processos largamente utilizados são as amostragens direta e por hipercubo latino. Na amostragem direta ou simples os números são gerados de forma estritamente aleatória, independentes entre si. Essa forma de amostragem demanda um alto custo computacional em sua implementação. Já na amostragem por hipercubo latino o espaço amostral de cada parâmetro de entrada é dividido em faixas que são amostradas uma única vez, fazendo com

que os espaços amostrais das entradas sejam inteira e uniformemente cobertos pelo processo de amostragem. Trata-se de uma técnica mais avançada, que pode otimizar os processos de análises probabilísticas. O pacote *Probabilistic Design* do software ANSYS®, utilizado neste trabalho, possibilita a utilização de ambas as formas de amostragem, sendo que utilizou-se a amostragem por hipercubo latino.

Tendo em vista a possibilidade de programação do software através da linguagem ANSYS® *Parametric Design Language* (APDL), que torna possível a implementação de loops condicionais e operações escalares e vetoriais de busca, puderam ser obtidos, a cada simulação n_i , os valores máximos de cada reação $F_{x,y,z}$ e $M_{x,y,x}$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Convergência das simulações de Monte Carlo

A definição do número de simulações é um passo importante de uma análise probabilística. O mesmo deve ser definido como o valor para o qual os parâmetros estatísticos das variáveis de saída apresentam pouca ou nula variabilidade em função do número de simulações executadas. A Tabela 2 apresenta os resultados do teste de convergência das saídas da reação F_y máxima para a combinação 1, sendo analisados os seus valores médios e os desvios-padrão para diversos valores do número de simulações n . Nota-se que para n igual a 25.000, tanto a média quanto o desvio-padrão da reação não mais variam em função do valor de n . Portanto, esse foi o número de simulações adotado para análise das duas combinações de esforços.

Tabela 2. Convergência das simulações de Monte Carlo para as reações F_y máximas da combinação 1.

N	F_y (kN)	Diferença (%)	σ (kN)	Diferença (%)
1000	2386,6	-	258,6	-
2500	2386,6	0%	263,9	2%
5000	2386,6	0%	260,9	-1%
10000	2386,6	0%	262,1	0%
25000	2386,6	0%	262,2	0%

3.2 Parâmetros estatísticos das reações estruturais

O resultado das simulações de Monte Carlo executadas no modelo estrutural é apresentado na Tabela 3 e na Figura 7. Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros estatísticos das seis reações $F_{x,y,z}$ e $M_{x,y,z}$ obtidas para as duas combinações de esforços analisadas. São apresentados os valores médios, desvios-padrão e coeficientes de variação das reações máximas obtidas a cada simulação. As funções densidade de probabilidade das reações estruturais máximas são apresentadas na Figura 7, sendo os resultados da combinação 1 em azul e da combinação 2 em vermelho.

Tabela 3. Parâmetros probabilísticos das reações nas estacas para as duas combinações analisadas.

Combinação	Reação Máxima a cada n_i	Ajuste Função de Probabilidade	Média μ F (kN) M (kNm)	Desvio-Padrão σ F (kN) M (kNm)	Coefficiente de Variação δ	K-S d
1	F_x	Normal	-169,68	18,20	10,73%	0,003
	F_y	Normal	2386,60	262,23	10,99%	0,002
	F_z	Normal	-474,75	32,55	6,86%	0,003
	M_x	Normal	76,72	7,47	9,74%	0,004
	M_y	Normal	-10,66	1,14	10,69%	0,005
	M_z	Normal	42,90	3,66	8,53%	0,004
2	F_x	Normal	-75,36	8,22	10,91%	0,002
	F_y	Normal	1585,38	112,82	7,12%	0,003
	F_z	Normal	-343,73	37,11	10,80%	0,003
	M_x	Normal	20,4	2,10	10,29%	0,004
	M_y	Normal	-10,78	1,22	11,32%	0,008
	M_z	Normal	29,55	3,38	11,44%	0,006

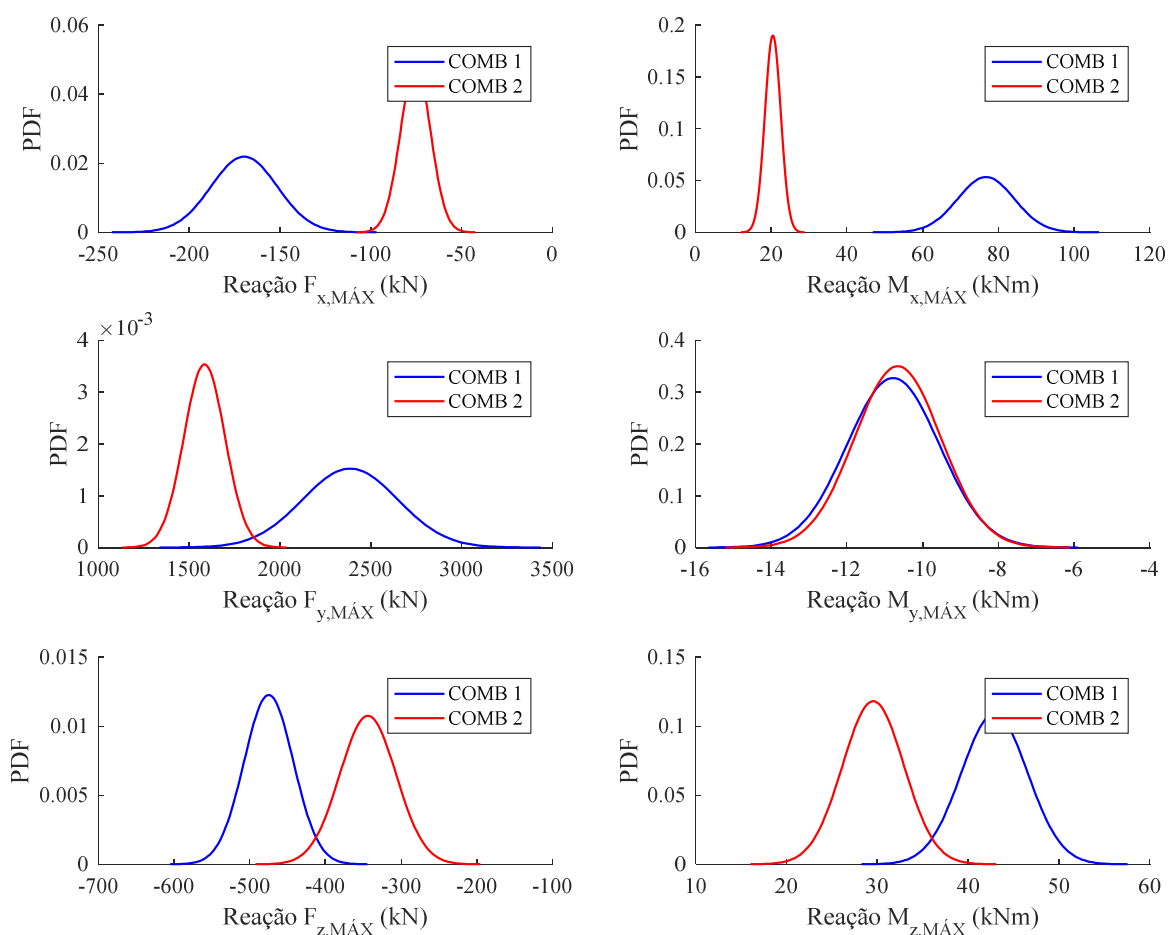


Figura 7. Parâmetros estatísticos das reações nas estacas do cais analisado.

Do ponto de vista das ações externas atuantes, as diferenças entre as duas combinações de esforços consideradas são o tipo e a posição dos equipamentos e a área da embarcação exposta à ação dos ventos.

A combinação 1 apresenta carregamentos mais severos, dados o elevado peso próprio do equipamento considerado (portêiner), o elevado raio de atuação desses equipamentos quando movimentando os contêineres e a grande área de exposição ao vento, já que nessa combinação o vento foi considerado agindo no sentido transversal da embarcação.

A combinação 2, por outro lado, apresenta um equipamento mais leve (guindaste móvel portuário), com um menor raio de ação e vento agindo no sentido longitudinal da embarcação, condição que gera uma menor área de exposição ao vento.

Em ambas as combinações foram consideradas correntes atuando no sentido longitudinal da embarcação, condição que gera esforços de pouca intensidade sobre o corpo dos navios. Dadas as condições de amarração, com os cabos fixados em angulações, ambas as condições de ventos e correntes produzem esforços nos sentidos positivos dos eixos x e z, sendo que a combinação 1 produz esforços consideravelmente mais elevados, dada a maior área vélica de exposição ao vento.

No que se refere às reações máximas geradas nas bases das estacas, esperava-se que para a combinação 1 fossem encontrados os valores de maiores intensidades, fato que foi confirmado a partir da análise dos resultados.

Para as reações de forças na base das estacas, sob o eixo x foram encontrados para a combinação 1 valores $\mu_{Fx1} = -169,68$ kN e $\sigma_{Fx1} = 18,20$ kN, e para a combinação 2 $\mu_{Fx2} = -75,36$ kN e $\sigma_{Fx2} = 8,22$ kN. As reações de forças em y, sendo essas as principais e as que mais contribuem para os esforços normais nas estacas, apresentaram valores ligeiramente mais elevados na combinação 1, tendo sido encontrados $\mu_{Fy1} = 2386,6$ kN e $\sigma_{Fy1} = 262,23$ kN, e para a combinação 2 $\mu_{Fy2} = 1585,38$ kN e $\sigma_{Fy2} = 112,82$ kN. A magnitude elevada desses esforços justifica-se pelos fatos de a estrutura possuir um elevado peso próprio, dadas suas dimensões, e pela consideração de uma elevada sobrecarga acidental, com valor médio de 40 kN/m². As reações verticais positivas nas bases das estacas consistem em esforços de compressão nesses elementos, como esperado para uma estrutura com essa. Sob o eixo z, as forças de reação encontradas foram também mais elevadas para a combinação 1, tendo sido obtidas para essa combinação $\mu_{Fz1} = -474,75$ kN e $\sigma_{Fz1} = 32,55$ kN, e para a combinação 2 $\mu_{Fz2} = -343,73$ kN e $\sigma_{Fz2} = 37,11$ kN. Esses valores encontram justificativa em dois aspectos, que são a própria ação dos esforços de amarração nessa direção e a existência de estacas inclinadas no sentido do eixo z, fazendo com que os esforços verticais provenientes do peso próprio, da sobrecarga acidental e dos equipamentos também contribuam para essas reações.

No que se refere aos momentos de reação agindo na base das estacas, sob o eixo x foram encontrados para a combinação 1 $\mu_{Mx1} = 76,72$ kNm e $\sigma_{Mx1} = 7,47$ kNm, e para a combinação 2 $\mu_{Mx2} = 20,4$ kNm e $\sigma_{Mx2} = 2,10$ kNm. Tais valores também se justificam devido à maior área vélica de exposição da embarcação a ventos transversais, causando maiores forças de amarração horizontais e, conseqüentemente, maiores momentos de reação sob o eixo x. Os momentos sob o eixo y são os que mais contribuem para a existência de esforços de torção nas estacas, e para a combinação 1 foram encontrados valores de $\mu_{My1} = -10,66$ kNm e $\sigma_{My1} = 1,14$ kNm, e para a combinação 2 $\mu_{My2} = -10,78$ kNm e $\sigma_{My2} = 1,22$ kNm, sendo que ambas as combinações apresentaram magnitudes semelhantes. Em z, as reações de momentos encontradas foram $\mu_{Mz1} = 42,9$ kNm e $\sigma_{Mz1} = 3,66$ kNm, e para a combinação 2 $\mu_{Mz2} = 29,55$ kNm e $\sigma_{Mz2} = 3,38$ kNm, também mais elevadas para a combinação 1, que possui ações externas mais severas.

Ainda analisando-se a Tabela 3, nota-se uma tendência de regularidade nos valores obtidos para os coeficientes de variação das reações máximas. Os menores valores para os coeficientes de variação foram de aproximadamente 7 %, obtidos para as reações máximas de F_z da combinação 1 e F_y da combinação 2, enquanto que os máximos coeficientes de variação obtidos foram de aproximadamente 11%, encontrados para diversas saídas de reações em ambas as combinações. Calculando-se o valor médio para os coeficientes de variação somente para a combinação 1 encontra-se $\delta_{MÉD,1} = 9,59$ %, enquanto que somente para a combinação 2 encontra-se $\delta_{MÉD,1} = 10,31$ %. A média obtida considerando-se todas as saídas das duas combinações é $\delta_{MÉD} = 9,95$ %. Dessa forma, verificou-se que, dentro das condições consideradas, as distribuições de probabilidade das reações nas bases das estacas do cais de paramento aberto analisado possuem coeficientes de variação de aproximadamente 10%.

A verificação da normalidade das saídas das reações estruturais foi executada através do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov. Por esse teste, dados o número de 25.000 simulações, a discrepância máxima d aceitável entre as distribuições de probabilidade acumuladas das séries obtidas com as simulações de Monte Carlo e das séries analíticas definidas pelas médias e desvios-padrão das respostas é de $d = 0,009$, para um nível de significância de 5%. Para a combinação 1, o valor máximo encontrado foi de $d_{1,MÁX} = 0,005$, enquanto que para a combinação 2 foi $d_{2,MÁX} = 0,008$. Em termos dos valores médios, encontrou-se tanto analisando as combinações separadamente como analisando conjuntamente valores de $d_{MÉD} = 0,004$. Dessa forma, conclui-se que as distribuições de probabilidades das variáveis de saída dos modelos, que representam as reações estruturais máximas nas bases das estacas, ajustam-se adequadamente a distribuições normais de probabilidade.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma análise probabilística de uma estrutura portuária acostável pertencente ao TECON – Terminal de Contêineres do Porto do Rio Grande, com o objetivo de se verificar a variabilidade das reações máximas atuantes nas estacas da estrutura.

O cais em questão, modelado em elementos finitos, foi objeto de simulações de Monte Carlo nas quais as variáveis aleatórias de entrada foram parâmetros referentes às ações externas atuantes na estrutura, enquanto que as variáveis de saída foram as reações $F_{x,y,z}$ e $M_{x,y,z}$ nas bases dos elementos de fundação da estrutura. O modelo estrutural e as simulações de Monte Carlo foram executadas com o software ANSYS®.

Duas combinações de esforços foram analisadas, variando-se entre elas o tipo de equipamento atuante e a direção das forças provenientes dos ventos agindo no corpo da embarcação considerada. Em cada combinação, para as seis variáveis de saída foram obtidos os valores médios, desvios-padrão e coeficientes de variação. Possuindo condições mais agressivas do ponto de vista estrutural, verificou-se que a combinação 1 apresentou os valores mais elevados para as reações nas bases das estacas.

Notou-se que os valores médios e de desvio-padrão alteram-se consideravelmente entre as duas combinações, porém existindo uma tendência de regularidade entre os valores dos coeficientes de variação de cada saída, com valores médios de aproximadamente 10 % considerando as 12 saídas aleatórias consideradas.

Mesmo com a existência de variáveis aleatórias não-normais entre os parâmetros de entrada no modelo, como as velocidades de vento e peso dos contêineres, introduzidas por

distribuições de Weibull e que incidem diretamente nas ações de amarração e dos equipamentos, respectivamente, verificou-se através de testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov que, dentro das condições consideradas neste trabalho, as reações estruturais em estruturas acostáveis ajustam-se satisfatoriamente a distribuições normais de probabilidade.

Tendo sido consideradas apenas duas combinações de carregamentos, entende-se que a análise aqui apresentada deve ser expandida, através da consideração outras combinações de esforços ou ainda a inserção de outros parâmetros significativos ao modelo.

Dada a possibilidade de programação através da linguagem *Parametric Design Language*, verifica-se que o software ANSYS® é uma poderosa ferramenta, podendo ser extremamente útil na análise probabilística de estruturas.

Agradecimentos

Os autores André Pereira Ramos e João Paulo Silva Lima agradecem à CAPES – Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior – pelas bolsas de mestrado, e o autor Mauro de Vasconcelos Real agradece ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – pela bolsa de produtividade.

REFERÊNCIAS

- Alfredini, P., Arasaki, E., 2009. *Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental*. 2ed. São Paulo: Edgard Blucher.
- Ang, A. H-S, Tang, W.H., 2007. *Probability Concepts in Engineering. Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering*. 2ed. New York: Wiley.
- ANSYS, 2016. *ANSYS Version 16 – User’s Manual*. Houston: Swanson Analysis System Inc.
- ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários, 2015. *Relatório de atividades 2014*. Brasília.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- British Standard, 2000. *BS 6349-1: Maritime structures – Part 1: Code of practice for general*. London.
- British Standard, 1994. *BS 6349-4: Maritime structures – Part 4: Part 4: Code of practice for design of fendering and mooring systems*. London.
- Janssen, H., 2013. Monte-Carlo based uncertainty analysis: Sampling efficiency and sampling convergence. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 109, p. 123-132.
- JCSS – Joint Committee on Structural Safety, 2001. *Probabilistic Model Code*.
- Kim, N.H., Sankar, B.V., 2011. *Introdução à análise e ao projeto em elementos finitos*. Rio de Janeiro: LTC.
- Liebherr, *Technical Description Ship to Shore Gantry Cranes*. <http://www.liebherr.com/>.
- Martha, L. F., 2010. *Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos*. Rio de Janeiro: Editora Elsevier.
- Mason, J., 1981. *Obras Portuárias*. Rio de Janeiro: Campus.

- Nowak, A. S., Collins, K.R., 2000. *Reliability of structures*. USA: The McGraw-Hill Companies.
- Olinto, C.R., Pinto, W.T., Halal, M.B. Avaliação de potencial eólico da região costeira do extremo sul do Rio Grande do Sul. II CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2002.
- SUPRG – Superintendência do Porto do Rio Grande. <http://www.portoriogrande.com.br>.
- Thoresen, C. A., 2014. *Port's Design Handbook*. 3ed. London: ICE Publishing.
- Tsinker, G., 1997. *Handbook of Port And Harbor Engineering: geotechnical and structural aspects*. New York : Chapman & Hall.
- Terex, 2010. *Mobile Harbour Crane Catalogue*. <http://www.terexcranes.com>.
- Viegas, C. H. H., 2015. *Análise dos esforços em estacas de um cais de contêineres de paramento aberto*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, FURG – Universidade Federal do Rio Grande.