

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

ANÁLISE PROBABILÍSTICA DOS ESFORÇOS NAS ESTACAS DE UM CAIS DE
CONTÊINERES DE PARAMENTO ABERTO

por

Bolívar Zanella Ribeiro

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, dezembro de 2017

ANÁLISE PROBABILÍSTICA DOS ESFORÇOS NAS ESTACAS DE UM CAIS DE DE
CONTÊINERES DE PARAMENTO ABERTO

Por

Bolívar Zanella Ribeiro
Engenheiro Civil

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Área de Concentração: Engenharia Costeira

Orientador: Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira

PPGEO/FURG

Prof. Dr. Charlei Marcelo Paliga

FAURB/UFPEL

Prof. Dr. Antônio Marcos de Lima Alves

EE/FURG

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Rio Grande, 14 de dezembro de 2017

Incluir nesta página a folha de rosto assinada pelos membros da banca e o coordenador do Programa. Pode ser utilizada uma fotocópia (xerox) colorida da folha de rosto.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Mauro de Vasconcellos Real, pela disposição e paciência em orientar e colaborar efetivamente para a realização deste trabalho;

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, por passarem adiante o conhecimento necessário para a realização deste trabalho;

À coordenação do PPGEQ, pela dedicação ao programa e aos alunos;

A todos os colegas de mestrado, em especial ao colega André Ramos, pela contribuição e atenção prestada durante todo o processo;

A todos os professores e funcionários da Escola de Engenharia, amigos e colegas de profissão durante grande parte deste trabalho;

À minha família, amigos e amigas, pelo incentivo, colaboração e carinho.

RESUMO

O presente trabalho consiste na análise probabilística das cargas axiais das estacas de um cais de contêineres de paramento aberto. A análise parte do modelo de um cais de contêineres já existente e busca principalmente avaliar as solicitações máximas por estaca e sua distribuição de probabilidade, com base nos dados estatísticos obtidos. A solução do modelo é feita através do método dos elementos finitos e a análise probabilística é realizada através do método de Monte Carlo, com uma amostragem por Hipercubo Latino, ambos realizados com o auxílio do *software* ANSYS. Paralelamente, busca-se aprimorar o modelo, principalmente no que diz respeito à aplicação da sobrecarga com relação à distribuição e variabilidade desta ação. Após a aplicação da metodologia proposta a cinquenta e duas combinações diferentes de ações, divididas em seis grupos, o estudo gerou dois conjuntos de resultados: um para o modelo onde a sobrecarga foi mantida com uma distribuição Normal, onde o valor dos esforços axiais de cada estaca e os parâmetros estatísticos associados a estes valores foi analisado e comparado com os resultados apresentados em Ramos (2016); e outro conjunto de resultados em que a sobrecarga foi aplicada com uma distribuição Beta, onde os esforços axiais individuais das estacas foram novamente comparados com os resultados obtidos anteriormente. O estudo mostrou que a análise dos resultados individuais das estacas levou a uma aproximação mais fiel e detalhada do comportamento da estrutura no que diz respeito à distribuição de probabilidade dos esforços axiais, como, por exemplo, o fato de que os valores médios nem sempre conduzem aos valores extremos de tração e compressão nas estacas. Além disso, as alterações efetuadas no modelo probabilístico resultaram em esforços de compressão mais intensos, com os esforços mais elevados sendo observados na ocorrência de ventos extremos atuando sobre dois navios amarrados. Também observou-se que o Teorema do Limite Central não se verifica nos novos resultados, uma vez que a sobrecarga é predominante em relação aos outros carregamentos nas estacas comprimidas.

Palavras-chaves: estacas de cais; estruturas portuárias; método dos elementos finitos; análise probabilística; Monte Carlo.

ABSTRACT

This study aims to determine the axial loads on top of foundation piles of a pile berth through Probabilistic analysis. It comes from an existent container berth model that gives us detailed statistic parameters and probability functions related to the maximum axial loads obtained. The static model is built and solved based on the finite elements method and the probabilistic analysis is an application of the Monte Carlo method with a Latin Hypercube sampling, both made inside ANSYS software. The previous model was also improved, especially regarding live load probabilistic distribution and variability. The proposed methodology, applied to fifty two different load combinations, divided into six groups, produced in two separate set of results. One for the previous model, where the axial stress in each pile and its statistic parameters were analyzed and compared with the previous results obtained in Ramos (2016). The other set of results belongs to the modified model, where the new axial stress results were then compared with the previous results previously shown. The analysis of the individual results from each pile gave us a more detailed knowledge about the structure behavior regarding the probability distribution of the axial loads and its statistic parameters and relations, e.g. the fact that the highest reported averages don't always lead to the highest extreme loads. The changes also lead to greater compression loads, where the highest values were observed when two berthed vessels are subjected to extreme winds. Finally, these changes prove the predominance of the live load over all others, especially on the most compressed piles, once that the Central Limit Theorem was not observed on the new results.

Keywords: berth piles; port structures; finite elements method; probabilistic analysis; Monte Carlo method.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 20 |
| 1.1. Estado da Arte | 22 |
| 1.2. Objetivos | 24 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 26 |
| 2.1. Cais de Contêineres | 26 |
| 2.2. Ações sobre um cais de contêineres | 27 |
| 2.2.1. Forças de Atracação | 28 |
| Forças de atracação segundo recomendações da BS 6349, PIANC e Fender Team | 28 |
| 2.2.2. Forças de Amarração | 33 |
| 2.2.3. Peso Próprio | 39 |
| 2.2.4. Peso Próprio Sobreposto | 39 |
| 2.2.5. Sobrecarga | 39 |
| 2.2.6. Equipamentos | 40 |
| 2.2.7. Variação de Temperatura | 41 |
| 2.2.8. Empuxo de Terra | 41 |
| 2.2.9. Ondas, Correntes e Ventos | 41 |
| 2.3. Análise Estrutural do Cais | 42 |
| 2.3.1. Estados Limites | 43 |
| 2.3.2. Método dos Elementos Finitos e o <i>software</i> ANSYS | 44 |
| 2.4. Análise Probabilística | 46 |
| 2.4.1. Função Densidade de Probabilidade | 48 |
| 2.4.2. Função Distribuição Acumulada | 49 |
| 2.4.3. Distribuições de Probabilidade | 49 |
| Distribuição Uniforme | 49 |
| Distribuição Normal ou Distribuição Gaussiana | 49 |
| Distribuição Beta | 50 |
| Distribuição de Weibull (Distribuição de Valores Extremos Tipo III) | 51 |
| Distribuição de Gumbel (Distribuição de Valores Extremos Tipo I) | 52 |
| Distribuição Log-normal | 53 |
| 2.4.4. Testes de Aderência | 53 |
| 2.4.5. Teorema do Limite Central | 54 |
| 2.5. O Método de Monte Carlo | 54 |

| | |
|--|-----|
| 2.5.1. Geração de Valores Aleatórios | 55 |
| 3. METODOLOGIA | 56 |
| 3.1. Estudo de Caso..... | 56 |
| 3.2. Modelo Computacional | 58 |
| 3.2.1. Verificação do Modelo Computacional | 60 |
| 3.3. Aplicação das Cargas..... | 60 |
| 3.3.1. Peso Próprio | 61 |
| 3.3.2. Pavimentação | 61 |
| 3.3.3. Variação de Temperatura..... | 62 |
| 3.3.4. Empuxo de Terra | 62 |
| 3.3.5. Sobrecarga..... | 63 |
| 3.3.6. Atracação | 64 |
| 3.3.7. Amarração | 65 |
| 3.3.8. Equipamentos..... | 66 |
| Portêineres Fora de Operação | 67 |
| Portêineres em Operação | 67 |
| Guindastes Móveis Fora de Operação | 67 |
| Guindastes Móveis em Operação | 68 |
| 3.3.9. Resumo da Aplicação das Cargas..... | 68 |
| 3.4. Combinações das Ações | 70 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 72 |
| 4.1. Parâmetros Estatísticos das Variáveis de Saída – Modelo Inalterado | 72 |
| 4.1.1. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 1 | 72 |
| 4.1.2. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 2 | 78 |
| 4.1.3. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 3 | 83 |
| 4.1.4. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 4 | 88 |
| 4.1.5. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 5 | 93 |
| 4.1.6. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 6 | 97 |
| 4.1.7. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade Para os Piores Casos de Cada Grupo | 103 |
| 4.2. Parâmetros Estatísticos das Variáveis de Saída – Modelo Alterado | 105 |
| 4.2.1. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 1 | 106 |
| 4.2.2. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 2 | 111 |
| 4.2.3. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 3 | 116 |

| | |
|---|-----|
| 4.2.4. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 4 | 121 |
| 4.2.5. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 5 | 127 |
| 4.2.6. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 6 | 132 |
| 5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS | 138 |
| REFERÊNCIAS..... | 141 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Ações características em estruturas portuárias acostáveis (Fonte: Ramos, 2016. Adaptado de Thoresen, 2014)..... | 27 |
| Figura 2.2 – Deslocamento x TEU. (Fonte: adaptado de Fender Team, 2015). | 29 |
| Figura 2.3 – Velocidade de atracação. (Fonte: adaptado de Fender Team, 2015). | 30 |
| Figura 2.4 – Atracação lateral. (Fonte: adaptado de Fender Team, 2015). | 31 |
| Figura 2.5 – Representação da massa de água que acompanha o navio no momento da atracação. (Fonte: Fender Team, 2015). | 32 |
| Figura 2.6 – Coeficientes de força do vento para navios porta-contêineres. (Fonte: adaptado de BSI, 2000). | 34 |
| Figura 2.7 – Novo gráfico de velocidade característica do vento. (Fonte: Beck e Corrêa, 2013)..... | 36 |
| Figura 2.8 – Coeficientes de força de arrasto. (Fonte: adaptado de BSI, 2000)..... | 37 |
| Figura 2.9 – Fator de correção de profundidade para forças longitudinais. (Fonte: adaptado de BSI, 2000). | 38 |
| Figura 2.10 – Fator de correção de profundidade para forças transversais. (Fonte: adaptado de BSI, 2000). | 38 |
| Figura 2.11 – Coef. de correlação entre esforços axiais máximos e variáveis aleatórias de entrada. (Fonte: Ramos, 2016)..... | 40 |
| Figura 2.12 – Portêineres – <i>Ship to shore container cranes</i> . (Fonte: liebherr.com). | 40 |
| Figura 2.13 – Guindaste móvel do TECON Rio Grande. (Fonte: Jornal do Comércio, 2012). | 41 |
| Figura 2.14 – Geometrias típicas de elementos finitos em uma, duas e três dimensões..... | 45 |
| Figura 2.15 – Elemento <i>Beam189</i> . (Fonte: ANSYS, 2016). | 46 |
| Figura 2.16 – Distribuição Uniforme..... | 49 |
| Figura 2.17 – Distribuição Normal. | 50 |
| Figura 2.18 – Distribuição Beta..... | 51 |
| Figura 2.19 – Distribuição Weibull..... | 52 |
| Figura 2.20 – Distribuição Gumbel..... | 52 |
| Figura 2.21 – Distribuição Lognormal..... | 53 |
| Figura 2.22 – Visualização do teste de Kolmogorov-Smirnov..... | 54 |
| Figura 3.1 – Situação TECON Rio Grande. (Fonte: Google Earth, 2017). | 56 |
| Figura 3.2 – Representação gráfica de um dos módulos do cais (não representa o modelo computacional)..... | 57 |
| Figura 3.3 – Representação gráfica de um dos módulos do cais – detalhe (não representa o modelo computacional)..... | 57 |
| Figura 3.4 – Planta de locação das estacas (Fonte: Memorial de Cálculo do cais do TECON Rio Grande)..... | 58 |
| Figura 3.5 – Modelo computacional do módulo do cais em estudo. | 59 |
| Figura 3.6 – Comparação dos resultados obtidos nos <i>software</i> ANSYS e SAP2000 para o modelo estrutural submetido a uma combinação simplificada de esforços. (Fonte: Ramos, 2017). | 60 |
| Figura 3.7 – Detalhe da camada de pavimentação. (Fonte: Projeto TECON Rio Grande)..... | 61 |
| Figura 3.8 – Seção Transversal. (Fonte: Projeto TECON Rio Grande)..... | 63 |
| Figura 3.9 – Ajuste de curvas para a sobrecarga..... | 64 |
| Figura 3.10 – Ajuste de curva para a área vélica lateral x DWT. (Fonte: Ramos, 2016)..... | 66 |
| Figura 4.1 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 1.0. | 74 |
| Figura 4.2 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 1.2. | 74 |
| Figura 4.3 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo em cada combinação do Grupo 1..... | 76 |
| Figura 4.4 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo em cada combinação do Grupo 1..... | 76 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.5 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 2.0. | 79 |
| Figura 4.6 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 2.5. | 79 |
| Figura 4.7 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo em cada combinação do Grupo 2..... | 81 |
| Figura 4.8 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo em cada combinação do Grupo 2..... | 81 |
| Figura 4.9 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 3.0. | 84 |
| Figura 4.10 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 3.2. | 84 |
| Figura 4.11 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo em cada combinação do Grupo 3..... | 86 |
| Figura 4.12 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo em cada combinação do Grupo 3..... | 86 |
| Figura 4.13 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 4.0. | 89 |
| Figura 4.14 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 4.2. | 89 |
| Figura 4.15 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo em cada combinação do Grupo 4..... | 91 |
| Figura 4.16 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo em cada combinação do Grupo 4..... | 91 |
| Figura 4.17 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 5.0. | 94 |
| Figura 4.18 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 5.4. | 94 |
| Figura 4.19 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo em cada combinação do Grupo 5..... | 96 |
| Figura 4.20 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo em cada combinação do Grupo 5..... | 96 |
| Figura 4.21 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 6.0. | 99 |
| Figura 4.22 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 6.2. | 99 |
| Figura 4.23 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo em cada combinação do Grupo 6..... | 101 |
| Figura 4.24 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo em cada combinação do Grupo 6..... | 101 |
| Figura 4.25 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo..... | 103 |
| Figura 4.26 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo. | 104 |
| Figura 4.27 – Ocorrências das estacas com parâmetro Xk máximo em todas as combinações..... | 104 |
| Figura 4.28 – Ocorrências das estacas com parâmetro Xk mínimo em todas as combinações. | 105 |
| Figura 4.29 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo..... | 107 |
| Figura 4.30 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo. | 107 |
| Figura 4.31 – Ajuste de curvas: 1.2.1 – E46..... | 108 |
| Figura 4.32 – Ajuste de curvas: 1.2.1 – E23..... | 108 |
| Figura 4.33 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo..... | 109 |
| Figura 4.34 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo. | 110 |
| Figura 4.35 – Ajuste de curvas: 1.8.1 – E21..... | 110 |
| Figura 4.36 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo..... | 112 |
| Figura 4.37 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo. | 112 |
| Figura 4.38 – Ajuste de curvas: 2.5.1 – E29..... | 113 |
| Figura 4.39 – Ajuste de curvas: 2.5.1 – E23..... | 113 |
| Figura 4.40 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo..... | 114 |
| Figura 4.41 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo. | 115 |
| Figura 4.42 – Ajuste de curvas: 2.8.1 – E29..... | 115 |
| Figura 4.43 – Ajuste de curvas: 2.8.1 – E21..... | 116 |
| Figura 4.44 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo..... | 117 |
| Figura 4.45 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo. | 117 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.46 – Ajuste de curvas: 3.2.1 – E32..... | 118 |
| Figura 4.47 – Ajuste de curvas: 3.2.1 – E21..... | 118 |
| Figura 4.48 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo..... | 120 |
| Figura 4.49 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo..... | 120 |
| Figura 4.50 – Ajuste de curvas: 3.7.1 – E17..... | 121 |
| Figura 4.51 – Ajuste de curvas: 3.7.1 – E23..... | 121 |
| Figura 4.52 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo..... | 123 |
| Figura 4.53 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo..... | 123 |
| Figura 4.54 – Ajuste de curvas: 4.2.1 – E29..... | 124 |
| Figura 4.55 – Ajuste de curvas: 4.2.1 – E23..... | 124 |
| Figura 4.56 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo..... | 125 |
| Figura 4.57 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo..... | 126 |
| Figura 4.58 – Ajuste de curvas: 4.7.1 – E17..... | 126 |
| Figura 4.59 – Ajuste de curvas: 4.7.1 – E23..... | 127 |
| Figura 4.60 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo..... | 128 |
| Figura 4.61 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo..... | 128 |
| Figura 4.62 – Ajuste de curvas: 5.4.1 – E29..... | 129 |
| Figura 4.63 – Ajuste de curvas: 5.4.1 – E21..... | 129 |
| Figura 4.64 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo..... | 130 |
| Figura 4.65 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo..... | 131 |
| Figura 4.66 – Ajuste de curvas: 5.6.1 – E29..... | 131 |
| Figura 4.67 – Ajuste de curvas: 5.6.1 – E35..... | 132 |
| Figura 4.68 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo..... | 133 |
| Figura 4.69 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo..... | 133 |
| Figura 4.70 – Ajuste de curvas: 6.2.1 – E29..... | 134 |
| Figura 4.71 – Ajuste de curvas: 6.2.1 – E26..... | 134 |
| Figura 4.72 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo..... | 135 |
| Figura 4.73 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo..... | 136 |
| Figura 4.74 – Ajuste de curvas: 6.4.1 – E29..... | 136 |
| Figura 4.75 – Ajuste de curvas: 6.4.1 – E26..... | 137 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Coeficiente de bloco Cb (Fonte: PIANC, 2002)..... | 32 |
| Tabela 2.2 - Propriedades geométricas de porta-contêineres em função do DWT (Fonte: adaptado de PIANC, 2002)..... | 35 |
| Tabela 3.1 - Análise dos valores de DWT entre janeiro e julho de 2016..... | 65 |
| Tabela 3.2 – Resumo de todas as cargas aplicadas..... | 68 |
| Tabela 4.1 - Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 1.0..... | 73 |
| Tabela 4.2 - Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 1.2..... | 73 |
| Tabela 4.3 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 1 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico..... | 74 |
| Tabela 4.4 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 1 – valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico..... | 75 |
| Tabela 4.5 – Teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas mais carregadas em cada combinação do Grupo 1..... | 77 |
| Tabela 4.6 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 1 – comparação com Ramos (2016).... | 77 |
| Tabela 4.7 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 2.0..... | 78 |
| Tabela 4.8 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 2.5..... | 79 |
| Tabela 4.9 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 2 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico..... | 80 |
| Tabela 4.10 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 2 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico..... | 80 |
| Tabela 4.11 – Teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas mais carregadas em cada combinação do Grupo 2..... | 82 |
| Tabela 4.12 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 2 – comparação com Ramos (2016).... | 82 |
| Tabela 4.13 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 3.0..... | 83 |
| Tabela 4.14 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 3.2..... | 84 |
| Tabela 4.15 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 3 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico..... | 85 |
| Tabela 4.16 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 3 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico..... | 85 |
| Tabela 4.17 – Teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas mais carregadas em cada combinação do Grupo 3..... | 87 |
| Tabela 4.18 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 3 – comparação com Ramos (2016).... | 87 |
| Tabela 4.19 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 4.0..... | 88 |
| Tabela 4.20 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 4.2..... | 89 |
| Tabela 4.21 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 4 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico..... | 90 |
| Tabela 4.22 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 4 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico..... | 90 |
| Tabela 4.23 – Teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas mais carregadas em cada combinação do Grupo 4..... | 92 |
| Tabela 4.24 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 4 – comparação com Ramos (2016).... | 92 |
| Tabela 4.25 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 5.0..... | 93 |
| Tabela 4.26 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 5.4..... | 94 |
| Tabela 4.27 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 5 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico..... | 95 |
| Tabela 4.28 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 5 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico..... | 95 |
| Tabela 4.29 – Teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas mais carregadas em cada combinação | |

| | |
|--|-----|
| do Grupo 5..... | 97 |
| Tabela 4.30 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 5 – comparação com Ramos (2016)... | 97 |
| Tabela 4.31 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 6.0..... | 98 |
| Tabela 4.32 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 6.2..... | 98 |
| Tabela 4.33 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 6 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico. | 100 |
| Tabela 4.34 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 6 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico. | 100 |
| Tabela 4.35 – Teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas mais carregadas em cada combinação do Grupo 6..... | 102 |
| Tabela 4.36 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 6 – comparação com Ramos (2016). | 102 |
| Tabela 4.37 – Resumo dos piores casos observados em cada grupo com relação ao par. Xk..... | 103 |
| Tabela 4.38 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 1.2.1 (beta). | 106 |
| Tabela 4.39 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 1.8.1 (beta). | 109 |
| Tabela 4.40 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 2.5.1 (beta). | 111 |
| Tabela 4.41 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 2.8.1 (beta). | 114 |
| Tabela 4.42 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 3.2.1 (beta). | 116 |
| Tabela 4.43 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 3.7.1 (beta). | 119 |
| Tabela 4.44 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 4.2.1 (beta). | 122 |
| Tabela 4.45 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 4.7.1 (beta). | 125 |
| Tabela 4.46 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 5.4.1 (beta). | 127 |
| Tabela 4.47 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 5.6.1 (beta). | 130 |
| Tabela 4.48 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 6.2.1 (beta). | 132 |
| Tabela 4.49 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 6.4.1 (beta). | 135 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Algarismos Romanos

| Símbolo | Descrição | Unidade |
|-----------|--|-------------------|
| a, b | Limites inferior e superior da distribuição uniforme de probabilidades; parâmetros de forma (Beta) | - |
| A | Área da seção transversal | m ² |
| A_L | Área lateral longitudinal da embarcação, projetada acima da linha d'água | m ² |
| B | Largura da embarcação; distância entre trilhos | m |
| C_b | Coefficiente de bloco | - |
| C_c | Fator de configuração da estrutura acostável | - |
| C_e | Fator de excentricidade | - |
| C_m | Fator de massa virtual | - |
| C_s | Fator de suavização | - |
| C_{LW} | Coefficiente de força de vento longitudinal | - |
| C_{TW} | Coefficiente de força de vento transversal | - |
| C_{TC} | Coefficiente de força de arrasto para correntes transversais | - |
| C_{LC} | Coefficiente de força de arrasto para correntes longitudinais | - |
| C_{CT} | Fator de correção da profundidade para correntes transversais | - |
| C_{CL} | Fator de correção da profundidade para correntes longitudinais | - |
| D | Calado da embarcação | m |
| d | Profundidade da lâmina d'água | m |
| d_m | Calado médio da embarcação | m |
| d_{PAT} | Distância entre centro das patolas dos guindastes móveis portuários | m |
| D | Discrepância no teste de Komolgorov-Smirnov | - |
| E | Valor esperado, Estaca | - |
| EI | Rigidez da viga | kNmm ² |
| E_{ci} | Módulo de Elasticidade inicial do concreto | MPa |

| | | |
|---------------|---|-----------------|
| E_d | Energia de Atracção | kNm |
| E_p | Módulo de elasticidade do material | Mpa |
| f_{ck} | Resistência característica à compressão do concreto | Mpa |
| f_x | Função densidade de probabilidade da variável X | - |
| F | Força nas patolas dos guindastes móveis portuários | kN |
| $F_{data}(x)$ | Função distribuição empírica | - |
| $F_X(x)$ | Distribuição de probabilidade acumulada da variável X | - |
| F_{LW} | Força longitudinal devida ao vento | kN |
| F_{TW} | Força transversal devida ao vento | kN |
| F_{TC} | Força longitudinal devida à corrente marítima | kN |
| F_{Lc} | Força transversal devida à corrente marítima | kN |
| F_{MAR} | Força do portêiner no trilho do lado de mar | kN |
| $F_0(x)$ | Função distribuição acumulada de referência | - |
| F_{TERRA} | Força do portêiner no trilho do lado de terra | kN |
| F_R | Força de reação na defesa – atracção | kN |
| G | Módulo de cisalhamento | Pa |
| h | Altura do vento | m |
| I | Momento de inércia | mm ⁴ |
| K | Raio de giração da embarcação | m |
| L | Comprimento total da embarcação; comprimento da seção transversal | m |
| L_e | Vão livre da estaca equivalente | m |
| L_s | Comprimento hipotético da estaca | m |
| L_u | Comprimento original da estaca | m |
| L_{BP} | Distância entre perpendiculares da embarcação | m |
| L_{TRILHO} | Comprimento dos <i>trolleys</i> de apoio dos portêineres | m |
| M | Massa deslocada pelo navio, Momento fletores | ton; kNm |

| | | |
|--------------|---|-----|
| M_R | Momento de reação na defesa – atracação | kNm |
| N | Esforço axial interno no topo da estaca | kN |
| n | Número de simulações, número de dados de uma distribuição | - |
| n_h | Coefficiente de reação horizontal do solo | - |
| P | Probabilidade | - |
| P_r | Probabilidade (teste Kolmogorov-Smirnov) | - |
| P_{CONT} | Peso dos contêineres | kN |
| PP_{GMP} | Peso próprio do guindaste móvel portuário | kN |
| PP_{PORT} | Peso próprio do portêiner | kN |
| R | Distância do ponto de contato com a defesa ao centro de massa da embarcação | m |
| $R_{MÁX}$ | Raio máximo de atuação dos guindastes móveis portuários | m |
| T_1 | Temperatura | °C |
| V_B | Componente vertical do cabo de amarração; | kN |
| V | Velocidade de aproximação | m/s |
| V'_C | Velocidade da corrente marítima | m/s |
| V_W | Velocidade do vento | m/s |
| $V_{W,1min}$ | Velocidade média do vento em um minuto | m/s |
| $V_{W,3s}$ | Velocidade de rajada de três segundos | m/s |
| $V_{W,10m}$ | Velocidade do vento a 10 m de altura | m/s |
| $V_{W,h}$ | Velocidade do vento na altura requerida | m/s |
| V_0 | Velocidade básica do vento | m/s |
| VL | Viga longitudinal | - |
| VT | Viga transversal | - |
| X_k | Parâmetro para valores extremos | - |
| X, Y | Variável aleatória | - |
| x, y, z | Eixos longitudinal, vertical e transversal da estrutura, respectivamente | - |

Símbolos Gregos

| Símbolo | Descrição | Unidade |
|------------|--|-------------------|
| α | Ângulo do cabo de amarração com o cais; ângulo entre a linha do cais e a lateral do navio; coeficiente de dilatação térmica; parâmetro de forma Beta | Graus; - |
| β | Ângulo do cabo de amarração com o cais; parâmetro de forma Beta | Graus; - |
| ΔT | Variação de Temperatura | °C |
| δ_X | Coeficiente de Variação variável aleatória X | - |
| φ | Ângulo entre o vetor da velocidade de atracação e uma reta ligando ponto de contato e o centro de massa da embarcação | Graus |
| γ | Ângulo entre o vetor velocidade e o vetor R | Graus |
| γ_C | Peso específico do concreto armado | kN/m ³ |
| γ_r | Fator de segurança | - |
| κ | Fator de forma (Weibull) | - |
| λ | Valor médio (Lognormal); Fator de escala (Weibull) | - |
| ν | Coeficiente de Poisson | - |
| μ_X | Valor médio da variável aleatória X | - |
| ρ_A | Massa específica do ar | kg/m ³ |
| ρ_W | Massa específica da água | kg/m ³ |
| σ_X | Desvio padrão da variável aleatória X | - |
| ζ | Desvio padrão (Lognormal) | - |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANTAQ | Agência Nacional de Transportes Aquaviários |
| ASCE | <i>American Society of Civil Engineers</i> |
| BSI | <i>British Standards Institution</i> |
| DWT | <i>Dead Weight Tonnage</i> |
| EAU | <i>Recommendations of the Committee for Waterfront Structures, Harbours and Waterways</i> |
| FEU | <i>Forty-foot Equivalent Unit</i> |
| JCSS | <i>Joint Committee on Structural Safety</i> |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| NBR | Norma Brasileira Regulamentadora |
| OCIMF | <i>Oil Companies International Marine Forum</i> |
| PDF | <i>Probability Density Function</i> |
| PIANC | <i>Permanent International Association of Navigation Congresses</i> |
| POLB | <i>Port of Long Beach</i> |
| PPGEO | Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica |
| ROM | <i>Recomendaciones para Obras Maritimas</i> |
| SEMC/RS | Secretaria de Energia, Minas e Comunicações do Estado do Rio Grande do Sul |
| TECON | Terminal de Contêineres do Porto de Rio Grande |
| TEU | <i>Twenty-foot Equivalent Unit</i> |

1. INTRODUÇÃO

O transporte aquaviário é sem dúvida a principal forma de transporte de cargas ao redor do mundo, sendo responsável por movimentar aproximadamente 9,9 bilhões de toneladas no ano de 2013. Apesar de não ser explorada em todo o seu potencial, esta modalidade de transporte também é, naturalmente, a mais utilizada para a importação e exportação de bens no Brasil. Neste contexto, encontra-se a cidade de Rio Grande, no Rio Grande do Sul, situada em um ponto estratégico do território brasileiro para o escoamento da produção agrícola e com um perfil hidrográfico ideal para a instalação de um porto capaz de comportar grandes navios de carga, como é o Terminal de Contêineres do Porto do Rio Grande (TECON).

No ano de 2016, o Porto de Rio Grande teve o melhor desempenho da sua história, movimentando aproximadamente 20,5 milhões de toneladas de carga bruta, segundo a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ). Este número representa 7,0% de toda a movimentação nos portos brasileiros, colocando o Porto de Rio Grande em 4º lugar, atrás dos portos de Santos, Itaguaí e Paranaguá.

Atualmente, o TECON conta com um cais de 900 metros de comprimento e um calado de 12,5 metros, o que possibilita a entrada de navios de até 334 metros. No início deste ano, foi anunciado um pedido de expansão do cais por parte do TECON Rio Grande, prevendo o aumento do comprimento do cais para 1200 metros, permitindo que o terminal possa operar com navios de 368 metros de comprimento. Além disso, a infraestrutura do porto conta com seis guindastes Post-Panamax e dois guindastes móveis, além de diversos equipamentos de menor porte em circulação.

Estes números dão uma rápida noção da importância e complexidade das estruturas portuárias, que devem ser capazes de suportar grandes quantidades de carga e equipamentos ao longo de sua vida útil e exercer esta função de maneira adequada e segura. Por este motivo, o estudo destas estruturas, em busca de um melhor entendimento sobre o comportamento e a segurança estrutural das mesmas, é de extrema relevância tanto para o meio acadêmico como para a prática de obras.

Neste contexto, a confiabilidade estrutural é um parâmetro importante a ser levado em consideração, principalmente em projetos de estruturas sujeitas a carregamentos mais complexos, entre elas, as estruturas costeiras e portuárias. Tais estruturas estão sujeitas a diversos carregamentos durante a sua vida útil e estes carregamentos possuem uma grande variabilidade, como esforços de atracação e amarração, influenciados pela velocidade do vento e das correntes ou esforços de sobrecarga e de circulação dos equipamentos em terra, que estão relacionados com as cargas movimentadas, por exemplo.

Normalmente, o projeto e o dimensionamento de estruturas é decorrente de uma análise semiprobabilística do problema, onde considera-se que o carregamento atuante e a resistência dos materiais possuem valores conhecidos, determinados. A segurança da estrutura é então garantida desde que os esforços resistentes sejam maiores que os esforços solicitantes, obtidos através da aplicação de coeficientes parciais de segurança (ARAÚJO, 2014). Tais coeficientes são provenientes de análises probabilísticas, logo, como as variáveis possuem valores determinísticos, temos então uma análise semiprobabilística.

Porém, embora este tipo de análise seja largamente empregada no âmbito da engenharia civil, ela pode não ser suficiente para assegurar a confiabilidade de estruturas sujeitas a carregamentos mais complexos e dinâmicos. Nestes casos, torna-se interessante a realização de uma análise puramente probabilística, onde as variáveis são aleatórias e a distribuição de cada variável aleatória também é levada em consideração durante a solução – analítica ou computacional – do sistema. Busca-se assim levar em conta as incertezas inerentes ao projeto, referentes às propriedades dos materiais, à variabilidade e intensidade das ações, às simplificações adotadas na solução do sistema, aos erros e aproximações estatísticas devidos ao número limitado de dados disponíveis, ao fator humano presente tanto na fase de projeto e execução quanto durante a vida útil da obra, entre outros fatores.

Desta análise probabilística surge a referida confiabilidade estrutural, definida por Sørensen (2004) simplesmente como a probabilidade de que a estrutura em questão desempenhe suas funções de maneira satisfatória durante a sua vida útil. Associada à confiabilidade estrutural está a probabilidade de falha da estrutura, que é justamente o complemento da confiabilidade estrutural. Ainda, é possível determinar também o risco, as consequências que uma eventual falha estrutural podem trazer em termos de casualidades, prejuízos, atrasos, etc.

Dito isto, o presente trabalho procura abordar estas questões através de uma análise probabilística de uma estrutura portuária sujeita a diversas combinações de carregamentos, logo, considerando todas as variáveis envolvidas como variáveis aleatórias. Esta análise parte do modelo computacional de um módulo do cais do TECON desenvolvido por Ramos (2016). A partir deste trabalho, serão realizadas modificações com o intuito de aprimorar o modelo, além de obter mais dados de saída, buscando uma melhor compreensão do comportamento da estrutura.

1.1. Estado da Arte

Apesar de se tratar de uma área de grande interesse, há pouco material disponível a respeito da aplicação da análise probabilística especificamente em estruturas marítimas e portuárias. Dos trabalhos existentes, muitos baseiam-se na extinta NBR 9782 (ABNT, 1987) – ações em estruturas portuárias, marítimas ou fluviais, atualmente cancelada e sem substituta. Além disso, o desenvolvimento do presente trabalho abordou várias questões indiretamente relacionadas com o tema. Buscou-se então um aprofundamento teórico de diversos aspectos fundamentais para a realização do estudo na literatura, normas e trabalhos acadêmicos, no âmbito nacional e internacional, apresentados de forma sucinta a seguir.

Júnior (2006) desenvolveu uma metodologia para o projeto estrutural de um píer, com base principalmente na NBR 9782 (ABNT, 1987). O modelo estrutural foi feito no software STRAP utilizando elementos finitos. O trabalho aborda duas alternativas estruturais com relação à disposição das estacas inclinadas, indicando a solução mais adequada economicamente.

Fanti (2007) apresentou o projeto de um terminal de contêineres, mostrando os principais fatores envolvidos ao longo do processo, entre eles as ações atuantes na estrutura. Fez um estudo completo da estrutura com base no método dos elementos finitos através de um conjunto de modelos planos, um modelo em grelha e um modelo espacial, além de propor uma solução alternativa de projeto. O trabalho mostra-se como um ponto inicial para a modelagem de estruturas portuárias, indicando as vantagens e desvantagens dos modelos propostos e concluiu que a alternativa proposta mostrou-se mais vantajosa.

Kavitha et al. (2010) desenvolveram um software de análise estrutural de estruturas acostáveis baseado no método de Kani, aplicado para estruturas aporticadas. O programa busca minimizar o tempo gasto no projeto solucionando o modelo para as diversas combinações de cargas possíveis. O *software* foi testado e aprovado de acordo com os requisitos locais.

Amendola (2010) realizou a análise estrutural do estaqueamento de um píer, abordando questões como as cargas de amarração e atracação de navios e equipamentos de carga, além dos materiais utilizados e da disposição das estacas. A estrutura foi modelada em elementos finitos no software SAP 2000. Entre suas conclusões, destacam-se as vantagens de se utilizar estacas metálicas devido aos grandes esforços de tração e a importância das estacas inclinadas para absorver as cargas horizontais.

Versteegt (2013) estudou as forças de atracação e amarração de embarcações através de uma análise probabilística com o objetivo de propor valores mais precisos para os fatores de correção das

cargas atuantes nas estruturas portuárias utilizados em análises semiprobabilísticas. Ao final são sugeridas algumas correções nas normas europeias utilizadas para o dimensionamento destas estruturas portuárias.

Comin (2015) apresentou um estudo das ações de atracação e amarração de embarcações, comparando diferentes normas técnicas – nacionais e internacionais – como a NBR 9782 (ABNT, 1987), a inglesa BS 6349 e a alemã EAU 2004, além das recomendações encontradas na PIANC (2002) e em Mason (1982). Os esforços ocasionados por estas ações foram calculados com base nas diversas referências e depois comparados em um estudo de caso. O autor verificou uma grande variação nos resultados obtidos em cada uma das referências, mostrando a influência do código utilizado no dimensionamento destas estruturas.

Pinheiro (2013) estudou a confiabilidade de uma viga de concreto em ambiente marítimo através de uma análise probabilística. O estudo conta com a determinação da segurança estrutural da viga original, da viga danificada e da viga recuperada com compósitos de fibras de carbono, mostrando que o reforço eleva o índice de confiabilidade aos valores mínimos de referência, situação não observada ao analisar a mesma viga danificada.

Ribeiro et al. (2016) efetuaram um estudo a respeito dos valores de reação das estacas de um dolfim de amarração e de um dolfim de atracação, comparando os resultados entre os métodos probabilístico e semiprobabilístico e verificando qual a probabilidade de os esforços obtidos na análise probabilística superarem os obtidos na análise convencional, concluindo que os resultados semiprobabilísticos mostraram-se satisfatórios.

Além destes, dois trabalhos realizados anteriormente podem ser destacados como predecessores deste estudo:

Viegas (2015) analisou a estrutura de um cais de contêineres através do método dos elementos finitos, desenvolvido a partir do software ANSYS. O modelo foi submetido a diversas combinações de carregamentos buscando as combinações que gerassem as maiores solicitações nas fundações do cais, observando aspectos importantes a respeito do comportamento da estrutura frente às solicitações mais desfavoráveis. Os resultados obtidos permitiram determinar a variação dos esforços nas estacas em função das diferentes combinações

Ramos (2016) apresentou uma análise estrutural probabilística de um cais de contêineres, com o objetivo de conhecer parâmetros estatísticos e a distribuição de probabilidade dos esforços de reação das estacas mais carregadas, realizando cinquenta e duas combinações de carregamentos diferentes. O estudo concluiu que a combinação de ventos extremos atuando sobre duas embarcações amarradas à estrutura leva aos valores mais intensos de tração e compressão nas fundações da estrutura.

Entre publicações literárias, podemos destacar as seguintes:

Tsinker (2004) é uma referência no que diz respeito ao planejamento, construção, manutenção e segurança de portos e demais estruturas costeiras ou offshore.

Gaythwaite (2014) fornece um manual com o objetivo de auxiliar na determinação de forças de amarração e atracação causadas por embarcações em diversas estruturas costeiras e marítimas, como píeres, cais ou dolfins.

Thoresen (2014) aborda diversos aspectos do projeto de estruturas marítimas, entre o planejamento, forças e carregamentos atuantes e considerações gerais a respeito do dimensionamento da estrutura.

Alfredini e Arasaki (2009) tratam sobre inúmeros temas relacionados à obras costeiras, portuárias e hidroviárias, mostrando inclusive diversos exemplos de aplicação das mesmas.

Chandrasekaran (2016) apresenta detalhes a respeito de diferentes estruturas costeiras e marítimas e as diversas forças atuantes. Além disso, aborda questões como o estado limite último, teorias de falha e uma introdução à confiabilidade estrutural aplicada em obras marítimas.

Por fim, existem algumas referências normativas relacionadas ao tema. Entre elas, as normas britânicas abordam em linhas gerais projetos de estruturas marítimas e sistemas de defensas. OCIMF (1997) e em PIANC (2002) apresentam referências para o dimensionamento de defensas e sistemas de amarração. Nota-se que as referidas normas são todas internacionais pois, conforme mencionado anteriormente, a única norma brasileira que aborda ações em estruturas marítimas, NBR 9782 (ABNT, 1987), encontra-se cancelada.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo determinar de forma detalhada os parâmetros estatísticos – média, desvio padrão, coef. de variação e distribuição – dos esforços axiais de cada uma das 60 estacas de um dos módulos do cais do TECON Rio Grande, procurando determinar também a relação entre as estacas mais carregadas com estes parâmetros, comparando os resultados obtidos aqui com os apresentados por Ramos (2016).

Paralelamente, outros objetivos serão alcançados ao longo do desenvolvimento do trabalho:

- Analisar a carga axial estaca por estaca, ao invés de calcular a média e desvio padrão do conjunto de estacas em cada combinação de carga;
- Modificar a distribuição de probabilidade da sobrecarga e avaliar como esta mudança reflete nos parâmetros dos esforços normais obtidos para cada uma das estacas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Cais de Contêineres

Um terminal de contêineres, tal qual o cais do TECON, é uma estrutura onde se realiza o transbordo de contêineres entre diferentes modais de transporte. Mais comumente entre navios cargueiros e caminhões ou trens.

Até o final dos anos 50, o transporte marítimo de bens era feito de maneira simples, onde os produtos eram armazenados em barris, caixas ou sacos, dependendo do tipo de produto. Esta prática aumentava os preços de transporte em função do tempo gasto no embarque e desembarque das mercadorias, bem como em danos, avarias e roubos (TOMLINSON, 2009). Estes altos custos limitavam ou até mesmo impediam o comércio internacional de determinados produtos.

A exceção era o Exército dos Estados Unidos, que já durante a Segunda Guerra utilizava pequenos contêineres. No final dos anos 50 e início dos anos 60, algumas companhias de transporte marítimo tiveram a iniciativa de implementar contêineres similares aos utilizados pelo Exército: maiores porém ainda capazes de serem transportados por trens ou caminhões. A intenção era justamente facilitar o processo de carga e descarga, de modo que os produtos pudessem ser armazenados e estar prontos para o transporte naval já no seu ponto de origem, reduzindo substancialmente o tempo de manuseio das cargas e conseqüentemente os custos de transporte. Em 1956, Malcolm McLean transportou 58 contêineres em sua embarcação, marcando o início do transporte marítimo containerizado (MEISEL, 2009).

A padronização ocorreu em 1964 através de acordos internacionais, resultando nas atuais unidades de contêineres existentes hoje: a TEU (*Twenty-foot equivalent unit*), referente aos contêineres de vinte pés e a FEU (*Forty-unit equivalent unit*), referente aos contêineres de quarenta pés, que também podem ser chamados de dois TEU.

Desde então, o transporte containerizado se tornou a principal forma de transporte de bens em todo o mundo, incentivando o desenvolvimento de navios cada vez maiores e, por este motivo, as estruturas portuárias são continuamente submetidas a maiores solicitações, justificando o desenvolvimento deste e de outros trabalhos semelhantes.

2.2. Ações sobre um cais de contêineres

De acordo com Fanti (2007), podemos elencar de forma simplificada as seguintes ações que podem atuar em estruturas portuárias:

- Peso próprio;
- Cargas acidentais;
- Atracação;
- Amarração;
- Geotécnicas;
- Correntes;
- Ondas;
- Ventos;
- Variações de temperatura.

Já Thoresen (2014) nos fornece uma classificação detalhada, conforme a Figura 2.1, onde as ações são divididas de acordo com a origem de cada uma delas: do mar, da terra, ou da própria estrutura.

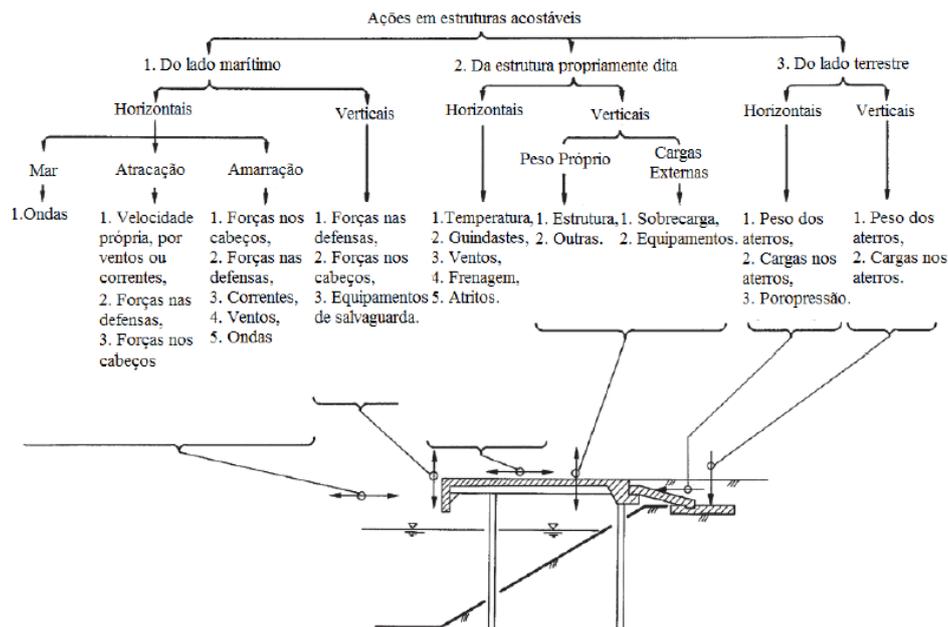


Figura 2.1 – Ações características em estruturas portuárias acostáveis (Fonte: Ramos, 2016. Adaptado de Thoresen, 2014).

Nesta seção, as ações a serem consideradas no modelo estudado serão descritas de maneira detalhada.

2.2.1. Forças de Atracação

As forças de atracação surgem durante o processo de acostagem da embarcação junto ao cais, no momento do impacto do navio com as defensas, que absorvem o impacto e transferem a energia cinética para a estrutura através de carregamentos normais ao cais devido ao impacto e carregamentos paralelos ao cais devido à fricção da embarcação com as defensas.

Tais carregamentos podem ser extremamente complicados de se determinar, pois dependem de uma série de fatores como o tamanho e a velocidade do navio, a manobra executada, direção e força da corrente, dos ventos e das ondas (THORESEN 2014). Todos eles são difíceis de mensurar com precisão, conseqüentemente dificultando a determinação dos esforços de atracação atuantes na estrutura.

Referências existentes para o cálculo destes esforços podem ser encontradas em Mason (1982) e na NBR 9782 (ABNT, 1987). Ambos tratam-se de materiais de longa data e que possuem algumas lacunas em comparação aos métodos mais atuais. Comin (2015) recomenda a utilização do método proposto pelas normas europeias (BS 6349, PIANC e EAU 2004), que conduzem a valores significativamente superiores aos anteriores.

Forças de atracação segundo recomendações da BS 6349, PIANC e Fender Team

As três referências acima abordam o cálculo de energia de atracação através das mesmas expressões, partindo inicialmente da Eq. (2.1):

$$E_d = 0,5 * M * V^2 * C_e * C_m * C_s * C_c \quad (2.1)$$

onde E_d é a energia de atracação de projeto dada em kNm, M é a massa deslocada pelo navio em toneladas, V é a velocidade de aproximação do navio, perpendicular ao cais, em m/s, C_e é o coeficiente de excentricidade, C_m é o coeficiente de massa virtual ou massa efetiva, C_s é o coeficiente de suavização ou de deformação e C_c é o coeficiente de configuração do cais.

O porte das embarcações cargueiras é usualmente expressado em DWT (*Dead Weight Tonnage*), que abrange a quantidade total de massa que o navio pode carregar, fora o seu peso próprio. Essa medida leva em conta portanto o peso da carga, combustível, água, lastro e tripulação. Uma relação aproximada entre a massa deslocada pelo navio e o DWT é sugerida na BS 6349 – Eq. (2.2):

$$M = 1,4 * DWT \quad (2.2)$$

Esta relação, segundo a norma, deve ser utilizada apenas como aproximação e não para fins de projeto. Neste caso, informações detalhadas das embarcações devem ser obtidas.

Em Fender Team (2015) são disponibilizados parâmetros de diversas embarcações, bem como tabelas com a relação entre massa deslocada e DWT, conforme a Fig. 2.2:

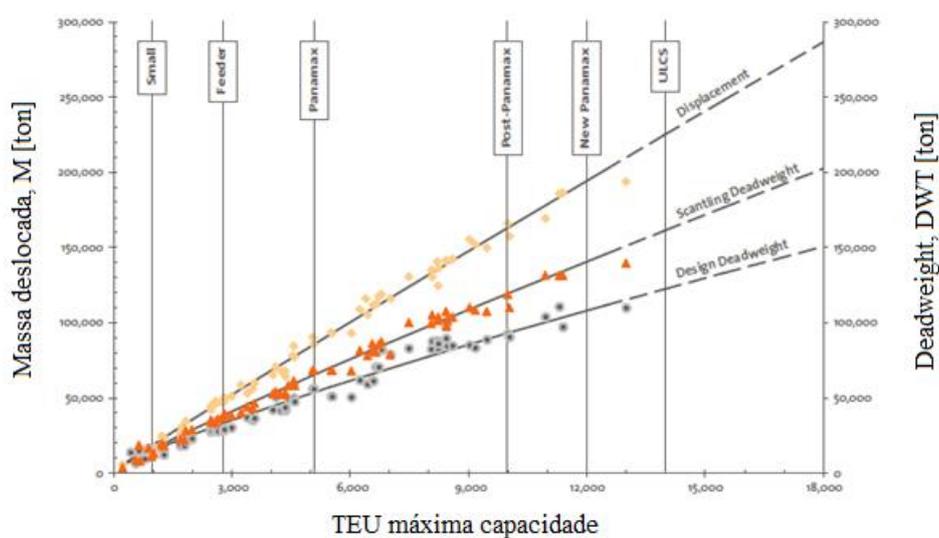


Figura 2.2 – Deslocamento x TEU. (Fonte: adaptado de Fender Team, 2015).

A velocidade de aproximação do navio V é, naturalmente, a variável de maior influência na determinação da energia de atracação, já que seu valor é elevado ao quadrado na equação. Esta velocidade corresponde à velocidade no momento inicial de contato entre navio e defesa, perpendicular ao cais. É também a variável mais difícil de se determinar, pois esta velocidade é influenciada por uma série de fatores, conforme descrito na PIANC (2002):

- Velocidade das ondas, correntes e vento;
- Dificuldade de navegação;
- Método de atracação;
- Tipo e tamanho da embarcação;
- Uso de reboques durante o processo;
- Frequência de atracação no cais;
- Tipo de carregamento;
- Área vélica;
- Fator humano.

Percebe-se então que este é um parâmetro de grande variabilidade. A PIANC (2002) aponta que é tarefa do projetista obter a maior quantidade de informações possível a respeito das condições elencadas acima ao definir a velocidade de aproximação.

Ainda segundo a PIANC, BS 6349 e Fender Team (2015), a velocidade de aproximação pode ser estimada a partir de Broolsma et al. (1977), conforme a Fig. 2.3. Além de ser uma referência de mais de quarenta anos atrás, este gráfico é muito vago a respeito das condições de navegação que são parâmetros para a determinação da velocidade e considera que em todos os casos a atracação é feita com auxílio de rebocadores. No entanto, trata-se da maior quantidade de dados encontrados até o momento, segundo a própria PIANC.

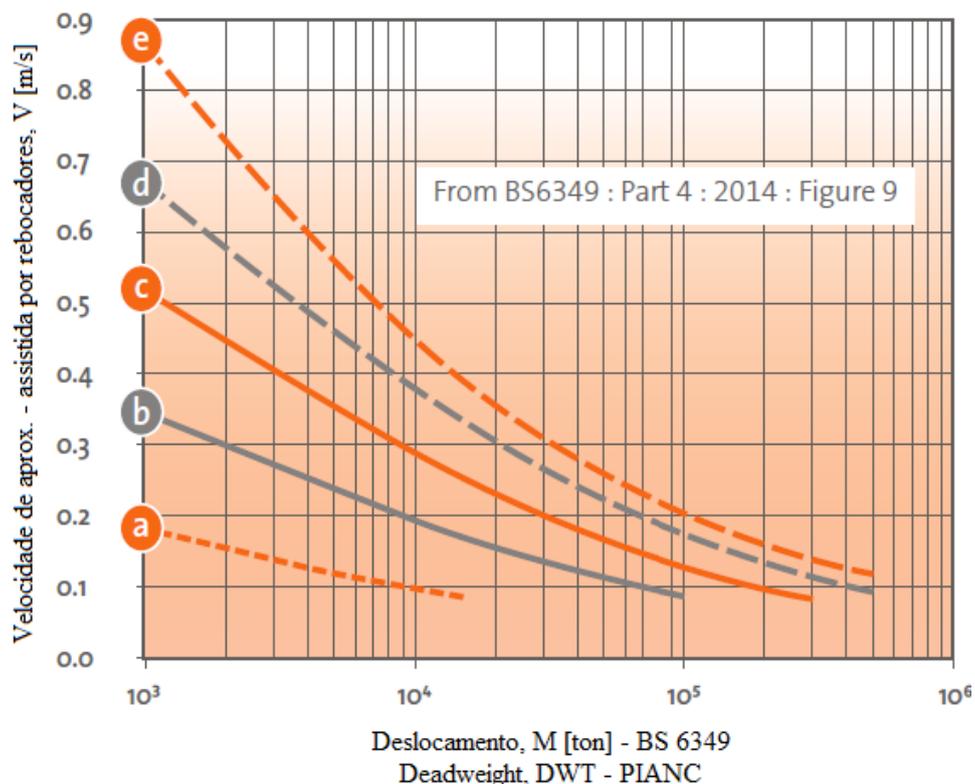


Figura 2.3 – Velocidade de atracação. (Fonte: adaptado de Fender Team, 2015).

Em Rankine (2010) é apresentado um breve estudo a respeito deste parâmetro, intitulado *Berthing Velocities and Broolsma's Curves*, onde aponta-se que as referidas curvas de Broolsma foram adaptadas a longo do tempo pelas já citadas normas, resultando em diferenças de até 40% ao comparar a energia de atracação obtida pelas curvas originais e a energia de atracação obtida através das curvas fornecidas na BS 6349. O trabalho aponta ainda que as curvas foram criadas sem grandes quantidades de dados estatísticos e que as considerações a respeito da utilização obrigatória de rebocadores para navios acima de 10.000 DWT não são mais válidas, concluindo que é necessária uma atualização

completa destes valores.

Ainda sobre a velocidade de aproximação, a Fender Team aponta a EAU (2004) e a ROM 0.2-90 como fontes para a determinação da velocidade de aproximação sem a presença de rebocadores.

O coeficiente de excentricidade C_e considera que o impacto do navio com a defesa não ocorre diretamente no centro de gravidade da embarcação. Com isso, o navio rotaciona ao redor da defesa e uma parte da energia cinética é dissipada durante a rotação, conforme observado na Fig. 2.4:

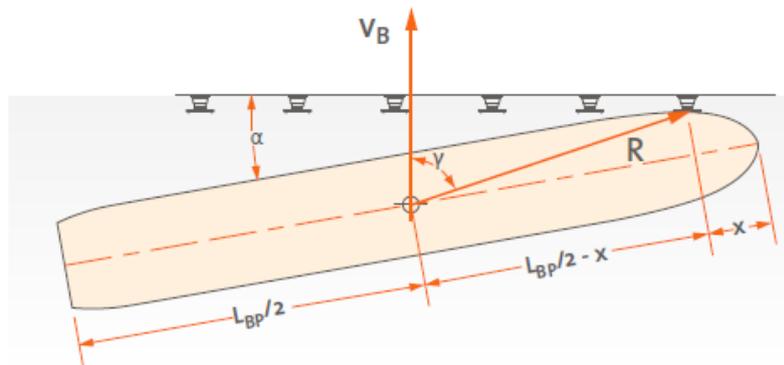


Figura 2.4 – Atracação lateral. (Fonte: adaptado de Fender Team, 2015).

O coeficiente é então determinado pela Eq. (2.3):

$$C_e = \frac{K^2 + R^2 * \cos^2 \gamma}{K^2 + R^2} \quad (2.3)$$

onde K é o raio de giração do navio, determinado pela Eq. (2.4), R é a distância entre o ponto de contato e o centro de massa da embarcação (Fig. 2.4 e Eq. 2.5) e γ é o ângulo entre o vetor de velocidade e a linha que determina a distância R , podendo ser calculado através da Eq. (2.6).

$$K = (0,19 * C_b + 0,11) * L \quad (2.4)$$

$$R = \sqrt{\left(\frac{L_{BP}}{2} - x\right)^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2} \quad (2.5)$$

$$\gamma = 90 - \alpha - \text{asin}\left(\frac{B}{2 * R}\right) \quad (2.6)$$

onde L é o comprimento e B é a largura do navio, em metros, L_{BP} é a distância entre perpendiculares do navio, α é o ângulo entre a linha do cais e a lateral do navio, também observado na Fig. 2.4, e C_b é o coeficiente de bloco, que pode ser determinado pela Eq. (2.7) ou pela Tab. 2.1:

$$C_b = \frac{M}{L * B * D * \rho_w} \quad (2.7)$$

onde D é o calado do navio, em metros, e ρ_w é a densidade da água.

Na falta de dados mais precisos, o coeficiente de bloco pode ser estimado por:

Tabela 2.1 - Coeficiente de bloco C_b (Fonte: PIANC, 2002).

| Tipo de Embarcação | Intervalo de C_b |
|--------------------|--------------------|
| Tanker | 0,72 a 0,85 |
| Contêiner | 0,65 a 0,70 |
| Ro-Ro | 0,65 a 0,70 |
| Passageiros | 0,65 a 0,70 |

O coeficiente de massa efetiva, C_m , adiciona à energia cinética de atracação uma parcela correspondente à massa de água que é trazida junto ao navio enquanto este se aproxima do cais (Fig. 2.5). Após o contato com a defesa, esta massa de água empurra o navio contra a defesa, aumentando assim a energia total.

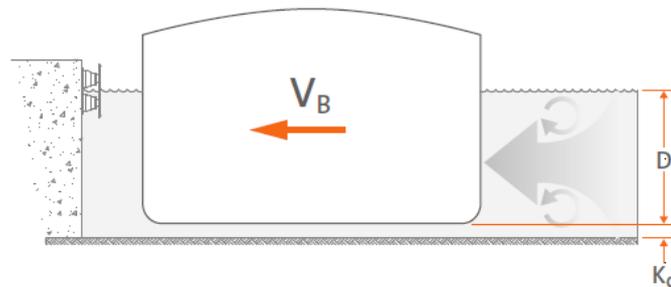


Figura 2.5 – Representação da massa de água que acompanha o navio no momento da atracação. (Fonte: Fender Team, 2015).

A PIANC apresenta duas equações para a determinação deste fator. A primeira por Costa (1964) (Eq. 2.8) e a segunda por Ueda (1981) (Eq. 2.9). Segundo a Fender Team, os valores obtidos através do método de Ueda são ligeiramente menores.

$$C_m = 1 + \frac{\pi * D}{2 * C_b * B} \quad (2.8)$$

$$C_m = 1 + \frac{2 * D}{B} \quad (2.9)$$

O fator de suavização ou de deformação, C_s , é determinado pela razão entre a elasticidade da defesa e do casco do navio. Assume-se que parte da energia cinética de atracação pode ser absorvida pela deformação do casco. As normas recomendam que C_s seja igual a 1,0 para defensas menos rígidas e C_s igual a 0,9 para defensas mais rígidas. Para determinar se uma defesa é rígida ou não, a BS 6349 indica que quando a deformação da defesa no momento do impacto for menor que 15 centímetros, a defesa é considerada rígida. No entanto, a PIANC sugere que na grande maioria dos casos a contribuição do casco na absorção de energia é limitado, este fator geralmente é considerado igual a 1,0.

Finalmente, o fator de configuração do cais, C_c , leva em conta a massa de água que fica presa entre o navio e a estrutura no momento da atracação e ajuda a reduzir a energia cinética. Este fator é influenciado pelo tipo de estrutura, ângulo de atracação, tipo de defesa, formato do casco do navio e pela folga sob a quilha. Basicamente, segundo a PIANC, em qualquer situação onde a água possa escapar facilmente do espaço entre o navio e a parede do cais, como em casos de atracação inclinada, grandes folgas sob a quilha ou em cais sobre estacas, não haverá redução de energia cinética e este fator é igual a 1,0.

2.2.2. Forças de Amarração

A correta amarração de uma embarcação requer que esta tenha a sua movimentação restrita a limites aceitáveis enquanto exposta às forças do vento, ondas, correntes e marés. No caso de cais de contêineres, esta restrição é significativamente importante visto que o manuseio dos contêineres não pode ser realizado se a embarcação estiver se movendo. Os esforços de amarração podem ser divididos então pelas forças devidas ao vento e forças devidas às correntes, nas direções transversal e longitudinal.

As forças devidas ao vento podem ser obtidas através da Eq. (2.10) e Eq. (2.11):

$$F_{TW} = C_{TW} * \rho_A * A_L * V_W^2 * 10^{-4} \quad (2.10)$$

$$F_{LW} = C_{LW} * \rho_A * A_L * V_W^2 * 10^{-4} \quad (2.11)$$

onde F_{TW} e F_{LW} são, respectivamente, as forças transversais e longitudinais devidas ao vento, em kN, C_{TW} e C_{LW} são os coeficientes transversais e longitudinais de força do vento, ρ_A é a densidade do ar, A_L é a área de projeção longitudinal do navio acima da linha d'água, em m², e V_W é a velocidade do vento 10 metros acima da linha d'água, em m/s.

Os coeficientes C_{TW} e C_{LW} são obtidos através de ábacos propostos pela própria norma, conforme a Fig. 2.6:

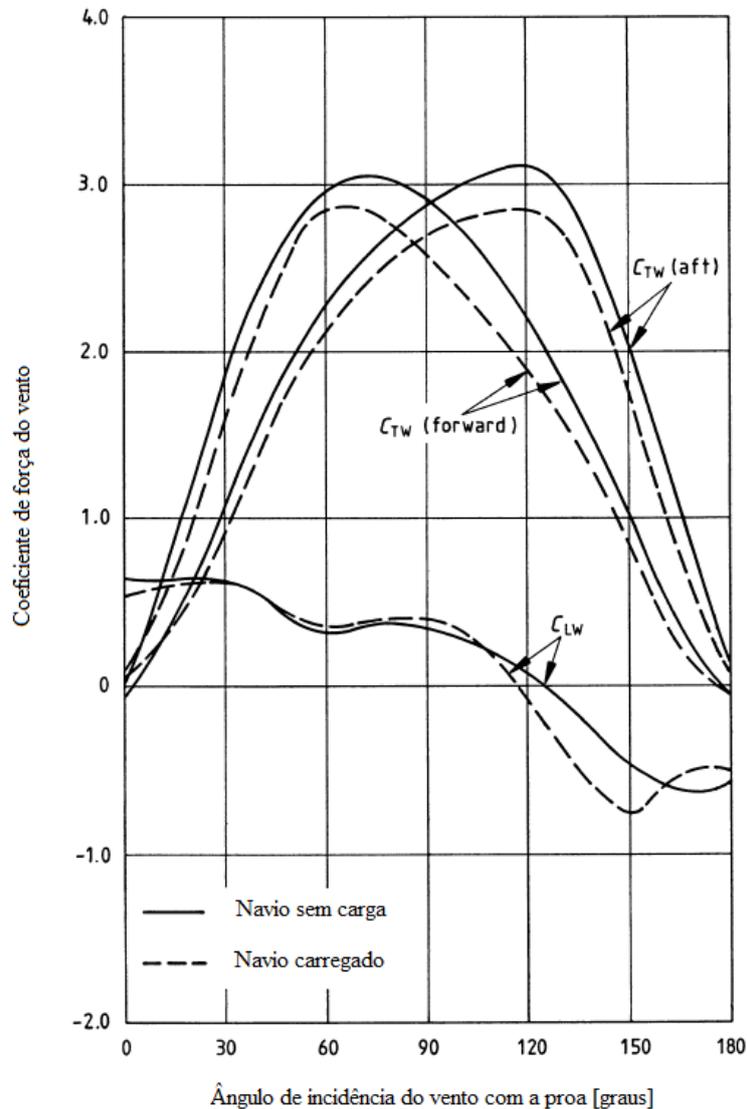


Figura 2.6 – Coeficientes de força do vento para navios porta-contêineres. (Fonte: adaptado de BSI, 2000).

A densidade do ar, ρ_A , pode variar de 1,3096 kg/m³ a 0 °C a 1,1703 kg/m³ a 30 °C.

A área de projeção longitudinal A_L pode ser obtida em PIANC (2002), que traz as dimensões das embarcações em função do DWT, para os casos onde a embarcação tipo é desconhecida. A Tab. 2.2 traz as dimensões de navios porta-contêineres com um limite de confiança de 75%. A referida tabela, no entanto, aborda apenas navios de pequeno e médio porte, não apresentando valores para navios maiores em operação atualmente.

Tabela 2.2 - Propriedades geométricas de porta-contêineres em função do DWT (Fonte: adaptado de PIANC, 2002).

| DWT [t] | M [t] | LOA [m] | LBP [m] | B [m] | FL [m] | DL [m] | Área vélica lateral [m ²] | | Área vélica frontal [m ²] | |
|------------|----------|------------|------------|----------|-----------|-----------|--|--------|--|--------|
| | | | | | | | Carregado | Lastro | Carregado | Lastro |
| 7000 | 10700 | 123 | 115 | 20,3 | 2,6 | 7,2 | 1460 | 1590 | 330 | 444 |
| 10000 | 15100 | 141 | 132 | 22,4 | 3,3 | 8,0 | 1880 | 1990 | 410 | 535 |
| 15000 | 22200 | 166 | 156 | 25,0 | 4,3 | 9,0 | 2490 | 2560 | 524 | 663 |
| 20000 | 29200 | 186 | 175 | 27,1 | 5,0 | 9,9 | 3050 | 3070 | 625 | 771 |
| 25000 | 36100 | 203 | 191 | 28,8 | 5,7 | 10,6 | 3570 | 3520 | 716 | 870 |
| 30000 | 43000 | 218 | 205 | 30,2 | 6,4 | 11,1 | 4060 | 3950 | 800 | 950 |
| 40000 | 56500 | 244 | 231 | 32,3 | 7,4 | 12,2 | 4970 | 4730 | 950 | 1110 |
| 50000 | 69900 | 266 | 252 | 32,3 | 8,4 | 13,0 | 5810 | 5430 | 1090 | 1250 |
| 60000 | 83200 | 286 | 271 | 36,5 | 9,2 | 13,8 | 6610 | 6090 | 1220 | 1370 |

A velocidade do vento V_W deve ser corrigida em função da duração média das rajadas, uma vez que as rajadas de 3 segundos, normalmente utilizadas em análises estruturais, não duram tempo suficiente para que os esforços ao longo dos cabos de amarração se desenvolvam. A BS 6349 fornece a seguinte relação (Eq. 2.12) para a velocidade média do vento em um minuto:

$$V_{W,1min} = 0,85 * V_{W,3s} \quad (2.12)$$

onde $V_{W,1min}$ é a velocidade média do vento em um minuto e $V_{W,3s}$ a velocidade de rajada de três segundos, ambas em m/s.

Outra correção necessária a ser feita para a velocidade do vento diz respeito à altura a ser considerada no projeto, visto que usualmente as velocidades de referência dos ventos são medidas a 10 metros de altura acima do nível do mar ou do terreno. A (Eq. 2.13) traz a relação recomendada por OCIMF (2000) e ASCE (2014):

$$V_{W,10m} = V_{W,h} \left(\frac{10}{h} \right)^{1/7} \quad (2.13)$$

onde $V_{W,10m}$ é a velocidade do vento a 10 m de altura [m/s], $V_{W,h}$ a velocidade do vento [m/s] na altura requerida h [m].

Os valores básicos para a velocidade do vento podem ser obtidos na NBR 6123:1988. Porém,

de acordo com Ramos (2016), o trabalho realizado por Beck e Corrêa (2013) inclui novos dados a respeito da velocidade dos ventos (Fig. 2.7), visto que a referida norma tem como base dados obtidos entre as décadas de 50 e 70. Entretanto, nenhuma destas duas fontes fornecem os dados estatísticos necessários para a consideração das forças do vento neste trabalho (média e desvio padrão, distribuições de probabilidade, etc.), de forma que elas são trazidas aqui apenas para efeito de comparação. Os valores adotados neste trabalho tiveram como base o trabalho realizado por Olinto, Pinto e Halal (2002) para a avaliação do potencial eólico da região costeira do extremo sul do estado do Rio Grande do Sul.

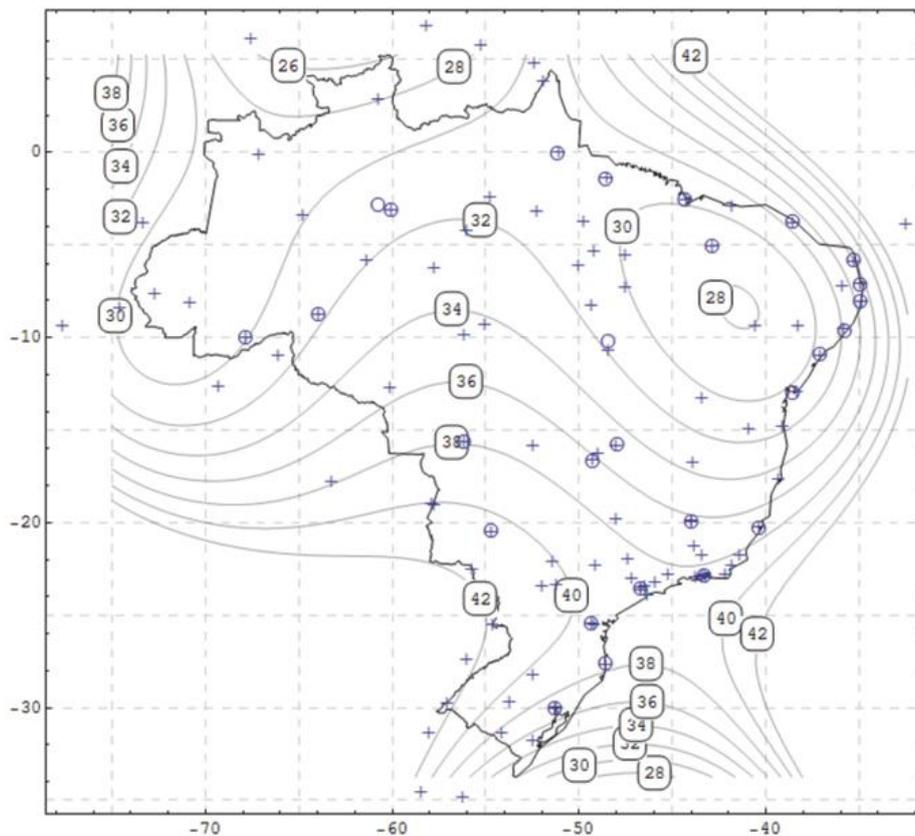


Figura 2.7 – Novo gráfico de velocidade característica do vento. (Fonte: Beck e Corrêa, 2013).

Para as forças de corrente transversais e longitudinais, a BS 6349 apresenta as seguintes equações (Eq. 2.13 e Eq. 2.14):

$$F_{TC} = C_{TC} * C_{CT} * \rho_W * L_{BP} * d_m * V'_C{}^2 * 10^{-4} \quad (2.13)$$

$$F_{LC} = C_{LC} * C_{CL} * \rho_W * L_{BP} * d_m * V'_C{}^2 * 10^{-4} \quad (2.14)$$

onde F_{TC} e F_{LC} são as forças transversais e longitudinais devido às correntes, em kN, C_{TC} e C_{LC} são os

coeficientes de força de arrasto, C_{TC} e C_{LC} os fatores de correção das forças de arrasto de acordo com a profundidade, ρ_w é a densidade da água, em kg/m^3 , L_{BP} é o comprimento entre perpendiculares, d_m o calado médio da embarcação e V'_C a velocidade média da corrente marítima, em m/s.

Assim como para as forças devidas ao vento, os coeficientes C_{TC} e C_{LC} e os fatores de correção C_{CTE} e C_{CCL} são obtidos a partir de ábacos disponibilizados pela norma, conforme as Figuras 2.8, 2.9 e 2.10:

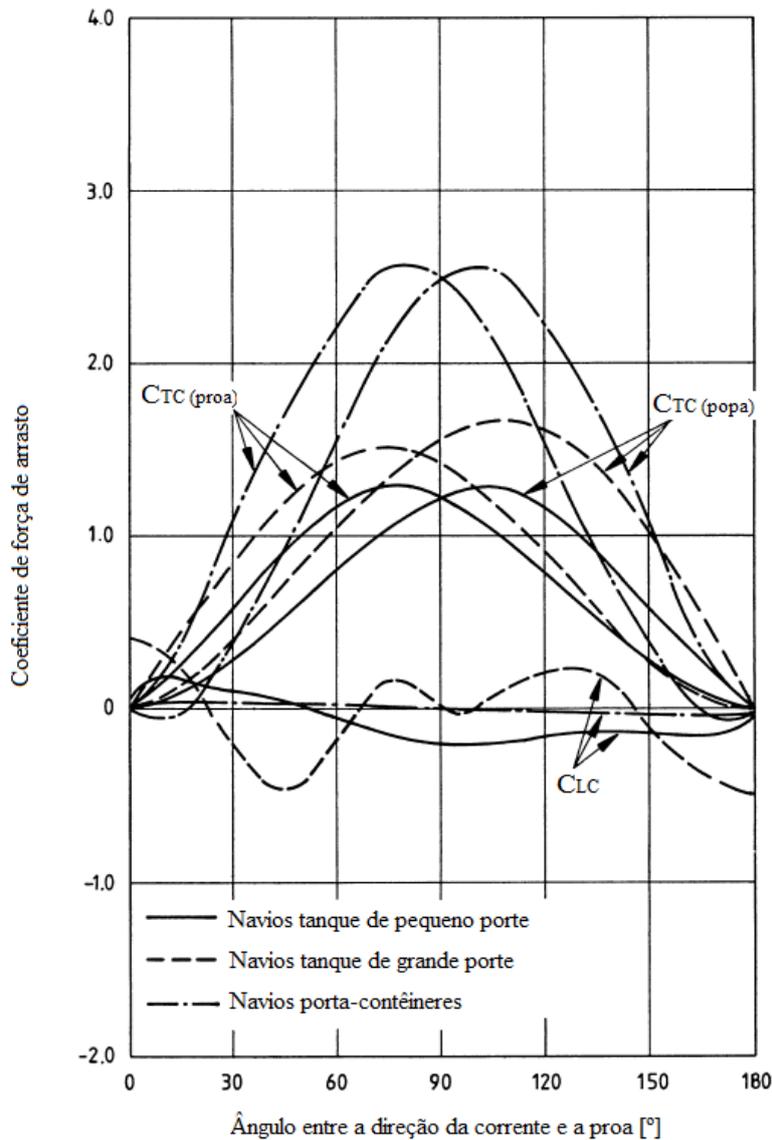


Figura 2.8 – Coeficientes de força de arrasto. (Fonte: adaptado de BSI, 2000).

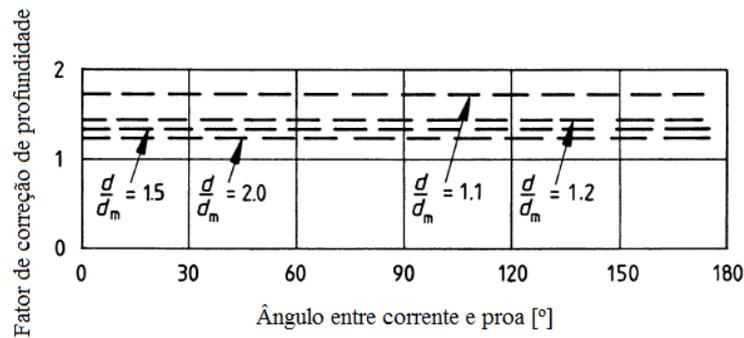


Figura 2.9 – Fator de correção de profundidade para forças longitudinais. (Fonte: adaptado de BSI, 2000).

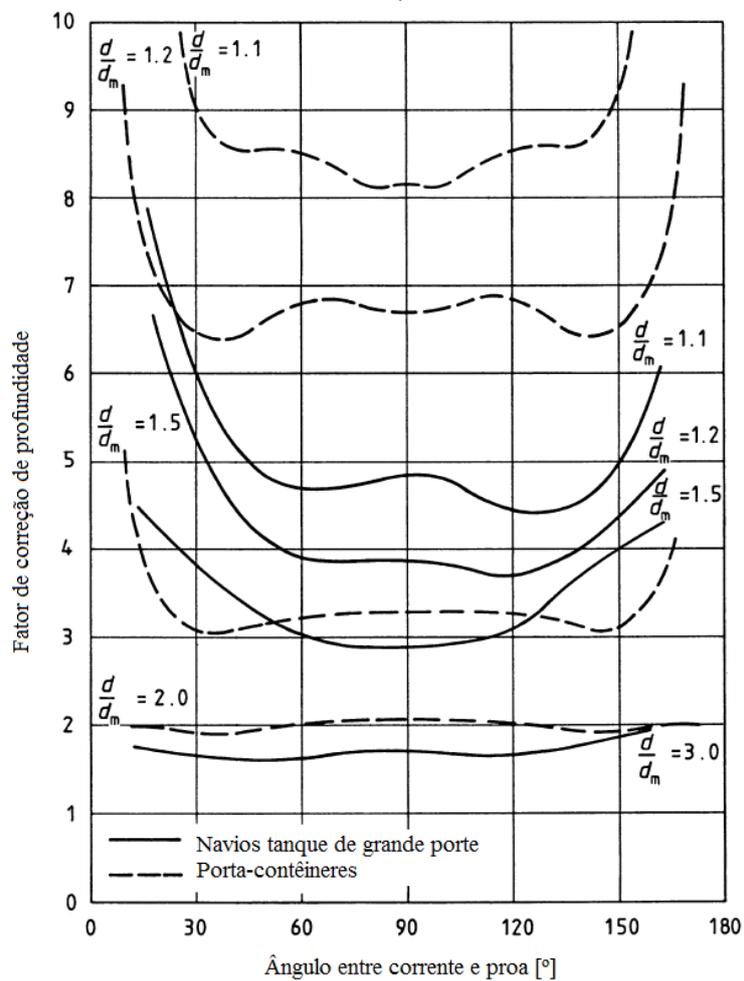


Figura 2.10 – Fator de correção de profundidade para forças transversais. (Fonte: adaptado de BSI, 2000).

Nas Figuras 2.9 e 2.10, os fatores de correção dependem da relação d/d_m , onde d é a profundidade da lâmina d'água e d_m é o calado médio do navio.

De posse das forças provenientes das correntes e dos ventos sobre a embarcação, pode-se calcular os esforços gerados nos cabeços de amarração, que irão efetivamente transmitir os esforços

para a estrutura do cais. A BS 6349 sugere alguns métodos de cálculo destes esforços, com o intuito de simplificar tais cálculos. Para uma situação geral, na falta de *softwares* capazes de calcular tais esforços, o método sugerido é que, para situações onde a embarcação esteja amarrada por seis cabos de amarração, cada cabeço deve ser projetado para suportar um terço da força transversal total aplicada. Para embarcações amarradas em quatro pontos, cada cabeço deve ser projetado para suportar metade da força transversal total.

2.2.3. Peso Próprio

O peso próprio de um cais de contêineres abrange toda a estrutura desde as estacas e vigas de sustentação até a superestrutura. Normalmente se considera o peso da estrutura sobre o ar e posteriormente se considera o empuxo exercido pela água (BSI, 2000).

2.2.4. Peso Próprio Sobreposto

Corresponde à carga fixa porém sem função estrutural, como trilho, pavimentação, passarelas, defensas, cabeços de amarração, etc. Em alguns casos até mesmo equipamentos com pouca mobilidade podem ser considerados, porém, para todas as combinações de carregamentos, a possibilidade de remoção de cargas sobrepostas deve ser considerada, conforme BSI (2000) e Civil Engineering Office (2004).

2.2.5. Sobrecarga

A sobrecarga corresponde principalmente ao tráfego de veículos leves, pessoal e armazenamento de cargas e equipamentos sobre a estrutura, além de possíveis ações acidentais durante sua vida útil. Tal sobrecarga depende, portanto, dos equipamentos utilizados na operação do porto e não do tamanho dos navios aportados (THORENSEN, 2014).

Na extinta NBR 9782 (ABNT, 1987), para terminais de contêineres era recomendada a utilização de 40 kN/m² para a sobrecarga distribuída. Este mesmo valor também é apontado em Thoresen (2014). Já em CH2MHILL (2014) este valor também é utilizado mas com um porém: na área ocupada por caminhões, equipamentos de carga e descarga, portêineres e guindastes móveis, a sobrecarga considerada é de apenas 300 psf, aproximadamente 15 kN/m². Uma configuração parecida é adotada em POLB (2012), onde a sobrecarga é de 300 psf quando combinada com guindastes de carga e descarga e 500 psf (aprox. 24 kN/m²) entre a área externa à embarcação e a linha de trilho externa.

Ramos (2016) destaca que a sobrecarga exerce uma grande influência nos esforços de compressão nas estacas (Fig. 2.11, onde Q_{SC} corresponde à sobrecarga). Por este motivo, um melhor

entendimento da configuração e da influência da sobrecarga sobre a estrutura pode levar a projetos mais seguros e econômicos.

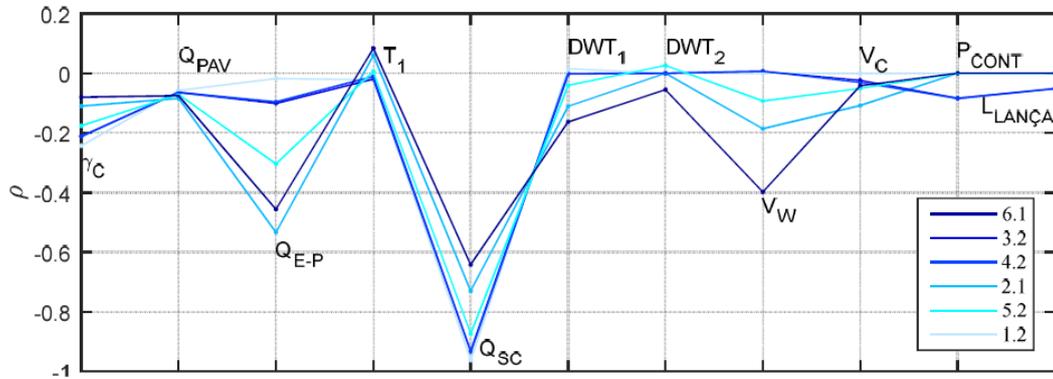


Figura 2.11 – Coef. de correlação entre esforços axiais máximos e variáveis aleatórias de entrada. (Fonte: Ramos, 2016).

2.2.6. Equipamentos

Em um cais de contêineres, os principais equipamentos em operação são os portêineres e os guindastes móveis (Fig. 2.12 e 2.13).

Portêineres são guindastes de grande porte utilizados na movimentação dos contêineres para dentro e fora da embarcação, podendo descarregar diretamente sobre os veículos de transporte de cargas. Este equipamento se apoia em rodas sobre trilhos, movendo-se apenas lateralmente ao longo da extensão do cais.



Figura 2.12 – Portêineres – *Ship to shore container cranes*. (Fonte: liebherr.com).



Figura 2.13 – Guindaste móvel do TECON Rio Grande. (Fonte: Jornal do Comércio, 2012).

Já os guindastes móveis são equipamentos que deslocam-se sobre rodas porém, em serviço, são patolados. Neste caso, todos os esforços gerados por ele são transferidos para a estrutura através das patolas.

Encontra-se na bibliografia valores de referência para as cargas provenientes destes equipamentos, no entanto o recomendado é que o carregamento seja definido a partir das especificações técnicas dos equipamentos efetivamente utilizados na estrutura, devido à existência de uma grande variedade dos mesmos.

2.2.7. Variação de Temperatura

Segundo Thoresen (2014), os efeitos decorrentes da variação de temperatura em estruturas de concreto armado devem ser considerados nos sentidos transversal e longitudinal da estrutura e podem ser obtidos a partir das normas locais. Neste caso, a NBR 6118 (ABNT, 2014) recomenda que a variação da temperatura seja considerada com uma oscilação de 10°C a 15°C em torno da temperatura média.

2.2.8. Empuxo de Terra

Normalmente em estruturas portuárias de paramento aberto são utilizadas paredes de contenção, que recebem esforços horizontais devido ao empuxo de terra e os transferem para a estrutura. Desta forma, o carregamento deve ser determinado de acordo com as teorias de mecânica dos solos e aplicado de acordo com a configuração estrutural do cais.

2.2.9. Ondas, Correntes e Ventos

Os esforços devidos à ação do ambiente diretamente sobre a estrutura são desprezados por serem de menor relevância em situações de estruturas de paramento aberto, que são naturalmente pouco suscetíveis a estas ações.

2.3. Análise Estrutural do Cais

O objetivo fundamental da análise estrutural é garantir que a estrutura resista ao carregamento imposto e mantenha a sua funcionalidade através de uma margem de segurança (CHANDRASEKARAN, 2016). Martha (2010) estabelece quatro estágios que integram o processo de análise estrutural: Estrutura real, modelo estrutural, modelo discreto e modelo computacional.

O primeiro passo dentro da análise é o conhecimento da estrutura real, de como ela é formada e construída. Aqui são estipuladas principalmente as propriedades físicas e geométricas dos materiais que integram a estrutura.

Já o modelo estrutural refere-se à forma como a estrutura será analisada, determinando um modelo simplificado que possa representar matematicamente a estrutura analisada em todos os seus aspectos relevantes, como características geométricas, apoios e esforços atuantes, principalmente. Este modelo é baseado em leis físicas, tais como o equilíbrio entre forças e tensões, as relações entre deslocamentos e deformações e as leis constitutivas dos materiais que compõem a estrutura.

O processo de criação do modelo estrutural depende da complexidade da estrutura real. Um edifício de pequeno porte, por exemplo, usualmente é formado por linhas que representam vigas e colunas e superfícies que representam as lajes.

Além disso, é nessa fase que podem ser adotadas algumas simplificações, de acordo com o nível de precisão requerido durante a análise. Considerações a respeito da geometria, condições de suporte e das solicitações que atuam sobre a estrutura geralmente são adotadas a fim de viabilizar a solução do problema.

O terceiro estágio diz respeito ao modelo discreto, concebido dentro das metodologias de cálculo dos métodos de análise. Neste momento, o modelo deixa de ter um comportamento analítico e passa a ter um comportamento discreto, em um processo de discretização. A partir daí, é possível buscar uma solução numérica para o problema, normalmente através do método de elementos finitos (MEF). Para estruturas mais simples, formadas apenas por barras por exemplo, os nós que definem os valores discretos são os próprios pontos de encontro das barras. Já no caso de estruturas contínuas, os nós são obtidos através da discretização do modelo em uma malha de elementos finitos.

Apesar do MEF ser de longe o método mais utilizado, outros podem ser implementados como o método dos elementos de contorno. Já para áreas de problemas não estruturais, como a mecânica dos fluidos e eletromagnetismo, o método das diferenças finitas e o método dos volumes finitos são igualmente utilizados.

A análise estrutural completa termina com a criação de um modelo computacional da

estrutura, através de *softwares* criados para desenvolver a solução numérica de problemas relacionados à engenharia, usualmente baseados no método dos elementos finitos. Segundo Ramos (2016), encontra-se no mercado diversos *softwares* baseados no método dos elementos finitos, entre eles o ABACUS, SAP2000, NASTRAN e o ANSYS, que é o programa utilizado neste trabalho.

2.3.1. Estados Limites

Thoresen (2014) e Chandrasekaran (2016) citam que, atualmente, as combinações de carregamentos são divididas em quatro estados limites, de acordo com o mecanismo de falha:

- Estado limite último, que se refere ao máximo carregamento suportado pela estrutura, ocasionado falhas estruturais locais e globais e grandes deslocamentos, consequentemente levando à perda total de sustentação;
- Estado limite de fadiga, que indica danos causados por eventos cíclicos, geralmente oriundos de ventos, ondas, correntes, equipamentos, etc.;
- Estado limite acidental, relacionado ao colapso da estrutura após ocorrências extraordinárias, de modo que partes da estrutura podem ser expostas a um carregamento maior que a capacidade projetada;
- Estado limite de serviço, que corresponde à utilização e durabilidade normais da estrutura.

Estes estados limites representam diferentes situações de carregamento que a estrutura deve ser capaz de suportar durante a sua vida útil. São implementados aqui fatores de segurança e fatores de simultaneidade diferentes para cada combinação.

Os fatores de segurança são aplicados de acordo com a probabilidade de que uma determinada carga exceda o seu valor característico, enquanto que os fatores de simultaneidade leva em conta a probabilidade de que diversas sobrecargas diferentes ocorram com seus valores máximos simultaneamente, aliviando o carregamento total da estrutura.

Este método baseado em valores característicos e coeficientes parciais de segurança representa uma abordagem semiprobabilística do problema e sua solução é obtida de maneira analítica.

2.3.2. Método dos Elementos Finitos e o software ANSYS

O método dos elementos finitos (MEF) é um método numérico utilizado na solução de modelos computadorizados discretos. Ao contrário dos modelos contínuos, os modelos discretos são formados por um número finito de elementos que, com o surgimento de computadores cada vez mais poderosos, podem ser facilmente resolvidos de maneira rápida, mesmo com uma grande quantidade de elementos. Os modelos contínuos, por sua vez, podem ser resolvidos apenas através de manipulações matemáticas, o que limita a sua utilização a problemas relativamente simples (ZIENKIEWICZ, 2000).

O MEF faz parte do campo da mecânica, que pode ser dividido da seguinte maneira:

$$\text{Mecânica} \left\{ \begin{array}{l} \textit{Teórica} \\ \textit{Aplicada} \\ \textit{Computacional} \\ \textit{Experimental} \end{array} \right.$$

A *mecânica teórica* trata do estudo das leis e princípios fundamentais que regem os fenômenos físicos. A *mecânica aplicada* transfere este conhecimento para a prática científica e de engenharia, principalmente com a elaboração de modelos matemáticos que representem as diferentes situações encontradas. A *mecânica computacional*, onde se encontra o método dos elementos finitos, tem como objetivo solucionar problemas específicos de maior complexidade através de métodos numéricos implementados e resolvidos de maneira digital. Por fim, a *mecânica experimental* coloca todo o conhecimento teórico, aplicado e computacional à prova através do teste e observação.

A subdivisão de sistemas em componentes individuais menores, ou elementares, cujo comportamento pode ser facilmente compreendido, remete à própria limitação da mente humana que por vezes não é capaz de entender de maneira única um sistema complexo (ZIENKIEWICZ, 2000). Este processo, portanto, é largamente utilizado em diversas áreas do conhecimento. Ainda buscando classificar o método dos elementos finitos, pode-se restringir o FEM à mecânica estrutural e computacional da seguinte maneira:

$$\text{FEM} - \text{Mecânica estrutural e computacional} \left\{ \begin{array}{l} \textit{Formulação da Mecânica dos Materiais} \\ \textit{Formulação Variacional Convencional} \\ \textit{Formulação Variacional Avançada} \end{array} \right.$$

A mecânica dos materiais é aplicável para elementos estruturais mais simples como vigas e barras, não aplicando nenhum conhecimento de cálculo variacional. É a abordagem estudada durante a graduação fundamentada basicamente em álgebra linear.

O segundo nível é caracterizado pela utilização dos princípios básicos de trabalho e energia e a aplicação dos conceitos de métodos variacionais diretos de Ritz-Galerkin, que oferece uma solução aproximada para equações diferenciais parciais em problemas de valores de contorno.

De maneira simplificada, portanto, pode-se definir o MEF como a subdivisão de uma estrutura contínua em um determinado número de subdomínios, denominados elementos finitos, geralmente planos, em formato triangular ou quadrilátero. O conjunto de todos estes elementos forma uma malha, que representa de maneira discreta o modelo contínuo. A solução desta malha discreta consiste na determinação dos deslocamentos de cada nó da malha, formados pelo encontro dos vértices dos referidos elementos. A Fig. 2.14 mostra a representação geométrica de alguns dos elementos mais utilizados:

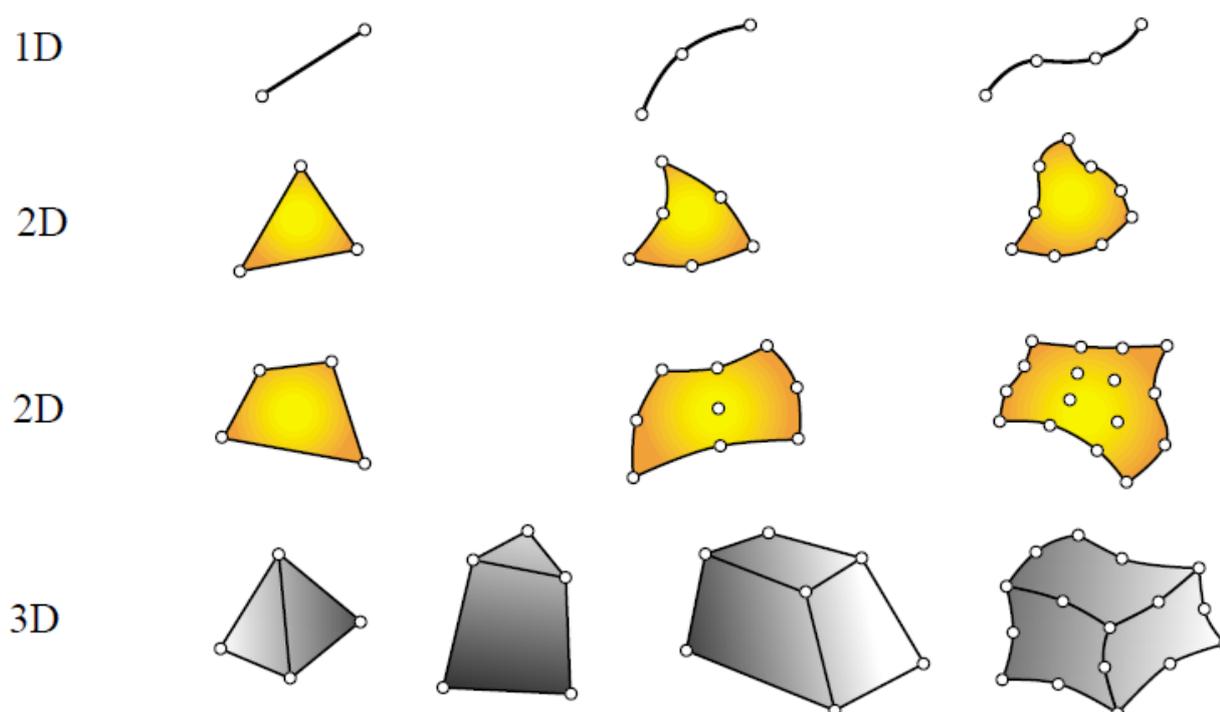


Figura 2.14 – Geometrias típicas de elementos finitos em uma, duas e três dimensões.

Neste trabalho, o modelo gráfico computacional utilizado para representar a estrutura a ser estudada, discretizada e solucionada através do MEF foi elaborado com a utilização do *software* ANSYS – já mencionado anteriormente neste trabalho como uma das principais ferramentas para a análise de estruturas baseada no MEF disponíveis no mercado – baseado no modelo desenvolvido e verificado por Ramos (2016). O ANSYS oferece diversos tipos de elementos finitos, conforme já foi exemplificado na Fig. 2.14. A forma como a estrutura real será representada computacionalmente e consequentemente a escolha do tipo de elemento a ser utilizado interfere diretamente nos resultados obtidos. Neste caso, a estrutura foi idealizada e modelada através de elementos de viga. Deste modo a laje superior foi considerada como parte das vigas transversais, alterando as propriedades geométricas das últimas – área da seção transversal, rigidez e peso próprio.

Desta maneira eliminou-se a necessidade de utilizar elementos mais complexos durante a modelagem, sendo possível utilizar em todo o modelo o mesmo elemento linear, ou elemento de viga. O elemento escolhido foi o *Beam189* (Fig. 2.15) que, de acordo com ANSYS (2016), trata-se de um elemento indicado para a análise de vigas delgadas até vigas moderadamente espessas, podendo ser utilizada com qualquer seção transversal, o que se encaixa nas necessidades deste trabalho, cuja estrutura possui diferentes seções para cada uma das vigas, além das estacas.

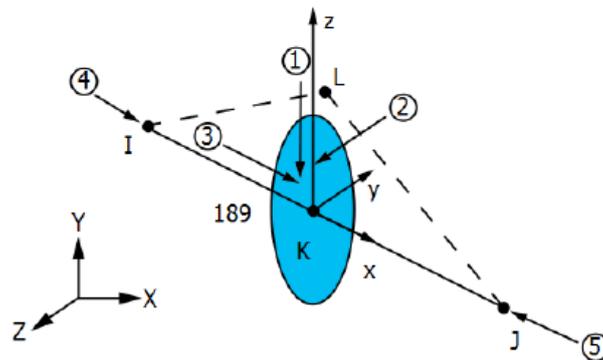


Figura 2.15 – Elemento *Beam189*. (Fonte: ANSYS, 2016).

Outra propriedade importante é que este é um elemento de viga baseado na teoria de Timoshenko para vigas, o que implica que a tensão de cisalhamento é constante em uma seção transversal da viga e portanto a seção permanece plana após a deformação. ANSYS (2016) recomenda que a esbeltez da viga seja verificada através da Eq. (2.15) e que este valor seja maior que 30.

$$30 \leq \frac{G * A * L^2}{EI} \quad (2.15)$$

onde G é o módulo de cisalhamento, A é a área da seção transversal, L o comprimento da seção transversal e EI a rigidez da viga.

2.4. Análise Probabilística

O projeto de estruturas em engenharia civil se dá basicamente através da comparação entre duas grandezas (MULLER E ALBERTINI, 2015): a solicitação S e a capacidade resistente R . A solicitação S pode ser qualquer tipo de esforço solicitante, como um momento fletor em uma viga sujeita a diversos carregamentos. A capacidade resistente R seria então a deflexão máxima ou o esforço cortante máximo que esta viga pode sofrer. Dizer que uma estrutura foi corretamente projetada significa afirmar que a sua capacidade resistente é maior do que a maior solicitação possível.

Em outras palavras, podemos afirmar que a segurança estrutural é garantida quando $R > S$, ao passo que a falha ocorrerá se em algum momento $R < S$.

A maneira mais comum de se fazer tal verificação é através de uma análise semiprobabilística, onde comparamos os valores de resistência de projeto R_d com o respectivo valor solicitante de projeto S_d .

Ambos os valores são ponderados através de fatores de segurança. Assim, R_d é o valor da resistência do material R dividido por um fator de segurança γ_R que leva em conta simplificações utilizadas na análise, incertezas e variações das propriedades do material ou da execução da obra, entre outros fatores. Já a solicitação de projeto S_d é majorada, também em função de simplificações e incertezas quanto ao seu valor exato. Além disso, no caso de várias ações agindo em uma mesma estrutura, fatores parciais são utilizados para diferenciar solicitações predominantes e secundárias.

A análise semiprobabilística é chamada desta forma justamente pelo fato de que tanto a resistência quanto a solicitação possuem valores fixos, obtidos a partir de um valor característico e modificados através de coeficientes de segurança. Porém em determinadas situações a variabilidade das grandezas envolvidas precisa ser considerada, de forma que uma análise probabilística precisa ser realizada.

Além de assegurar a segurança estrutural, a análise probabilística dá ao projetista a possibilidade de se quantificar a confiabilidade da estrutura e, por consequência, determinar a probabilidade de falha e o risco envolvido neste caso. Esta abordagem normalmente gera resultados mais realísticos e precisos, possibilitando projetos menos conservativos, com menor uso de material e possivelmente menos despesas. Da mesma forma, pode-se utilizar o mesmo tipo de análise para a determinação da confiabilidade estrutural, probabilidade e risco de falha de estruturas já existentes.

Por fim, a análise probabilística também é utilizada para a obtenção dos coeficientes de segurança utilizados nos métodos determinísticos.

Versteegt (2013) traz níveis de classificação para as diferentes abordagens possíveis ao se dimensionar uma estrutura:

- Nível I: Trata-se dos métodos semiprobabilísticos onde a variabilidade das ações e resistências dos materiais é considerada na forma dos coeficientes parciais de segurança, obtidos a partir de métodos probabilísticos de nível II ou III.
- Nível II: Corresponde a uma série de métodos probabilísticos utilizados na determinação da probabilidade de falha e da confiabilidade da estrutura. São métodos mais simples onde toda a distribuição de probabilidade de todas as ações variáveis presentes na análise são aproximadas para uma distribuição normal.

- Nível III: Este nível é utilizado para calcular a confiabilidade e a probabilidade de falha de estruturas considerando as funções densidade de probabilidade de todas as grandezas envolvidas. A solução da estrutura é obtida através de simulação computacional.

Pode ser considerado ainda um Nível 0, que seria um método explicitamente determinístico, sem a utilização de coeficientes parciais de segurança. São empregados apenas coeficientes globais, obtidos empiricamente.

Durante o desenvolvimento de análises probabilísticas, Muller e Albertini (2015) destacam três conceitos básicos a serem aplicados:

- Função densidade de probabilidade;
- Função distribuição acumulada;
- Distribuições de probabilidade (normal, lognormal, valores extremos, etc.).

2.4.1. Função Densidade de Probabilidade

A função densidade de probabilidade (PDF – *probability density function*) é uma função que representa a probabilidade relativa de uma determinada variável aleatória assumir um valor qualquer dentro de um determinado intervalo, baseado no valor médio e no desvio padrão desta variável. No caso de variáveis aleatórias contínuas, como as que serão utilizadas neste trabalho, a variável possui zero de probabilidade de assumir exatamente um determinado valor. Walpole et. al. (2007) traz como exemplo a probabilidade de que entre todas as pessoas com 21 anos de idade no mundo, alguma delas meça exatamente 1,64 m, pois, entre os números 1,6399 e 1,6401 existem infinitos valores possíveis, de modo que a probabilidade de encontrarmos este exato valor é considerada zero.

Logo, a função densidade de probabilidade f_x para uma variável aleatória contínua X representa a probabilidade de que ela assuma um valor dentro de um intervalo ou seja maior ou menor que um certo valor, conforme a Eq. (2.16):

$$P(a < X < b) = \int_a^b f_x(x)dx \quad (2.16)$$

2.4.2. Função Distribuição Acumulada

A função distribuição acumulada (CDF – *cumulative distribution function*) de uma variável aleatória X representa a probabilidade de X assumir um valor qualquer igual ou menor que x . Para distribuições contínuas, a função distribuição acumulada $F_X(x)$ pode ser representada também como a área abaixo da função densidade de probabilidade entre $-\infty$ e x , de acordo com a Eq. 2.17):

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_x(t) dt \quad (2.17)$$

2.4.3. Distribuições de Probabilidade

Nesta seção serão abordadas algumas das distribuições de funções densidade de probabilidade que representam as variáveis aleatórias consideradas neste trabalho.

Distribuição Uniforme

A mais simples distribuição contínua é a distribuição uniforme. Sua principal característica é uma função densidade horizontal, implicando que a probabilidade de uma variável aleatória assumir valores dentro de um determinado intervalo é uniforme (WALPOLE et. al., 2007). A Eq. (2.18) descreve esta função e a Fig. 2.15 traz a sua função densidade de probabilidade:

$$f_x(x) = \frac{1}{(b - a)}, a \leq x \leq b \quad (2.18)$$

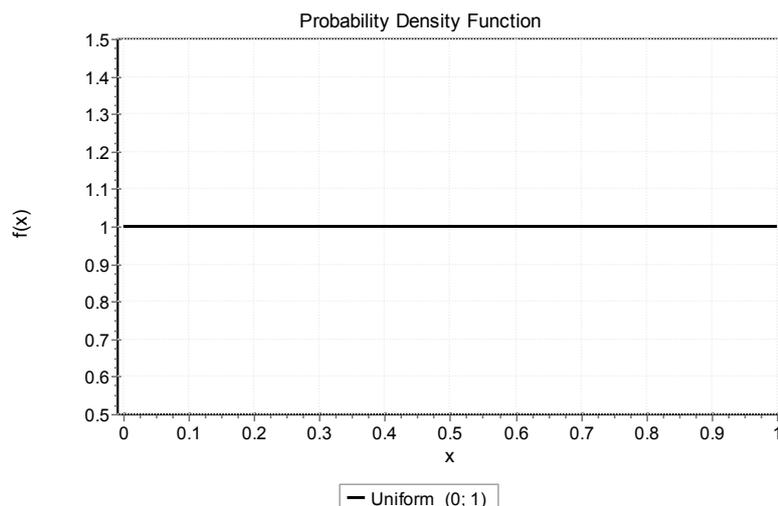


Figura 2.16 – Distribuição Uniforme.

Distribuição Normal ou Distribuição Gaussiana

A distribuição normal é sem dúvida a mais relevante de todas as distribuições de probabilidade. A sua função é capaz de descrever inúmeros fenômenos observados na natureza,

indústria, pesquisas, etc. Os erros calculados em experimentos científicos também podem ser aproximados por uma distribuição normal. Esta distribuição também é chamada de gaussiana em homenagem a Karl Friedrich Gauss (1777 – 1855).

A função $f(x)$ que representa esta distribuição – Eq. (2.19) – é dada por:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma * \sqrt{2 * \pi}} * e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2*\sigma^2}}, -\infty < x < \infty \quad (2.19)$$

onde μ é a média e σ é o desvio padrão que caracterizam a distribuição. A Fig. 2.17 traz a função densidade de probabilidade desta distribuição.

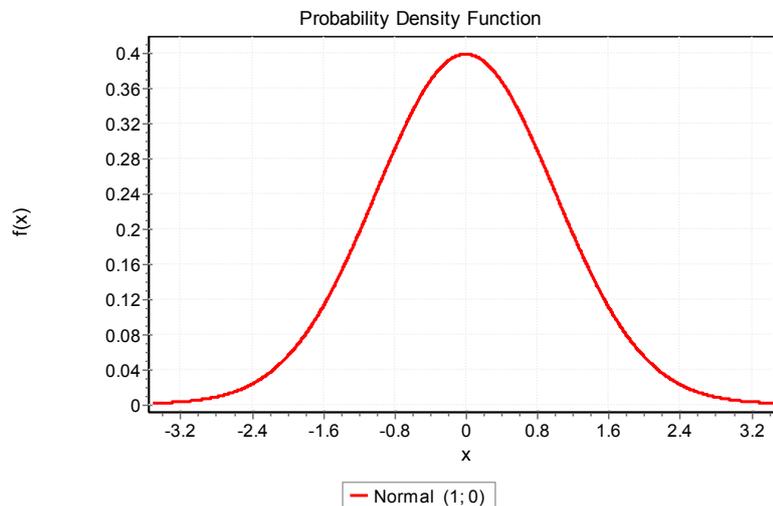


Figura 2.17 – Distribuição Normal.

Distribuição Beta

A distribuição Beta para uma variável aleatória X está definida dentro do intervalo $(0, 1)$. Esta distribuição pode ser generalizada para qualquer variável aleatória Y restrita a um intervalo finito (m, n) através da relação mostrada na Eq. (2.20).

$$Y = (n - m) * X + m \quad (2.20)$$

Esta distribuição é definida por dois parâmetros de forma, α e β , e sua função de densidade para valores entre 0 e 1 é escrita conforme a Eq. (2.21).

$$f_x(x) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} * x^{\alpha-1} * (1 - x)^{\beta-1} \quad (2.21)$$

A Fig. 2.18 traz a função densidade de probabilidade para uma distribuição Beta genérica:

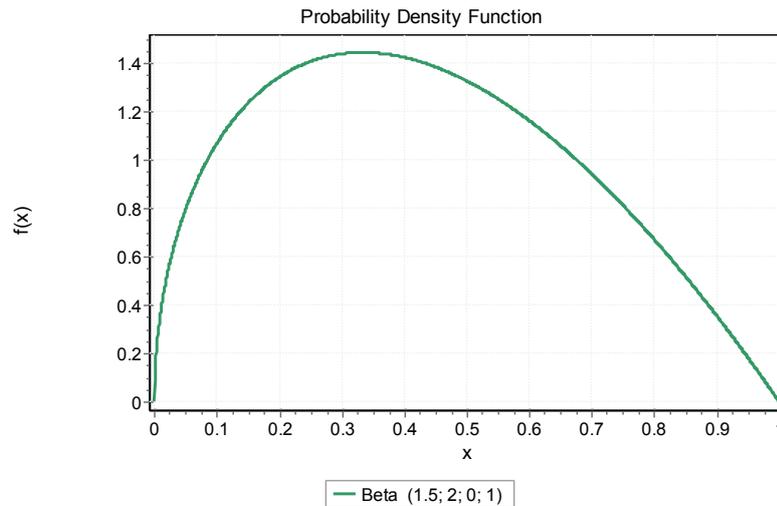


Figura 2.18 – Distribuição Beta.

Distribuição de Weibull (Distribuição de Valores Extremos Tipo III)

Esta distribuição é largamente utilizada em estudos de confiabilidade para representar fenômenos relacionados à vida útil de elementos, probabilidades de falha, etc. Também representa muito bem fenômenos naturais como a velocidade do vento e a magnitude de terremotos.

A função densidade f_x e a distribuição de probabilidade F_X que a representa são escritas conforme a Eq. (2.22) e Eq. (2.23):

$$f_x(x) = \left(\frac{k}{\lambda}\right) * \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} * e\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k\right], x \geq 0 \quad (2.22)$$

$$F_X(x) = 1 - e\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k\right], x \geq 0 \quad (2.23)$$

onde κ e λ são os parâmetros de forma e escala, respectivamente. A Fig. 2.19 mostra a função densidade de probabilidade de uma distribuição Weibull:

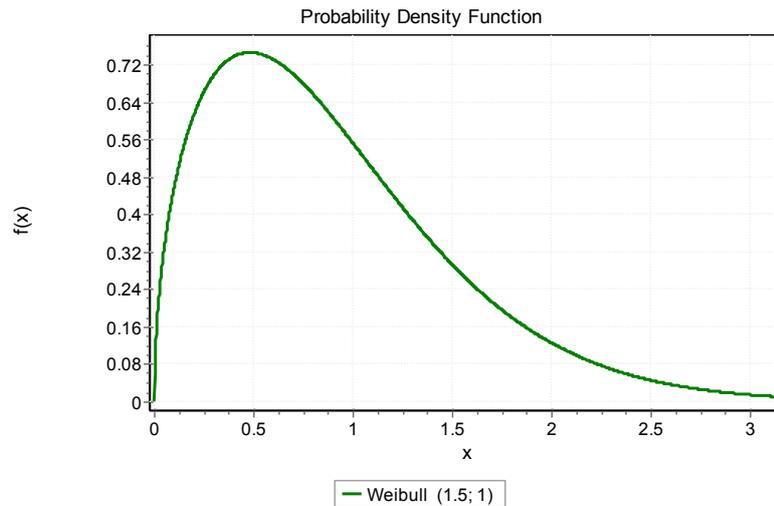


Figura 2.19 – Distribuição Weibull.

Distribuição de Gumbel (Distribuição de Valores Extremos Tipo I)

A distribuição de Gumbel também é uma distribuição de valores extremos que se assemelha à distribuição de Weibull. Na verdade, quando se toma o logaritmo de uma variável aleatória com distribuição Weibull, tem-se a distribuição de Gumbel, Eq. (2.24):

$$Y = \log(X) \quad (2.24)$$

onde Y é a variável com distribuição de Gumbel e X é a variável com distribuição de Weibull.

A função densidade de probabilidade da distribuição de Gumbel é mostrada na Eq. (2.25) e na Fig. 2.20:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma} * e^{\left[\frac{x-\mu}{\sigma} - e^{\left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)} \right]}, x \in (-\infty, \infty) \quad (2.25)$$

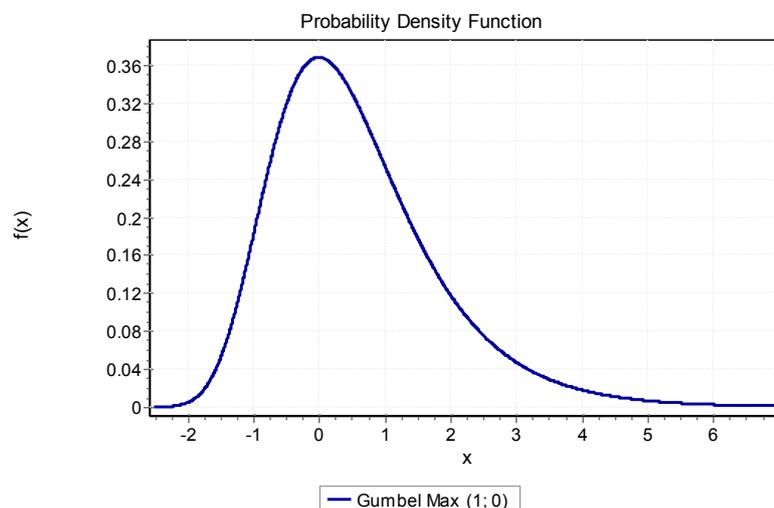


Figura 2.20 – Distribuição Gumbel.

Distribuição Log-normal

A distribuição log-normal é tal que se Y é uma variável aleatória com distribuição normal, X possui uma distribuição log-normal através da seguinte relação:

$$X = \exp(Y) \quad (2.26)$$

A Eq. (2.27) e a Fig. 2.21 trazem a função densidade de probabilidade para esta distribuição:

$$f_x(x) = \frac{1}{\zeta * x * \sqrt{2 * \pi}} * e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right]}, x \geq 0 \quad (2.27)$$

onde ζ e λ são parâmetros que definem esta função, obtidos através das Eq. (2.28) e (2.29):

$$\zeta = \sqrt{\text{Var}(\ln X)} \quad (2.28)$$

$$\lambda = E(\ln X) \quad (2.29)$$

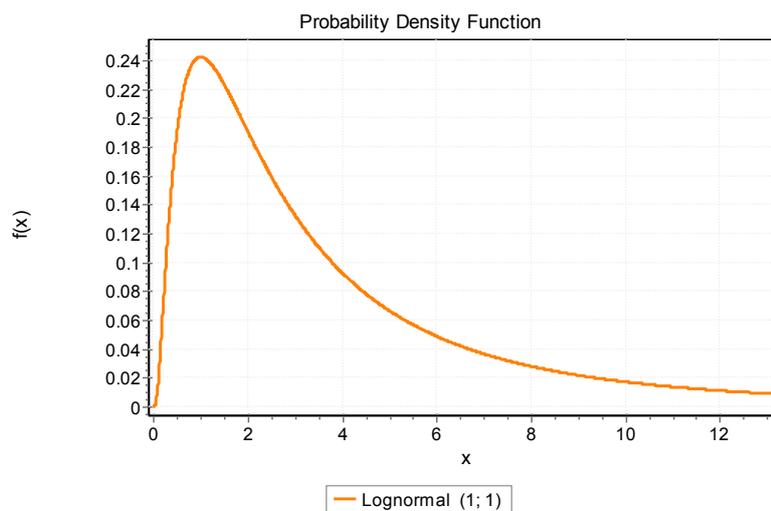


Figura 2.21 – Distribuição Lognormal.

2.4.4. Testes de Aderência

O ajuste de um determinado conjunto de dados a uma distribuição de probabilidade que melhor represente este conjunto é um processo importante ao se realizar uma análise probabilística com variáveis de entrada aleatórias. Estes métodos usualmente medem a discrepância entre os valores observados e os valores esperados para a distribuição testada. Neste trabalho, o teste escolhido para se determinar o melhor ajuste de distribuição tanto para variáveis de entrada como para valores de saída obtidos após a realização das simulações foi o de Kolmogorov-Smirnov, que atualmente é o teste mais popular utilizado para esta finalidade (ARNOLD e EMERSON, 2011).

A estatística do teste, definida na Eq. (2.30), quantifica a discrepância máxima entre a função distribuição empírica $F_{data}(x)$ e a função distribuição acumulada da distribuição de referência $F_0(x)$, ou entre duas funções distribuição empíricas.

$$D = \sup_x |F_0(x) - F_{data}(x)| \quad (2.30)$$

A Fig. 2.22 mostra de maneira mais compreensível como a discrepância é verificada:

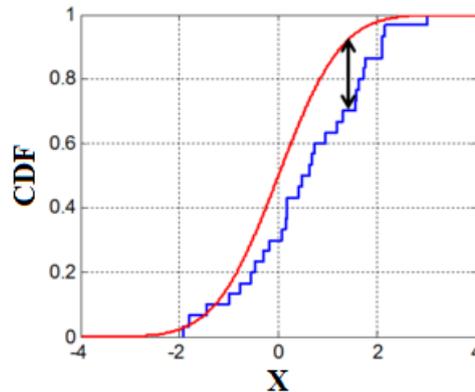


Figura 2.22 – Visualização do teste de Kolmogorov-Smirnov.

2.4.5. Teorema do Limite Central

Este teorema determina, de maneira generalizada, o que acontece quando se tem a soma de um grande número de variáveis aleatórias independentes onde cada uma delas dá uma pequena contribuição para o resultado final. Nestes casos, observa-se que a função distribuição desta soma aproxima-se a uma função densidade normal (GRINSTEAD E SNELL, 2006). O teorema inclusive pode ser verdadeiro, sob certas condições, mesmo nas situações onde as variáveis aleatórias possuem diferentes distribuições de probabilidade, situação observada neste trabalho.

2.5. O Método de Monte Carlo

A análise probabilística requer que sejam obtidas várias soluções para o mesmo problema. Dentre as opções disponíveis para se executar tal tarefa, o método de Monte Carlo é sem dúvida o mais utilizado.

O método de Monte Carlo é um tipo de simulação iterativa baseado em variáveis aleatórias e análises estatísticas para computar os resultados do modelo numérico simulado (RAYCHAUDHURI, 2008). O autor descreve quatro etapas que são usualmente executadas ao se realizar uma simulação de Monte Carlo de um processo físico:

- Geração de um Modelo Estático: a simulação parte de um modelo determinístico ou semiprobabilístico a partir do qual serão realizadas n simulações com diferentes valores de entrada, o que deve produzir diferentes resultados de saída.
- Identificação da Distribuição das Variáveis de Entrada: as variáveis de entrada devem ser consideradas de acordo com as distribuições de probabilidade que as governam. Este processo requer o uso de trabalhos anteriores ou de dados históricos dos dados de entrada para que se possa utilizar a distribuição que melhor se ajusta à variável.
- Geração dos Valores Aleatórios: após a determinação das distribuições dos valores de entrada, cada um destes valores deve ser escolhido aleatoriamente e aplicado ao modelo estático, resultando em um ou mais valores de saída que representam a solução determinística ou semiprobabilística daquele modelo. Esta é a etapa fundamental do método e será discutida posteriormente.
- Análise dos Resultados: após a realização de n simulações, os valores de saída do modelo são computados e analisados estatisticamente, podendo-se determinar, por exemplo, a distribuição, valores médios e desvio padrão dos próprios resultados de saída.

2.5.1. Geração de Valores Aleatórios

A obtenção dos valores aleatórios dos dados de entrada deve ser tal que dois valores iguais não sejam escolhidos e que a escolha seja o mais uniforme possível dentro do espaço amostral. O *software* ANSYS fornece, dentro da ferramenta *Probabilistic Design System* (PDS) diferentes métodos de amostragem. Ribeiro et. al. (2016) e Ramos (2016) comparam os métodos de amostragem direta e amostragem por *Latin Hypercube*, mostrando que o último reduz consideravelmente o número de simulações necessárias para atingir a convergência.

3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta o processo metodológico utilizado para a obtenção dos resultados.

3.1. Estudo de Caso

Este trabalho analisa um módulo de um cais de paramento aberto localizado no Terminal de Contêineres do Porto de Rio Grande (TECON), situado no município de Rio Grande, na região do estuário da Laguna dos Patos, conforme mostrado na Fig. 3.1.



Figura 3.1 – Situação TECON Rio Grande. (Fonte: Google Earth, 2017).

O cais, de 900,00 metros de comprimento e 23,14 metros de largura, é dividido em 18 módulos iguais de 50,00 metros de comprimento cada, sendo um destes módulos o objeto de estudo deste trabalho (Fig. 3.2 e 3.3). Cada módulo conta com duas defensas e dois cabeços de amarração. Vale ressaltar que nestas figuras estão representados os principais elementos estruturais. Soma-se à esta estrutura ainda elementos de concreto realizados *in situ* e a pavimentação do cais, além do aterro localizado no lado de terra do cais, suportado por estacas-prancha.

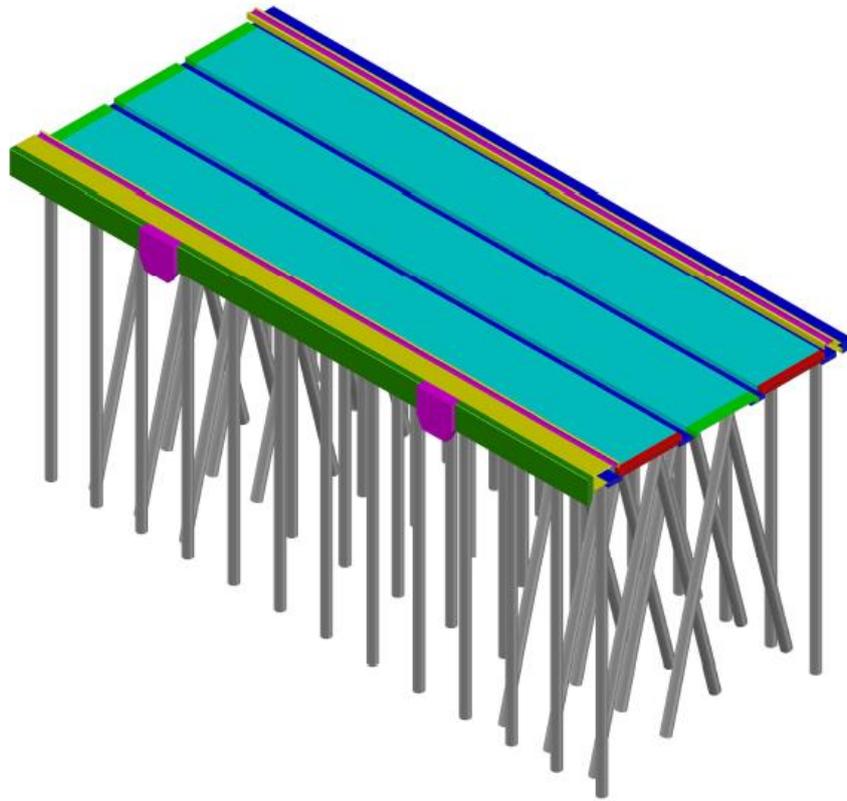
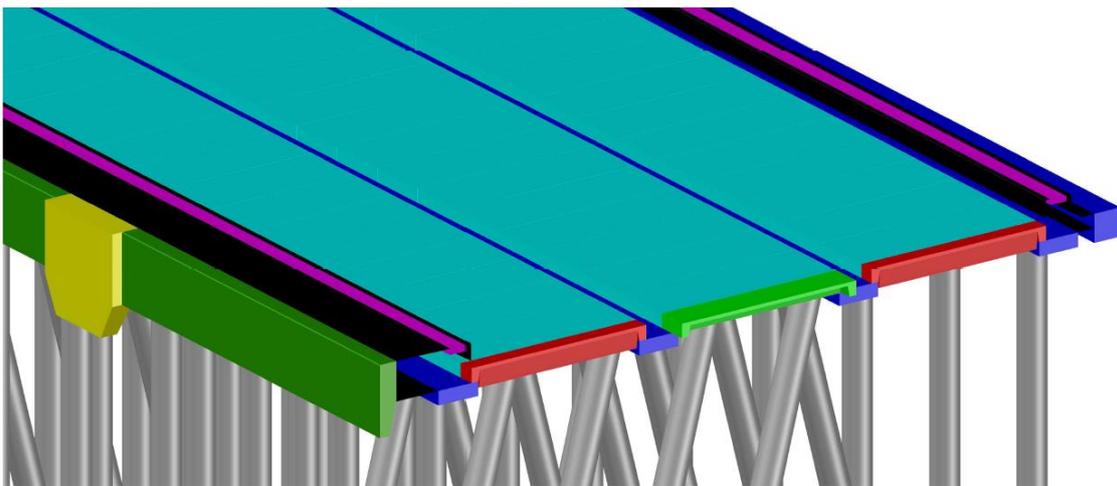


Figura 3.2 – Representação gráfica de um dos módulos do cais (não representa o modelo computacional).



- Vigas transversais tipo pi
- Viga longitudinal de paramento
- Viga long. De paramento na região das defensas
- Vigas transversais de ligação
- Vigas longitudinais
- Vigas transversais de ligação
- Trilhos de movimentação dos portêñeres

Figura 3.3 – Representação gráfica de um dos módulos do cais – detalhe (não representa o modelo computacional).

Na Fig. 3.2 também é possível observar as 60 estacas de fundação que sustentam a superestrutura. A planta de locação das estacas e sua respectiva numeração pode ser observada na Fig. 3.4. Estas estacas são protendidas, de seção tubular vazada com diâmetro externo de 0,80 m e 0,30 m de espessura. Nota-se a presença de estacas inclinadas com uma razão de 1/4, responsáveis por suportar com mais facilidade os esforços transversais atuantes na estrutura. Além disso, algumas estacas (estaca número 32, por exemplo) também apresentam uma rotação de 3°, sempre em direção ao centro do módulo.

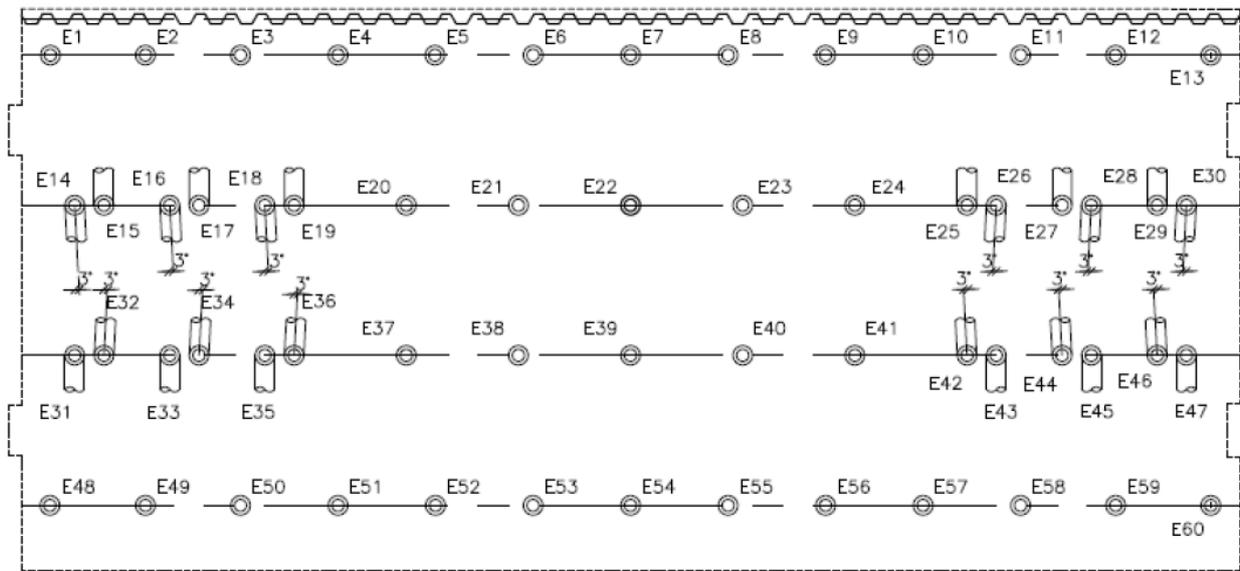


Figura 3.4 – Planta de locação das estacas (Fonte: Memorial de Cálculo do cais do TECON Rio Grande).

3.2. Modelo Computacional

O modelo estrutural utilizado neste trabalho (Fig. 3.5) foi o mesmo construído por Ramos (2016), visto que o objetivo principal desta pesquisa é a análise das reações individuais de cada estaca e a comparação destes resultados com os resultados obtidos pelo autor. O modelo foi construído através do *software* ANSYS 16.0 apenas com a utilização de elementos lineares, elemento *Beam189*, de forma que a laje existente foi acrescida às vigas transversais, consequentemente alterando os parâmetros geométricos destas vigas.

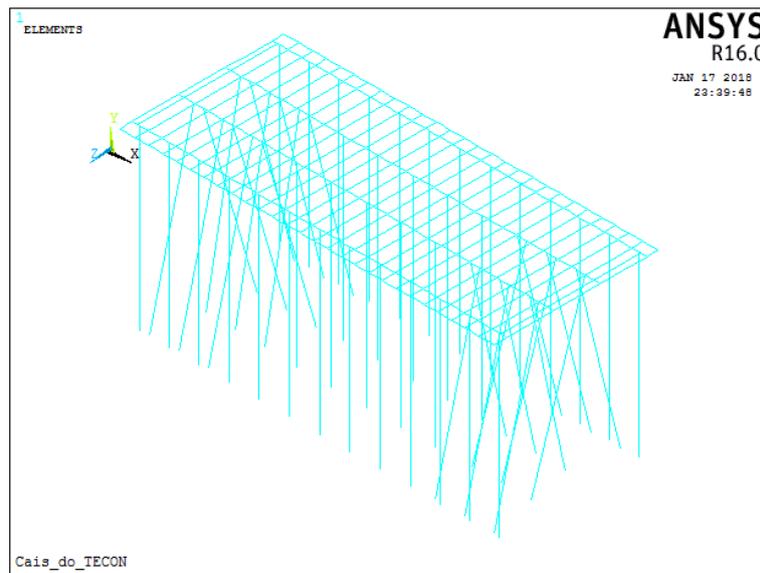


Figura 3.5 – Modelo computacional do módulo do cais em estudo.

Para a modelagem das estacas, observa-se que, apesar de idênticas com relação à seção e armadura, elas estão engastadas a diferentes profundidades. Neste modelo, porém, todas as estacas foram consideradas com o mesmo comprimento, sendo este calculado a partir das estacas mais esbeltas, localizadas sob a viga longitudinal abaixo do trilho do portêiner no lado de mar (pilares 48 a 60). Estas estacas possuem um vão livre de 16,12 m. A partir do método apresentado em Davisson E Robinson (1965), que propõe uma substituição do comprimento original de estacas enterradas L_u por estacas equivalentes engastadas na base de vão livre L_e , acrescentando ao seu comprimento original um comprimento hipotético L_s , conforme a Eq. 3.1:

$$L_s = 1,8 * \sqrt[5]{\frac{E_p * I}{n_h}} \quad (3.1)$$

onde E_p é o módulo de elasticidade do material, I o momento de inércia da seção e n_h o coeficiente de reação horizontal do solo. Com o módulo de elasticidade do concreto de 36.826,12 kN/m², o momento de inércia da seção das estacas de 0,02 m⁴ e o coef. de reação horizontal para argilas moles de 0,55 MN/m³, tem-se que o comprimento L_s é de aproximadamente 7,5 metros, resultando em um comprimento equivalente L_e igual a 23,62 metros, medida utilizada para todas as 60 estacas.

3.2.1. Verificação do Modelo Computacional

O modelo utilizado neste trabalho teve sua validação verificada em Ramos (2016) através da comparação dos resultados de esforço normal no topo de cada uma das sessenta estacas obtidos a partir da análise estática de dois *softwares* diferentes: SAP2000 e ANSYS (que é o *software* utilizado para a análise probabilística realizada neste trabalho). Foram aplicadas à estrutura de validação forças concentradas aplicadas em duas direções diferentes, além do peso próprio. A Fig. 3.6 apresentada por Ramos (2016) apresenta a comparação dos dois resultados, que revela visualmente um comportamento muito próximo entre os *softwares*. Embora ambos utilizem o método dos elementos finitos na solução do modelo, as formulações adotadas para elementos finitos lineares apresentadas por eles são diferentes, oferecendo uma certa validação para o modelo, ainda que não seja a ideal.

Viegas (2015) também utiliza um método semelhante para validar o seu modelo estrutural construído no ANSYS através da comparação dos resultados obtidos com o *software* TQS, concluindo que os resultados obtidos no ANSYS são satisfatórios.

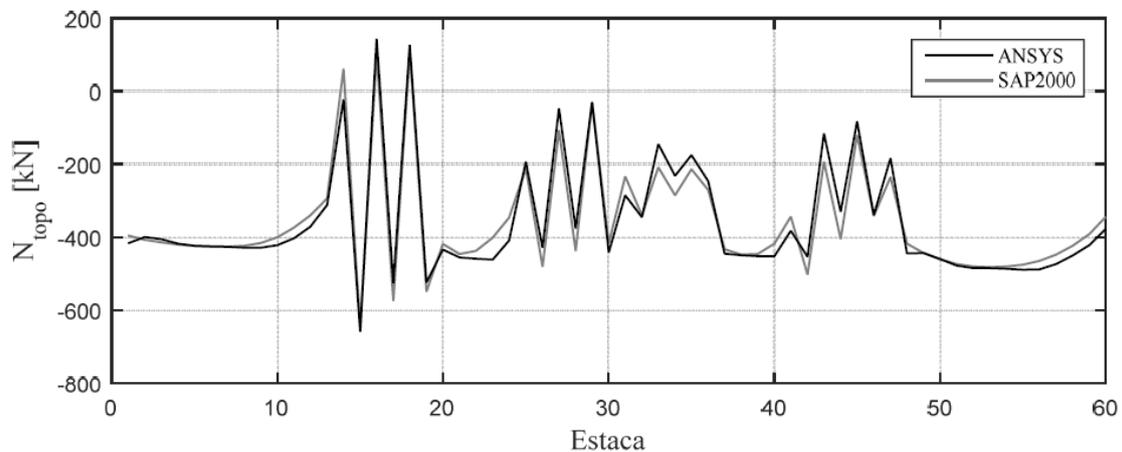


Figura 3.6 – Comparação dos resultados obtidos nos *software* ANSYS e SAP2000 para o modelo estrutural submetido a uma combinação simplificada de esforços. (Fonte: Ramos, 2017).

3.3. Aplicação das Cargas

Todas as cargas envolvidas na solução do modelo computacional foram aplicadas como variáveis aleatórias. Este capítulo traz um resumo de como estas cargas foram determinadas em Ramos (2016).

3.3.1. Peso Próprio

A estrutura em estudo é inteiramente construída em concreto armado, pré-moldado ou concretado *in loco*. O cálculo do peso próprio e a aplicação dessa carga na estrutura pode ser feito automaticamente através do ANSYS, a partir dos valores de densidade e da aceleração da gravidade. Além disso, é preciso informar o coeficiente de variação para o valor da densidade a fim de que esta seja tratada como uma variável aleatória.

O valor adotado para a densidade do concreto foi o de 25 kN/m^3 , conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014). Dentre os valores citados na bibliografia para o coeficiente de variação da densidade, foi adotado o maior deles, de 0,10, indicado por Nowak e Collins (2000) e uma distribuição Normal de probabilidade.

Vale ressaltar que o peso próprio da estrutura considera as peças de concreto pré-moldado e também a camada de concreto executada sobre as vigas transversais, que foi adicionada no modelo computacional através dos parâmetros geométricos das vigas transversais.

3.3.2. Pavimentação

A pavimentação utilizada no cais consiste de blocos de concreto intertravados assentados sobre uma camada de areia, conforme a Fig. 3.7. Esta carga foi aplicada de forma distribuída sobre cada elemento de viga transversal do modelo computacional. Os valores adotados para o peso específico da areia, de 17 kN/m^3 , e dos blocos, de 24 kN/m^3 , foram retirados da NBR 6120 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações (ABNT, 1980). O coeficiente de variação adotado foi também de 0,10 para o conjunto areia e blocos.

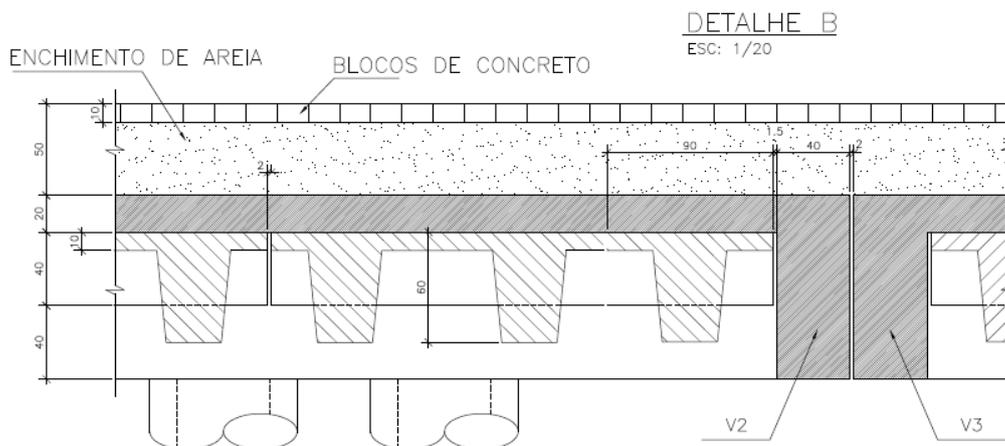


Figura 3.7 – Detalhe da camada de pavimentação. (Fonte: Projeto TECON Rio Grande).

3.3.3. Variação de Temperatura

A variação de temperatura, assim como o peso próprio, pode ser implementada diretamente através do software ANSYS, a partir da temperatura média e do coeficiente de dilatação térmica dos materiais. De acordo com a NBR 6118 (ABNT 2014), o coeficiente de dilatação térmica para o concreto armado pode ser admitido como sendo igual a $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

A temperatura média foi obtida através da análise dos registros históricos de temperatura para a cidade de Rio Grande disponíveis no *site* do Instituto Brasileiro de Meteorologia, utilizando dados de 2011 a 2014. A análise mostrou uma temperatura média de $19,3^{\circ}\text{C}$ e um desvio padrão de $5,31^{\circ}\text{C}$, conseqüentemente apresentando um coeficiente de variação de 0,28. A distribuição foi aproximada para uma distribuição Normal de probabilidade.

3.3.4. Empuxo de Terra

O empuxo de terra causado pelo aterro mencionado anteriormente é suportado por um conjunto de estacas-prancha, formado por perfis metálicos entrelaçados. Este painel de estacas-prancha é engastado no solo e apoia-se na viga longitudinal VL-A (Fig. 3.8). Esta reação na viga longitudinal equivale à parcela do empuxo de terra que deve ser suportada pela estrutura e vale $132,8\text{ kN/m}$ (TECON, Memorial de Cálculo), distribuída ao longo de toda a viga VL-A.

Atribuiu-se para este carregamento um coeficiente de variação de 0,10 e uma distribuição Normal de probabilidade.

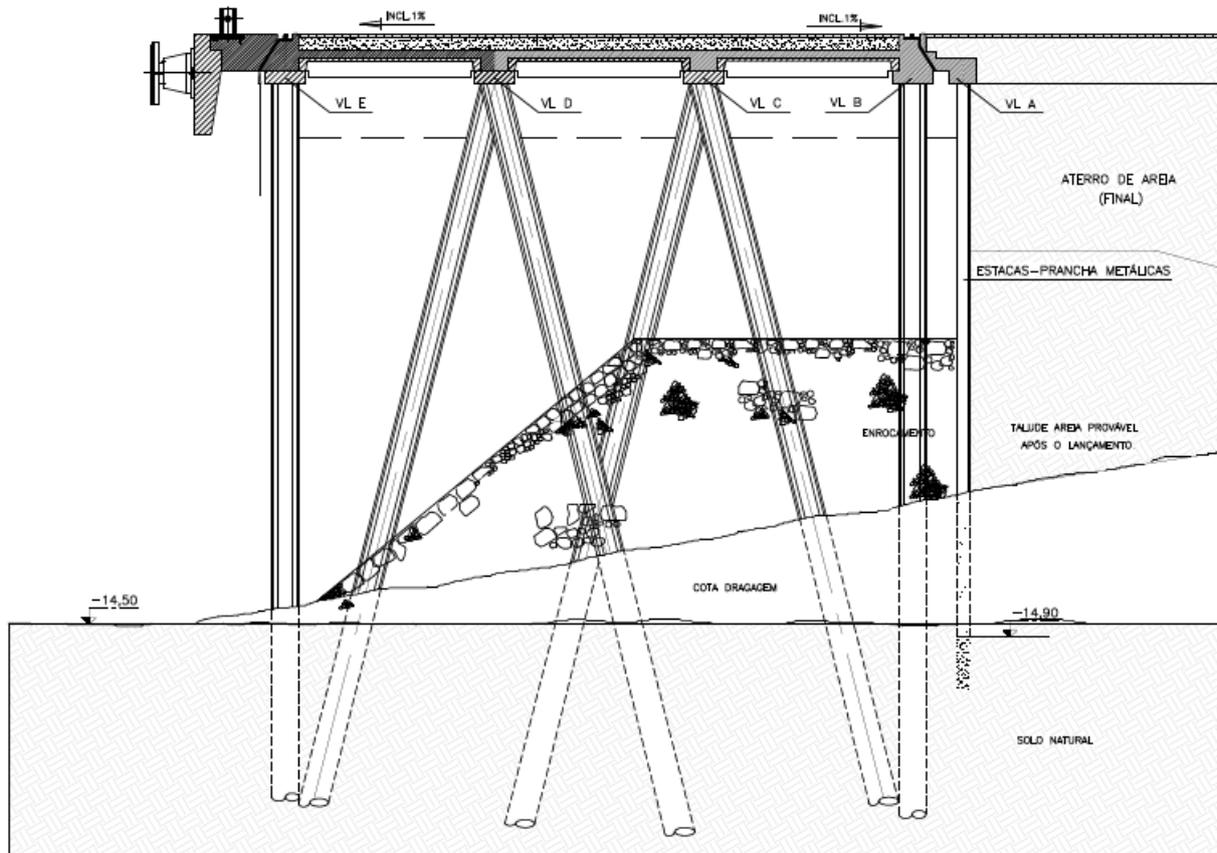


Figura 3.8 – Seção Transversal. (Fonte: Projeto TECON Rio Grande).

3.3.5. Sobrecarga

A sobrecarga atuante na estrutura foi aplicada de maneira semelhante à pavimentação, sobre as vigas transversais. O valor considerado para cais de movimentação de contêineres é de 40 kN/m^2 (THORESEN, 2014). Quanto ao coeficiente de variação, utilizou-se como parâmetro os valores apresentados em Novak e Collins (2000) para sobrecarga acidental em pontes, que varia de 0,14 a 0,23, visto que estes valores para estruturas portuárias não são encontrados na bibliografia. A partir daí, adotou-se um coeficiente de variação de 0,25 para este estudo.

A distribuição de probabilidade usualmente utilizada para sobrecargas acidentais é a distribuição de Valores Extremos Tipo I (Gumbel). Tal distribuição não é disponibilizada como opção dentro do software ANSYS, de modo que Ramos (2016) adotou uma distribuição Normal também para esta variável.

Num segundo momento deste trabalho, a sobrecarga foi aplicada na estrutura como uma distribuição Beta introduzida no modelo a partir de valores aleatórios em uma distribuição de Valores Extremos Generalizada gerados a partir do *software* EasyFit. O histograma desta distribuição é

mostrado na Fig. 3.9, juntamente com as curvas de ajuste para as distribuições de Valores Extremos Tipo I, Beta e Normal. Para a quantidade de números aleatórios gerados ($n = 5000$), quando busca-se ajustar a distribuição a uma função Beta, a discrepância crítica no teste Kolmogorov-Smirnov para 5% de significância é de 0,01921, valor inferior à discrepância observada de 0,02295. Entretanto, a distribuição Beta ajusta-se melhor que a distribuição normal para estes valores e, dentre as distribuições disponíveis no *software* ANSYS, também é a que melhor se ajusta aos dados, justificando a sua escolha. Os parâmetros utilizados para esta distribuição foram $\alpha_1 = 4,8773$, $\alpha_2 = 5,672 \cdot 10^6$, $a = 18,081$ e $b = 3,2046 \cdot 10^7$.

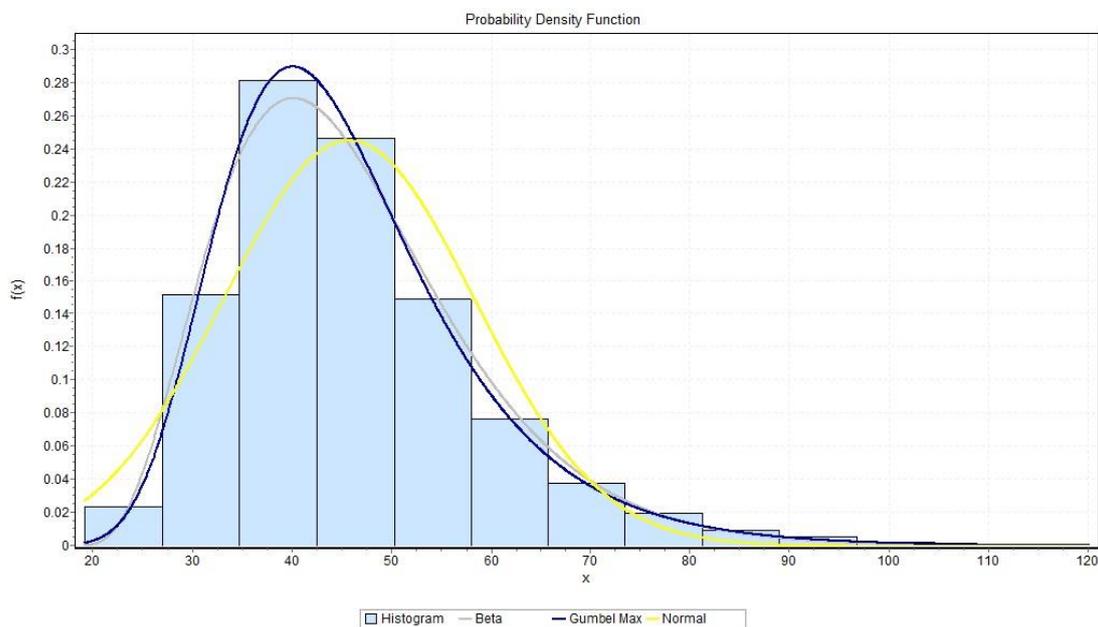


Figura 3.9 – Ajuste de curvas para a sobrecarga.

3.3.6. Atracção

A força de reacção aplicada sobre a estrutura através das defensas durante a atracção depende da energia de atracção do navio (definida na Eq. 2.1) que, além dos coeficientes aplicados, é função do porte da embarcação (DWT). Portanto, para inserir esta carga no modelo computacional, foram utilizadas funções para a força de reacção e para o momento de reacção (Eq. 3.2 e 3.3) decorrentes da atracção da embarcação, retiradas do catálogo da FENTEK Marine Fender Systems (FENTEK, 2016), onde DWT é a variável aleatória especificada.

$$F_R = 2,146 * E_d \quad (3.2)$$

$$M_R = 0,175 * F_R \quad (3.3)$$

onde M_R é o momento de reação causado pela diferença entre o eixo da defesa e o eixo da superestrutura.

Os valores de DWT das embarcações foram obtidos a partir dos registros do próprio TECON Rio Grande, disponíveis no *site* da empresa, para os últimos seis meses de operação – janeiro a julho de 2016 para Ramos (2016). A Tab. 3.1 traz um resumo dos dados analisados de acordo com os parâmetros a serem incluídos no modelo computacional.

Na Eq. 2.1, temos os valores de V , C_m e M em função de DWT e são incluídos no modelo em função desta variável. Os outros coeficientes, C_e , C_c , e C_s são constantes e para estes foram adotados os valores de 0,6, 1,0 e 1,0, respectivamente.

Tabela 3.1 - Análise dos valores de DWT entre janeiro e julho de 2016.

| Item | Valor [t] |
|-------------------|-----------|
| Média | 73.747 |
| Desvio Padrão | 34.116 |
| Coef. de Variação | 0,46 |
| Mínimo | 11.807 |
| Máximo | 124.479 |

A distribuição de probabilidade adotada para o DWT foi a Normal truncada, com base nos valores mínimo e máximo registrados no período.

3.3.7. Amarração

As forças de amarração, aplicadas nos cabeços de amarração, dependem da área vélica lateral e da velocidade do vento incidente. A área vélica, assim como nos esforços de atracação, foi inserida como uma função do DWT a partir de uma função ajustada (Fig. 3.10).

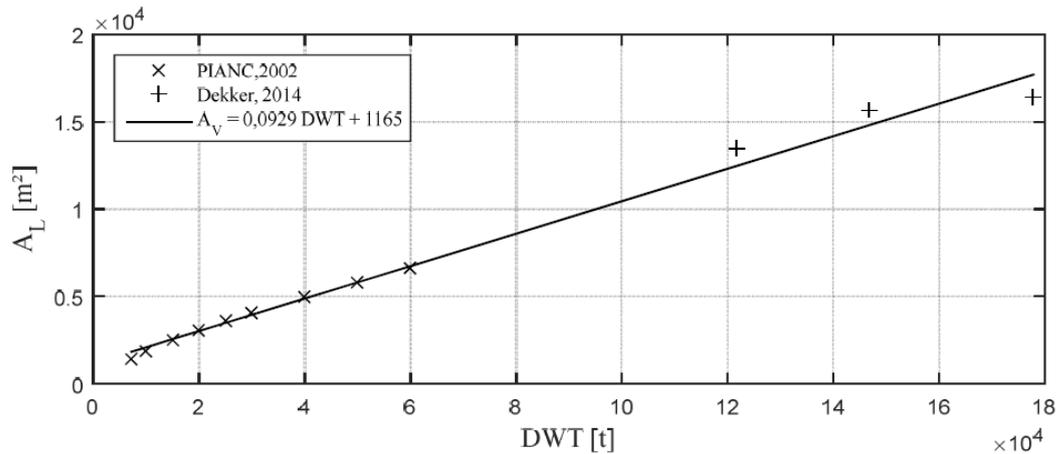


Figura 3.10 – Ajuste de curva para a área vélica lateral x DWT. (Fonte: Ramos, 2016).

A velocidade do vento adotada divide-se em duas situações: ventos em situação de operação e ventos extremos. Para ventos em operação, utilizou-se os dados disponibilizados por Olinto, Pinto e Halal (2002). Estes dados foram ajustados a uma distribuição de Weibull com parâmetros $\lambda = 7,2$ m/s e $\kappa = 2,3$ m/s. Já para a condição de ventos extremos, foram utilizados os valores referentes ao município de Bagé / RS disponíveis no Mapa Eólico do Rio Grande do Sul (SEMC/RS, 2002), devido à ausência de dados para a cidade de Rio Grande, apesar da importância de se conhecer mais profundamente o comportamento dos ventos de uma região portuária. Para os fins deste trabalho, a semelhança entre o comportamento dos ventos para as duas cidades permite que se faça esta aproximação. Além disso, a distribuição de probabilidade para ventos extremos é a de Valores Extremos Tipo I (Gumbel), com uma média igual à 21,5 m/s e um desvio padrão de 4,0 m/s. Na falta desta opção de distribuição dentro do software, os dados foram aproximados para uma distribuição Lognormal com parâmetros $\lambda = 2,89$ m/s e $\zeta = 0,18$ m/s. Por fim, os valores para os coeficientes de força do vento transversais e longitudinais foram definidos a partir da Fig. 2.6 como $C_{TW} = 2,7$ e $C_{LW} = 0,5$.

Além dos esforços decorrentes do vento, existem as forças exercidas em função das correntes marítimas sobre a embarcação, definidas pelas Eq. (2.13) e (2.14), onde a distância L_{BP} e o calado médio d_m são inseridos no modelo em função da variável aleatória DWT. A velocidade da corrente marítima V'_C também é uma variável aleatória com um valor médio de 1,1 m/s e um coeficiente de variação de 0,50 e uma distribuição normal truncada para velocidades menores que zero.

3.3.8. Equipamentos

Os equipamentos considerados neste modelo são os portêineres e os guindastes móveis. Ambos podem estar em operação ou fora de operação, sendo necessário então a determinação de

quatro carregamentos diferentes, apresentados a seguir. Ressalta-se que no caso de equipamentos fora de operação, os carregamentos são considerados determinísticos, ou seja, não há variação significativa de esforços.

Portêineres Fora de Operação

Os portêineres movimentam-se sobre os trilhos, apoiados sobre um par de *trolleys* de 11,2 m de comprimento em cada linha de trilhos. Deste modo, a ação proveniente destes equipamentos parados é igual ao seu peso próprio distribuído pelos quatro pontos de apoio, conforme a Eq. 3.4. O peso próprio do portêiner foi obtido através do catálogo da ZPMC, empresa fabricante dos portêineres utilizados no TECON Rio Grande.

$$F_{MAR,FO} = F_{TER,FO} = \frac{PP_{PORT}}{2 * 2 * L_{TRILHO}} = \frac{12400}{2 * 2 * 11,2} = 276,79 \text{ kN/m} \quad (3.4)$$

onde $F_{MAR,FO}$ e $F_{TER,FO}$ são as forças aplicadas sobre os trilhos na linha do lado de mar e terra, respectivamente; PP_{PORT} é o peso próprio do portêiner e L_{TRILHO} é o comprimento de uma linha de *trolleys* do portêiner.

Foram consideradas situações onde existem um ou dois portêineres sobre o mesmo módulo.

Portêineres em Operação

Os portêineres em operação apresentam, além do seu peso próprio, duas variáveis aleatórias: o peso do contêiner sendo movimentado e o comprimento da lança.

A distribuição de probabilidade do peso dos contêineres foi obtida através da análise e ajuste dos dados de movimentação de contêineres cheios disponíveis no *site* da ANTAQ para o cais do TECON Rio Grande no ano de 2014. Desta análise, adotou-se uma distribuição de Weibull com parâmetros $\lambda = 268,3 \text{ kN}$ e $\kappa = 5,8 \text{ kN}$.

Para o comprimento da lança, a distribuição de probabilidade adotada foi a uniforme, onde o limite inferior é igual à 6 m – distância entre o trilho de mar e a primeira linha de contêineres – e o limite superior sendo igual à largura da embarcação, calculada em função do DWT para cada simulação, evitando que o modelo utilize valores de comprimento maiores do que a largura do navio considerado na mesma simulação.

Guindastes Móveis Fora de Operação

Os guindastes móveis portuários (GMP), quando fora de operação, permanecem patolados. Os equipamentos da TEREX *Gottwald*, modelo GHMK 6407 possuem quatro patolas que distribuem

o peso próprio do guindaste, de 4200 kN, de acordo com o fabricante. Desta forma, o peso próprio do guindaste distribuído em quatro pontos de apoio resulta em quatro forças de 1050 kN aplicadas sobre a estrutura.

Guindastes Móveis em Operação

Em operação, estes guindastes possuem uma lança com raio de ação máximo de 51 m e uma capacidade de carga de 100 t, de acordo com o comprimento de lança utilizado. Assim, as forças aplicadas pelas patolas dependem do peso do contêiner movimentado, do raio e do ângulo de atuação da lança.

Como o comprimento máximo da lança é limitado pelo peso do contêiner içado, foi considerado um modelo em que o guindaste está sempre operando com o comprimento máximo de acordo com o peso do contêiner em cada simulação. Já o ângulo de inclinação foi considerado sempre igual a 45° com o eixo da lança sobre uma das quatro patolas, situação que provoca os esforços mais elevados na patola sob a lança enquanto que a patola oposta é um pouco aliviada. Assim como para os portêineres, foram consideradas situações onde existem um ou dois GMP sobre o mesmo módulo.

3.3.9. Resumo da Aplicação das Cargas

A Tab. 3.2 traz um resumo de todas as cargas aplicadas, com respectivos os parâmetros, variáveis e distribuições adotados:

Tabela 3.2 – Resumo de todas as cargas aplicadas.

| Peso próprio estrutural | | | | |
|--------------------------------|------------|--------------|-------------------|------------------------|
| Var. aleatória | γ_c | $\mu = 25$ | kN/m ³ | NBR 6118 (ABNT, 2014) |
| Coef. variação | | 0,10 | | Novak e Collins (2000) |
| Distribuição | | Normal | | |
| Peso próprio sobreposto | | | | |
| Var. aleatória | Q_{pav} | $\mu = 9,2$ | kN/m ² | NBR 6118 (ABNT, 2014) |
| Coef. variação | | 0,10 | | Novak e Collins (2000) |
| Distribuição | | Normal | | |
| Variação de temperatura | | | | |
| Var. aleatória | T_1 | $\mu = 19,3$ | °C | INMET (2011-2014) |
| Coef. variação | | 0,28 | | INMET (2011-2014) |
| Distribuição | | Normal | | |

| | | | | |
|--|--------|---|-------------------|---|
| Empuxo de terra | | | | |
| Var. aleatória | Qep | $\mu = 132,8$ | kN/m | Memorial TECON Arbitrado |
| Coef. variação | | 0,10 | | |
| Distribuição | | Normal | | |
| Sobrecarga acidental - modelo inalterado | | | | |
| Var. aleatória | Qsc | $\mu = 40,0$ | kN/m ² | Thoresen (2014) Novak e Collins (2000) |
| Coef. variação | | 0,25 | | |
| Distribuição | | Normal | | |
| Sobrecarga acidental - modelo alterado | | | | |
| Var. aleatória | Qsc | $\alpha 1 = 4,88$ $\alpha 2 = 5,62 \cdot 10^6$ $a = 18,08$ $b = 3,20 \cdot 10^7$ | | Arbitrado |
| Distribuição | | Beta | | |
| Atracação | | | | |
| Var. aleatória | DWT | $\mu = 73.474$ | ton | TECON Rio Grande TECON Rio Grande |
| Coef. variação | | 0,46 | | |
| Distribuição | | Normal truncada | | |
| Amarração | | | | |
| Var. aleatória | DWT | $\mu = 73.474$ | ton | TECON Rio Grande TECON Rio Grande |
| Coef. variação | | 0,46 | | |
| Distribuição | | Normal truncada | | |
| Var. aleatória | Vwop | $\lambda = 7,2$ $\kappa = 2,3$ | m/s m/s | Olinto, Pinto e Halal (2002) |
| Distribuição | | Weibull | | |
| Var. aleatória | Vwex | $\lambda = 2,89$ $\xi = 0,18$ | m/s m/s | Mapa Eólico RS (SEMC/RS, 2002) |
| Distribuição | | Gumbel | | |
| Var. aleatória | Vcor | $\mu = 1,10$ | m/s | Arbitrado Arbitrado |
| Coef. variação | | 0,50 | | |
| Distribuição | | Normal truncada | | |
| Portêiner - fora de operação | | | | |
| Valor det. | PPport | 12.400 | kN | ZPMC (fabricante) |
| Portêiner - em operação | | | | |
| Var. aleatória | DWT | $\mu = 73.474$ | ton | TECON Rio Grande TECON Rio Grande |
| Coef. variação | | 0,46 | | |
| Distribuição | | Normal truncada | | |
| Var. aleatória | Pcont | $\lambda = 268,3$ $\kappa = 5,8$ | kN kN | TECON Rio Grande |
| Distribuição | | Weibull | | |

| GMP - fora de operação | | | | |
|------------------------|-------|-------------------------------------|----------|-----------------------------|
| Valor det. | PPgmp | 4.200 | kN | TEREX Gottwald (fabricante) |
| GMP - em operação | | | | |
| Var. aleatória | Pcont | $\lambda = 268,3$ $\kappa = 5,8$ | kN kN | TECON Rio Grande |
| Distribuição | | Weibull | | |

3.4. Combinações das Ações

Este trabalho analisou cinquenta e duas combinações de carregamento diferentes, propostas por Ramos (2016), que buscam abranger todas as situações possíveis as quais um dos módulos do cais pode estar submetido. Estas combinações estão detalhadas no Apêndice A.

As ações decorrentes do peso próprio, pavimentação, variação de temperatura e reação das estacas-prancha devido ao empuxo de terra são consideradas em todas as combinações. A sobrecarga accidental foi desconsiderada em uma combinação por cada grupo, representando situações sem a movimentação de pessoal, equipamentos e veículos de pequeno e médio porte. As ações dos equipamentos de grande porte – portêineres e guindastes móveis em operação e fora de operação – são levadas em conta em todos os grupos (menos nos grupos 1, 2 e 6, onde foram considerados apenas equipamentos fora de operação), variando a disposição destes equipamentos sobre o módulo do cais. A respeito dos equipamentos de grande porte, leva-se em conta ainda o fato de que um módulo suporta no máximo dois portêineres ou guindastes móveis ao mesmo tempo, por questões de comprimento. Por fim, as ações de atracação e amarração são as ações que definem a divisão dos grupos. Para os esforços de amarração destaca-se que, devido a localização do cais, paralelo à entrada do canal da barra, considera-se que as correntes marítimas atuam no sentido longitudinal das embarcações.

O Grupo 1 traz a situação de atracação de navios, onde este transfere à estrutura esforços através das defensas. Durante a atracação, nenhum equipamento de grande porte é utilizado, portanto foram consideradas somente situações em que estes equipamentos estão fora de operação.

No Grupo 2, temos um navio amarrado à estrutura através de cabos lançantes – cabos que se projetam da proa ou da popa para fora do navio. Por este motivo, estes cabos normalmente impedem que equipamentos de grande porte sejam utilizados nesta configuração. Para o cálculo dos esforços de amarração, foi considerado o vento na direção transversal e a corrente na direção longitudinal.

Os grupos 3 e 4 trazem a situação de um navio amarrado por espringues – cabos que se projetam da proa ou da popa em direção ao centro – permitindo que os equipamentos operem,

ocorrendo situações então onde surgem equipamentos fora de operação ou operantes. A diferença entre estes dois grupos se dá apenas na direção considerada para o vento: o Grupo 3 possui vento atuante na transversal e o Grupo 4 na longitudinal.

Os Grupo 5 mostra a situação onde dois navios estão amarrados à um mesmo módulo da estrutura. Em duas combinações deste grupo, foram considerados guindastes móveis em operação, de modo que foram consideradas então uma variável aleatória para representar o peso dos contêineres de cada um dos navios separadamente.

Por fim, o Grupo 6 também traz dois navios amarrados ao módulo, porém em uma situação de ventos extremos. Assim, nenhum equipamento foi considerado como operante – estes equipamentos são devidamente ancorados por questões de segurança. Além disso, nestas situações os portêineres são colocados no centro dos módulos, reduzindo o número de combinações neste grupo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nas análises probabilísticas são mostrados e discutidos neste capítulo, além de serem comparados com os resultados obtidos em Ramos (2016).

Para cada combinação, foram obtidos todos os valores dos esforços normais para cada estaca em cada uma das duas mil simulações realizadas. Destes dados, foram identificadas as estacas que apresentam os maiores e menores valores médios e também os maiores e menores desvios-padrão e coeficientes de variação. Além disso, foram identificadas as estacas que apresentaram os maiores e menores parâmetros $Xk = \mu \pm 3*\sigma$, que são os valores extremos dos esforços de tração e compressão. Este parâmetro é também comparado com Ramos (2016). Esta comparação pode ser feita pois, embora as variáveis sejam geradas aleatoriamente, o *seed* utilizado nas simulações é o mesmo, de modo que os números aleatórios gerados também são sempre os mesmos, possibilitando que uma mesma combinação seja simulada diversas vezes produzindo sempre o mesmo resultado.

Os resultados completos, de todas as combinações, estão incluídos na versão digital deste trabalho.

4.1. Parâmetros Estatísticos das Variáveis de Saída – Modelo Inalterado

Aqui são apresentados os resultados obtidos através da análise probabilística do modelo proposto por Ramos (2016), portanto, um modelo inalterado no que diz respeito à aplicação das cargas. A diferença se dá nas variáveis de saída analisadas, onde aqui são determinadas as distribuições dos valores dos esforços normais observados no topo de cada uma das sessenta estacas do módulo em estudo, bem como todos os parâmetros estatísticos destas distribuições.

4.1.1. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 1

O primeiro grupo de combinações apresenta diversas situações de carregamento do módulo do cais no caso de atracação de navios. As Tab. 4.1 e 4.2 apresentam os valores extremos – máximos e mínimos – para cada um dos parâmetros estatísticos (média, desvio padrão, coef. de variação e Xk) das combinações 1.0 e 1.2, que são as combinações que apresentaram os maiores e menores esforços normais dentro do Grupo 1, respectivamente.

Para a combinação 1.0, podemos observar que as estacas que apresentaram as médias máximas e mínimas também foram as que apresentaram os valores máximos e mínimos para o parâmetro Xk . A Fig. 4.1 mostra que estas estacas são as mais carregadas em torno de metade das simulações.

Já para a combinação 1.2 a estaca com a menor média é a E53, enquanto que a estaca que

apresenta o menor valor para Xk é a estaca E23. Em contrapartida, a Fig. 4.2 mostra que a estaca E23 é a mais carregada em apenas 0,25% das simulações, o que representa 5 ocorrências em 2000. Neste caso, observamos que a estaca que apresenta esforço normal com maior média, E53, não é a estaca que produz o maior valor para o parâmetro Xk .

Tabela 4.1 - Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 1.0.

| | | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] |
|-----------------|----------------|---|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|
| Dados Atuais | μ - máx | \ | E46 | 770.40 | 129.30 | 323.50 | 1219.00 | 0.1678 | 1158.30 |
| | μ - mín | \ | E26 | -1442.00 | 132.30 | -1945.00 | -868.70 | 0.0917 | -1838.90 |
| | σ - máx | \ | E15 | 258.70 | 142.20 | -373.10 | 786.00 | 0.5497 | 685.30 |
| | σ - mín | | E13 | -410.80 | 37.17 | -546.50 | -287.20 | 0.0905 | -522.31 |
| | δ - máx | \ | E36 | 196.80 | 115.10 | -198.10 | 642.50 | 0.5849 | 542.10 |
| | δ - mín | | E24 | -805.10 | 50.50 | -983.30 | -637.20 | 0.0627 | -956.60 |
| | Xk - máx | \ | E46 | 770.40 | 129.30 | 323.50 | 1219.00 | 0.1678 | 1158.30 |
| | Xk - mín | \ | E26 | -1442.00 | 132.30 | -1945.00 | -868.70 | 0.0917 | -1838.90 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 795.10 | 127.20 | 323.50 | 1219.00 | 0.1600 | 1176.7 |
| | Xk - mín | - | - | -1463.20 | 130.00 | -1945.00 | -994.00 | 0.0888 | -1853.2 |

Tabela 4.2 - Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 1.2.

| | | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] |
|-----------------|----------------|---|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|
| Dados Atuais | μ - máx | \ | E46 | 216.70 | 193.20 | -478.60 | 902.90 | 0.8916 | 796.30 |
| | μ - mín | | E53 | -2317.00 | 193.50 | -2920.00 | -1674.00 | 0.0835 | -2897.50 |
| | σ - máx | | E21 | -1993.00 | 303.60 | -2985.00 | -951.70 | 0.1523 | -2903.80 |
| | σ - mín | | E13 | -826.20 | 120.50 | -1211.00 | -423.60 | 0.1458 | -1187.70 |
| | δ - máx | \ | E27 | 121.50 | 175.70 | -452.40 | 742.70 | 1.4461 | 648.60 |
| | δ - mín | | E6 | -2229.00 | 181.30 | -2796.00 | -1615.00 | 0.0813 | -2772.90 |
| | Xk - máx | \ | E46 | 216.70 | 193.20 | -478.60 | 902.90 | 0.8916 | 796.30 |
| | Xk - mín | | E23 | -1998.00 | 303.60 | -2990.00 | -955.30 | 0.1520 | -2908.80 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 239.50 | 193.10 | -427.20 | 902.90 | 0.8063 | 818.80 |
| | Xk - mín | - | - | -2320.00 | 192.80 | -2990.00 | -1691.00 | 0.0831 | -2898.40 |

A estaca E23 possui um coeficiente de variação de 0,1520 enquanto que o coeficiente de variação da estaca E53 é de apenas 0,0835. A diferença do valor médio para as estacas E53 e E23 é de apenas 0,13% mas o parâmetro Xk da estaca E23 é 0,39% maior.

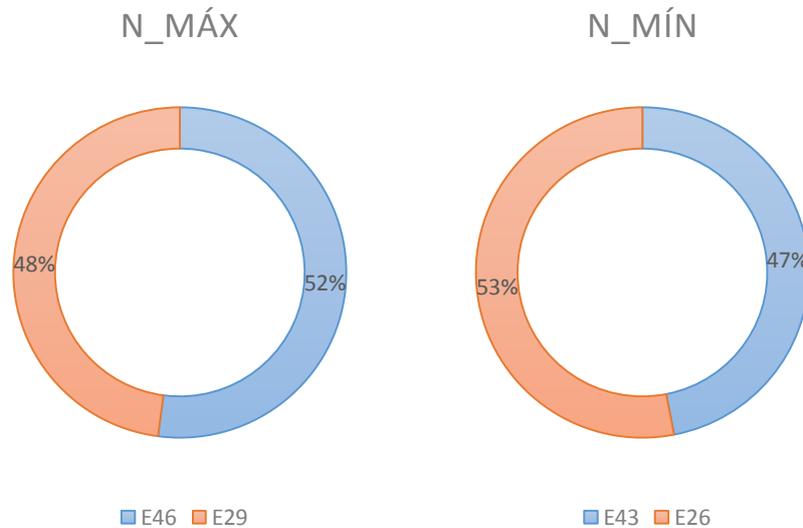


Figura 4.1 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 1.0.

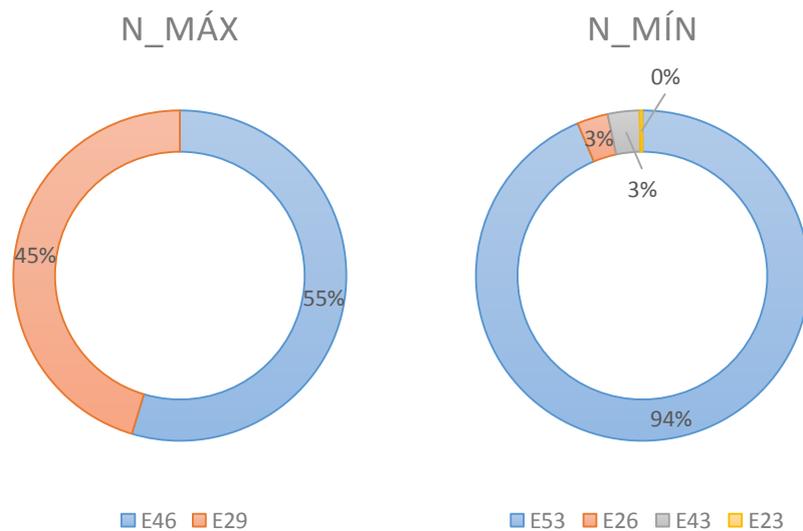


Figura 4.2 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 1.2.

As Tab. 4.3 e 4.4 apresentam um resumo dos resultados para as combinações do Grupo 1, evidenciando as combinações onde a estaca com parâmetros extremos de Xk coincide com valores extremos de outros parâmetros. Para o Grupo 1, podemos perceber que os valores máximos de Xk coincidem com as maiores médias em 80% das vezes, enquanto que para os valores mínimos essa situação ocorre em apenas 20% das combinações. Observa-se também que as estacas dos valores extremos de desvio padrão e coeficiente de variação não se repetem para Xk em nenhuma das combinações deste grupo.

Tabela 4.3 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 1 – estacas com valores máximos e

mínimos para cada parâmetro estatístico.

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|---------------|------------------|----------|--------------|---------------|------------------|----------|--------------|
| | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] |
| 1.0 | E46 | E15 | E36 | E46 | E26 | E13 | E24 | E26 |
| 1.1 | E46 | E23 | E27 | E46 | E26 | E13 | E28 | E23 |
| 1.2 | E46 | E21 | E27 | E46 | E53 | E13 | E6 | E23 |
| 1.3 | E29 | E21 | E44 | E29 | E53 | E13 | E1 | E21 |
| 1.4 | E46 | E23 | E27 | E46 | E55 | E13 | E13 | E23 |
| 1.5 | E46 | E23 | E27 | E29 | E53 | E13 | E1 | E23 |
| 1.6 | E46 | E15 | E27 | E29 | E26 | E53 | E23 | E43 |
| 1.7 | E46 | E23 | E32 | E46 | E43 | E49 | E20 | E23 |
| 1.8 | E29 | E21 | E34 | E29 | E21 | E59 | E24 | E21 |
| 1.9 | E46 | E32 | E15 | E46 | E47 | E49 | E41 | E26 |

Tabela 4.4 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 1 – valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico.

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|---------------|------------------|----------|--------------|---------------|------------------|----------|--------------|
| | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] |
| 1.0 | 770.40 | 142.20 | 0.58 | 1158.30 | -1442.00 | 37.17 | 0.06 | -1838.90 |
| 1.1 | 207.40 | 303.60 | 1.51 | 787.00 | -2089.00 | 120.50 | 0.09 | -2849.80 |
| 1.2 | 216.70 | 303.60 | 1.45 | 796.30 | -2317.00 | 120.50 | 0.08 | -2908.80 |
| 1.3 | 205.80 | 303.60 | 1.46 | 790.20 | -2229.00 | 120.50 | 0.07 | -2903.80 |
| 1.4 | 171.70 | 303.60 | 1.98 | 751.30 | -2220.00 | 120.50 | 0.07 | -2908.80 |
| 1.5 | 167.90 | 303.60 | 1.79 | 748.40 | -2285.00 | 120.50 | 0.07 | -2900.80 |
| 1.6 | 192.30 | 205.80 | 1.92 | 785.10 | -2080.00 | 50.81 | 0.05 | -2675.70 |
| 1.7 | 234.40 | 308.90 | 10.34 | 794.80 | -2107.00 | 45.03 | 0.05 | -2887.70 |
| 1.8 | 568.10 | 308.90 | 0.88 | 959.00 | -1956.00 | 45.09 | 0.05 | -2882.70 |
| 1.9 | 517.00 | 145.00 | 90.60 | 919.90 | -1516.00 | 45.45 | 0.05 | -1889.60 |

Por fim, destacam-se as combinações 1.7 e 1.9, que apresentam valores extremamente altos para o coeficiente de variação devido ao baixo valor médio dos esforços nestas estacas. Ainda assim, a distribuição de probabilidade destas estacas, assim como de todas as outras, ajusta-se a uma distribuição normal. As Fig. 4.3 e 4.4 apresentam a distribuição de probabilidade das estacas onde foram observados os valores extremos de Xk para cada uma das dez combinações do Grupo 1.

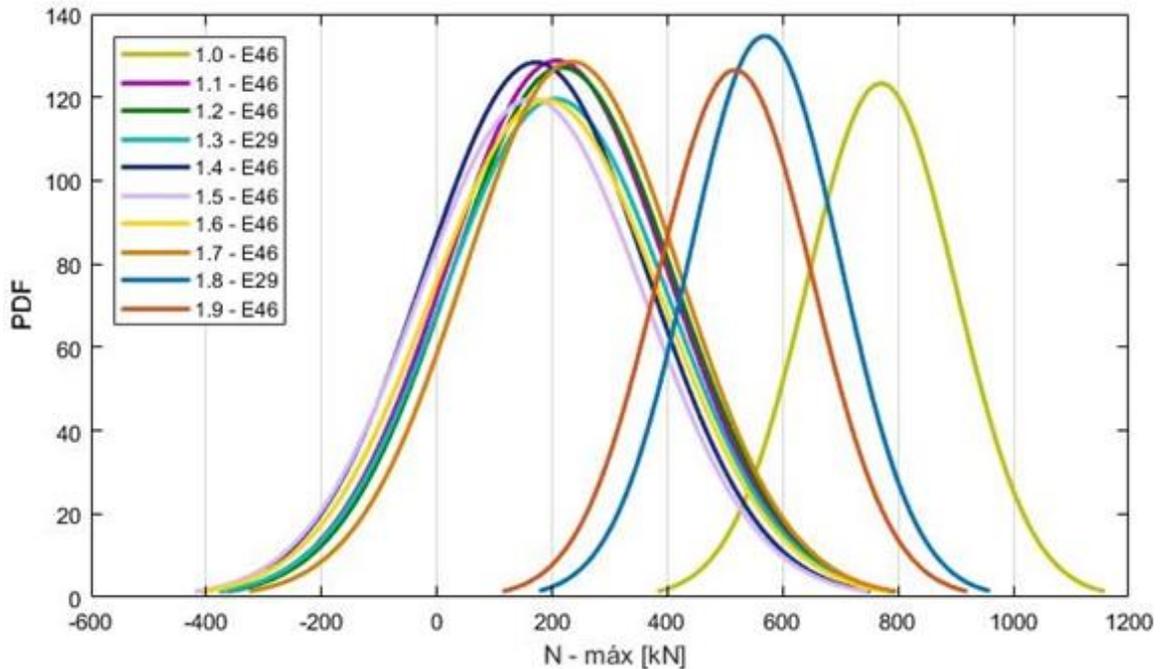


Figura 4.3 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo em cada combinação do Grupo 1.

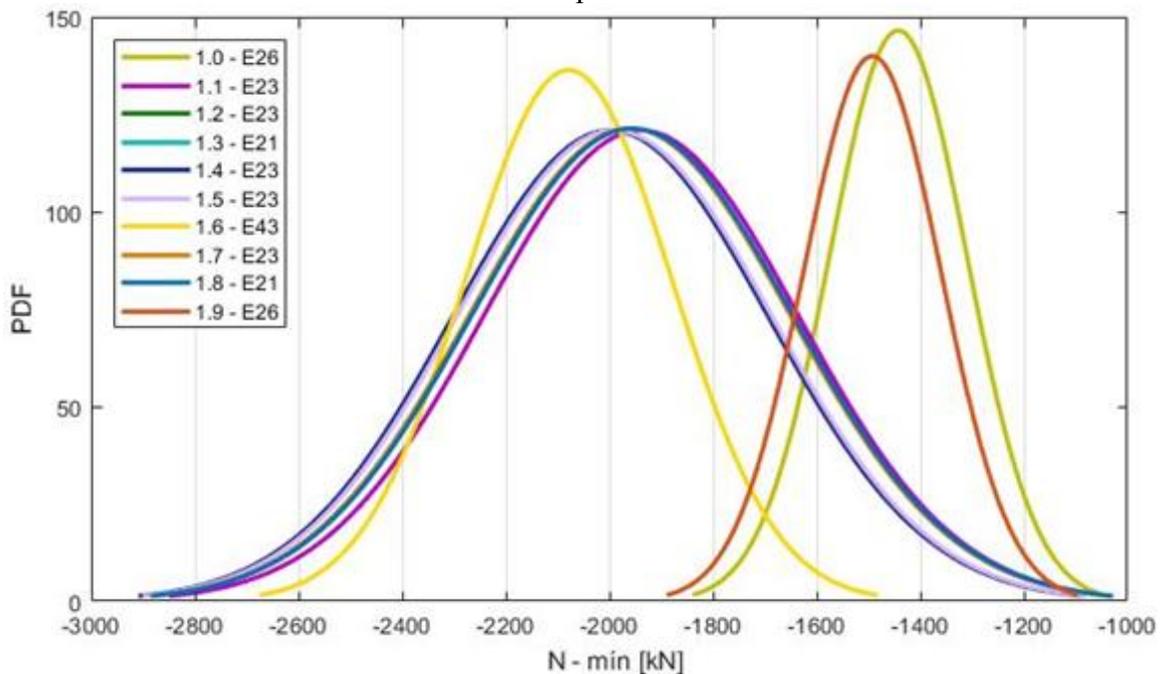


Figura 4.4 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo em cada combinação do Grupo 1

Podemos observar visualmente que estes resultados seguem a tendência de se distribuir normalmente de acordo com o Teorema do Limite Central. Esta normalidade também foi verificada através do teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas destacadas acima. A Tab. 4.5 traz os resultados do teste para o Grupo 1, onde o valor crítico para 5% de significância era de 0,03037, de modo que nenhuma distribuição foi rejeitada.

Tabela 4.5 – Teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas mais carregadas em cada combinação do Grupo 1.

| | Xk - máx | Xk - mín |
|-----|-------------|-------------|
| | Estatística | Estatística |
| 1.0 | 0.01658 | 0.00942 |
| 1.1 | 0.01310 | 0.01040 |
| 1.2 | 0.01310 | 0.01040 |
| 1.3 | 0.00960 | 0.01017 |
| 1.4 | 0.01310 | 0.01040 |
| 1.5 | 0.00960 | 0.01040 |
| 1.6 | 0.00968 | 0.01258 |
| 1.7 | 0.01302 | 0.01012 |
| 1.8 | 0.01287 | 0.01063 |
| 1.9 | 0.01988 | 0.01196 |

Em comparação com os resultados apresentados em Ramos (2016), a Tab. 4.6 traz um resumo das maiores diferenças de resultados encontradas entre os dois trabalhos, comparando os esforços máximos e mínimos para cada combinação do Grupo 1 através da média e do parâmetro Xk , onde “Maior” significa que os valores obtidos neste trabalho são maiores, em módulo.

Tabela 4.6 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 1 – comparação com Ramos (2016).

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|------------|-------|-----------|-------|------------|-------|-----------|-------|
| | μ [kN] | | Xk [kN] | | μ [kN] | | Xk [kN] | |
| 1.0 | 3.11% | Menor | 1.56% | Menor | 1.45% | Menor | 0.77% | Menor |
| 1.1 | 10.14% | Menor | 2.85% | Menor | 1.83% | Menor | 2.69% | Menor |
| 1.2 | 9.52% | Menor | 2.75% | Menor | 0.13% | Menor | 0.03% | Menor |
| 1.3 | 74.12% | Menor | 32.85% | Menor | 52.34% | Maior | 51.60% | Maior |
| 1.4 | 25.61% | Menor | 7.26% | Menor | 4.32% | Maior | 0.88% | Maior |
| 1.5 | 29.90% | Menor | 8.71% | Menor | 1.51% | Menor | 1.14% | Menor |
| 1.6 | 75.81% | Menor | 33.31% | Menor | 42.15% | Maior | 44.34% | Maior |
| 1.7 | 1.56% | Maior | 1.89% | Menor | 0.99% | Menor | 1.34% | Menor |
| 1.8 | 137.20% | Maior | 17.12% | Maior | 15.69% | Menor | 0.54% | Menor |
| 1.9 | 115.87% | Maior | 12.35% | Maior | 34.66% | Menor | 36.73% | Menor |

Nos esforços máximos, destacam-se as combinações 1.8 e 1.9, onde foram observados valores médios maiores que o dobro dos observados em Ramos (2016) quando os esforços normais são analisados separadamente, estaca por estaca.

Para os esforços mínimos, pode-se destacar as combinações 1.3 e 1.6, onde a diferença entre os valores de Xk obtidos são os maiores observados em todo o Grupo 1.

4.1.2. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 2

O segundo grupo de combinações apresenta situações de carregamento em que há um navio amarrado ao módulo através de cabos lançantes. As Tab. 4.7 e 4.8 trazem os valores extremos – máximos e mínimos – para cada um dos parâmetros estatísticos analisados (média, desvio padrão, coef. de variação e Xk) das combinações 2.0 e 2.5, que são as combinações que apresentaram os esforços normais máximos e mínimos dentro do Grupo 2, respectivamente.

Para a combinação 2.0, podemos observar que as estacas que apresentaram as médias máximas (E29) e mínimas (E26) também foram as que apresentaram os maiores e menores valores de Xk . A Fig. 4.5 mostra que estas estacas são as mais carregadas em mais de metade das simulações.

Na combinação 2.5 este comportamento se repete, inclusive para as mesmas estacas. A Fig. 4.6 mostra que estas estacas também são as mais exigidas na grande maioria das simulações.

Tabela 4.7 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 2.0.

| | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] | |
|-----------------|----------------|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|----------|
| Dados Atuais | μ - máx | \ | NI_E29 | 920.20 | 143.70 | 396.90 | 1492.00 | 0.1562 | 1351.30 |
| | μ - mín | \ | NI_E26 | -1683.00 | 145.80 | -2300.00 | -1189.00 | 0.0866 | -2120.40 |
| | σ - máx | \ | NI_E26 | -1683.00 | 145.80 | -2300.00 | -1189.00 | 0.0866 | -2120.40 |
| | σ - mín | | NI_E1 | -423.80 | 38.91 | -561.60 | -301.40 | 0.0918 | -540.53 |
| | δ - máx | \ | NI_E42 | 552.60 | 111.40 | 194.80 | 945.30 | 0.2016 | 886.80 |
| | δ - mín | | NI_E20 | -830.80 | 50.97 | -1008.00 | -661.60 | 0.0614 | -983.71 |
| | Xk - máx | \ | NI_E29 | 920.20 | 143.70 | 396.90 | 1492.00 | 0.1562 | 1351.30 |
| | Xk - mín | \ | NI_E26 | -1683.00 | 145.80 | -2300.00 | -1189.00 | 0.0866 | -2120.40 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 937.90 | 139.30 | 469.60 | 1492.00 | 0.1485 | 1355.80 |
| | Xk - mín | - | - | -1694.00 | 142.20 | -2300.00 | -1245.00 | 0.0839 | -2120.60 |

Tabela 4.8 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 2.5.

| | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] | |
|-----------------|----------------|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|----------|
| Dados Atuais | μ - máx | \ | NI_E29 | 317.60 | 206.20 | -374.20 | 1045.00 | 0.6492 | 936.20 |
| | μ - mín | \ | NI_E26 | -2341.00 | 212.90 | -2987.00 | -1472.00 | 0.0909 | -2979.70 |
| | σ - máx | | NI_E21 | -1993.00 | 303.60 | -2989.00 | -994.00 | 0.1523 | -2903.80 |
| | σ - mín | | NI_E13 | -1658.00 | 121.30 | -2056.00 | -1230.00 | 0.0732 | -2021.90 |
| | δ - máx | \ | NI_E36 | -70.30 | 218.50 | -824.30 | 703.90 | 3.1081 | -725.80 |
| | δ - mín | | NI_E1 | -1702.00 | 122.50 | -2094.00 | -1298.00 | 0.0720 | -2069.50 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | \ | NI_E29 | 317.60 | 206.20 | -374.20 | 1045.00 | 0.6492 | 936.20 |
| | Xk - mín | \ | NI_E26 | -2341.00 | 212.90 | -2987.00 | -1472.00 | 0.0909 | -2979.70 |
| | Xk - máx | - | - | 335.10 | 201.90 | -345.40 | 1045.00 | 0.6025 | 940.80 |
| | Xk - mín | - | - | -2379.00 | 197.80 | -2989.00 | -1772.00 | 0.0831 | -2972.40 |

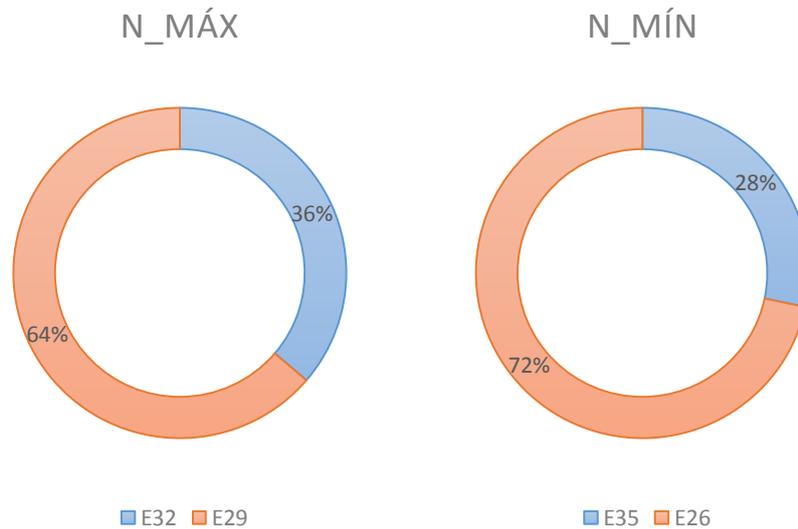


Figura 4.5 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 2.0.

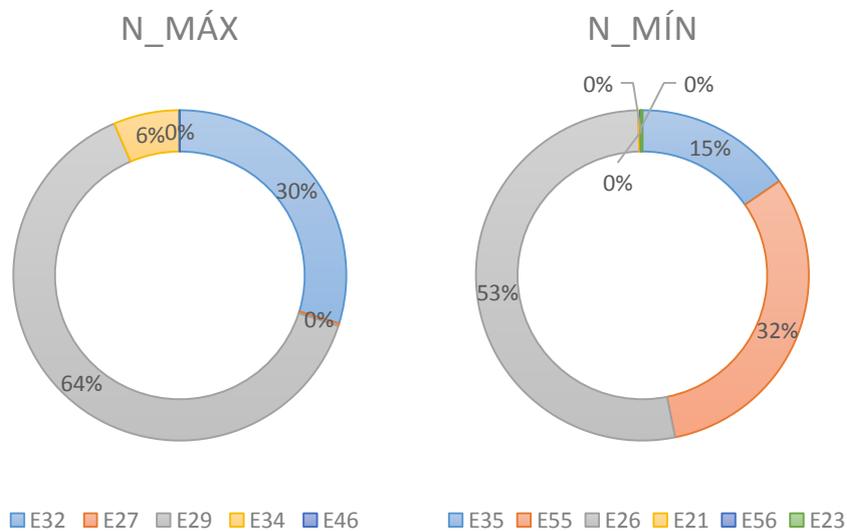


Figura 4.6 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 2.5.

As Tab. 4.9 e 4.10 apresentam um resumo dos resultados para as combinações do Grupo 2, evidenciando as combinações onde a estaca com parâmetros extremos de Xk coincide com valores extremos de outros parâmetros. Para o Grupo 2, podemos perceber que os valores máximos de Xk coincidem com as maiores médias em 60% das vezes, enquanto que para os valores mínimos essa situação ocorre em 90% das combinações. Observa-se também nas combinações 2.6 e 2.9 a estaca E29 apresenta os valores máximos para Xk e também para σ .

Tabela 4.9 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 2 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico.

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|---------------|------------------|----------|--------------|---------------|------------------|----------|--------------|
| | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] |
| 2.0 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E42 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E1 | NI_E20 | NI_E26 |
| 2.1 | NI_E29 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E13 | NI_E33 | NI_E26 |
| 2.2 | NI_E29 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E13 | NI_E6 | NI_E26 |
| 2.3 | NI_E29 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E13 | NI_E1 | NI_E26 |
| 2.4 | NI_E32 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E13 | NI_E13 | NI_E26 |
| 2.5 | NI_E29 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E13 | NI_E1 | NI_E26 |
| 2.6 | NI_E29 | NI_E29 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E55 | NI_E23 | NI_E26 |
| 2.7 | NI_E34 | NI_E23 | NI_E25 | NI_E32 | NI_E26 | NI_E49 | NI_E20 | NI_E23 |
| 2.8 | NI_E27 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E35 | NI_E59 | NI_E24 | NI_E35 |
| 2.9 | NI_E34 | NI_E29 | NI_E15 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E49 | NI_E37 | NI_E26 |

Tabela 4.10 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 2 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico.

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|---------------|------------------|----------|--------------|---------------|------------------|----------|--------------|
| | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] |
| 2.0 | 920.20 | 145.80 | 0.20 | 1351.30 | -1683.00 | 38.91 | 0.06 | -2120.40 |
| 2.1 | 354.60 | 303.60 | 3.99 | 973.20 | -2329.00 | 121.30 | 0.09 | -2967.70 |
| 2.2 | 362.60 | 303.60 | 3.36 | 981.20 | -2336.00 | 121.30 | 0.08 | -2974.70 |
| 2.3 | 359.30 | 303.60 | 3.26 | 977.90 | -2332.00 | 121.30 | 0.07 | -2970.70 |
| 2.4 | 326.60 | 303.60 | 4.05 | 930.60 | -2340.00 | 121.30 | 0.07 | -2978.70 |
| 2.5 | 317.60 | 303.60 | 3.11 | 936.20 | -2341.00 | 121.30 | 0.07 | -2979.70 |
| 2.6 | 342.90 | 209.80 | 6.68 | 972.30 | -2320.00 | 50.74 | 0.05 | -2942.50 |
| 2.7 | 654.30 | 308.90 | 1.65 | 1041.30 | -2268.00 | 44.96 | 0.05 | -2890.70 |
| 2.8 | 727.80 | 308.90 | 11.44 | 1159.40 | -2314.00 | 45.15 | 0.05 | -2952.70 |
| 2.9 | 679.00 | 149.60 | 0.26 | 1115.20 | -1733.00 | 45.38 | 0.05 | -2173.70 |

No Grupo 2 percebe-se também uma maior uniformidade dos valores extremos entre as dez combinações testadas. As Fig. 4.7 e 4.8 apresentam a distribuição de probabilidade das estacas onde foram observados os valores extremos de Xk para cada uma das dez combinações do Grupo 2.

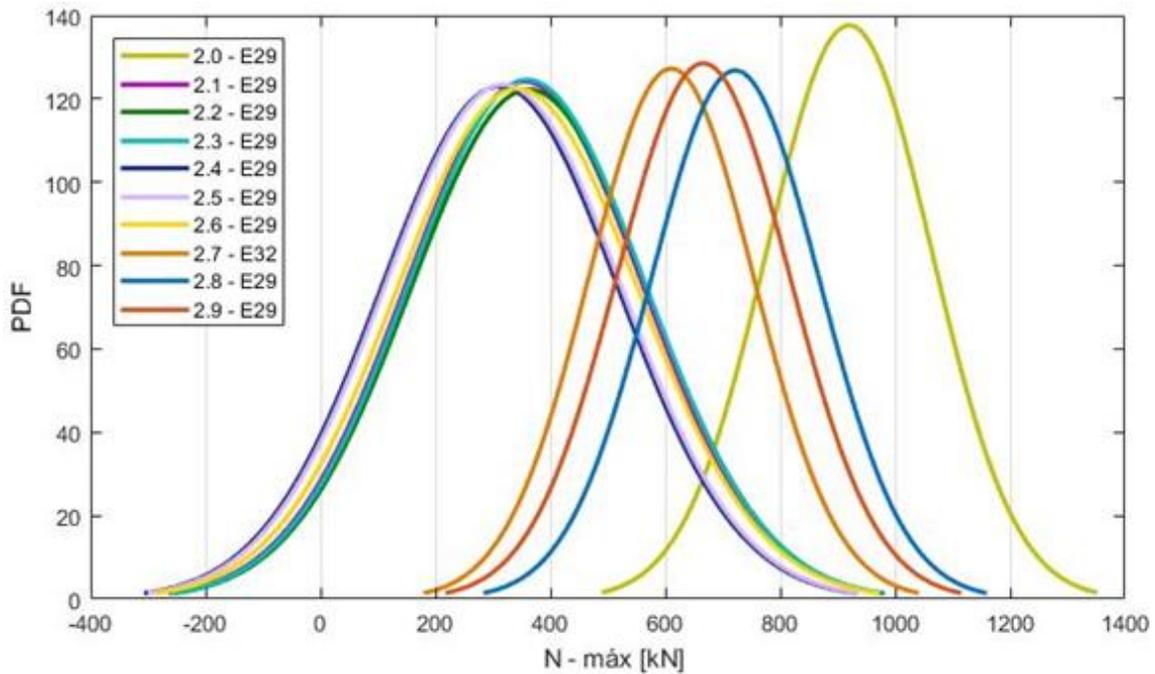


Figura 4.7 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo em cada combinação do Grupo 2.

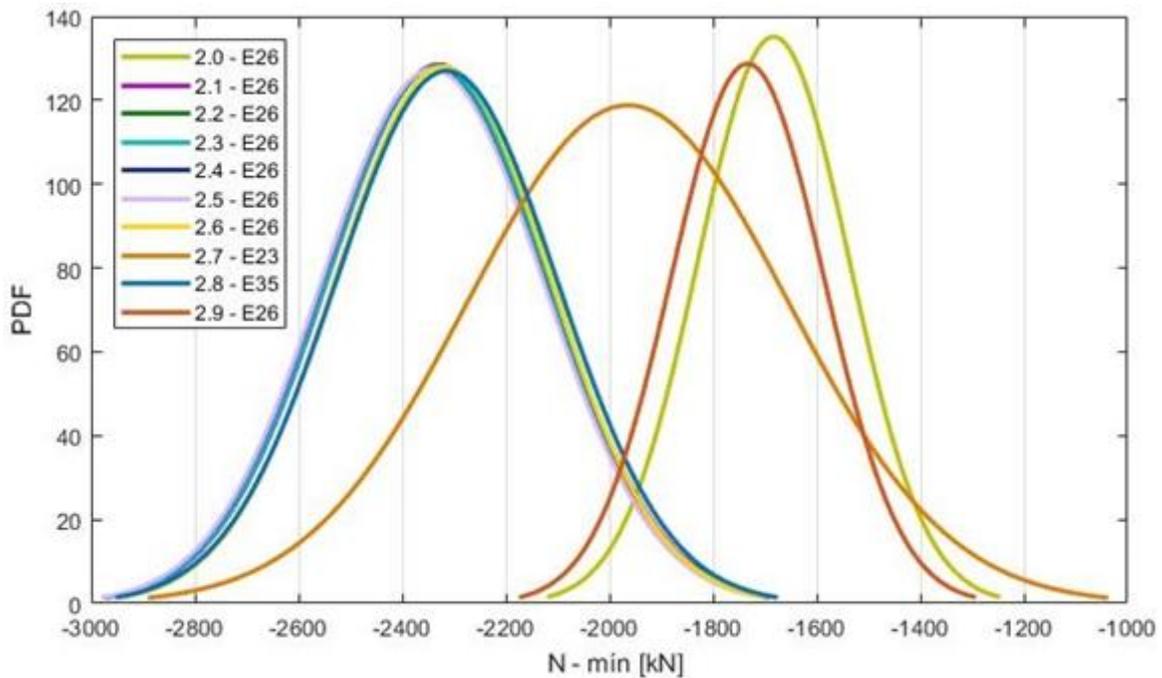


Figura 4.8 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo em cada combinação do Grupo 2.

Podemos observar visualmente que estes resultados seguem a tendência de se distribuir normalmente de acordo com o Teorema do Limite Central. Esta normalidade também foi verificada através do teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas destacadas acima. A Tab. 4.11 traz os resultados do teste para o Grupo 2, onde o valor crítico para 5% de significância era de 0,03037, de modo que nenhuma distribuição foi rejeitada.

Tabela 4.11 – Teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas mais carregadas em cada combinação do Grupo 2.

| | MÁX | MÍN |
|-----|-------------|-------------|
| | Estatística | Estatística |
| 2.0 | 0.01230 | 0.01584 |
| 2.1 | 0.01135 | 0.01153 |
| 2.2 | 0.01134 | 0.01153 |
| 2.3 | 0.01134 | 0.01152 |
| 2.4 | 0.01136 | 0.01160 |
| 2.5 | 0.01136 | 0.01155 |
| 2.6 | 0.01221 | 0.01236 |
| 2.7 | 0.02002 | 0.01089 |
| 2.8 | 0.01339 | 0.01118 |
| 2.9 | 0.01487 | 0.01663 |

Em comparação com os resultados apresentados em Ramos (2016), a Tab. 4.12 traz um resumo das maiores diferenças de resultados encontradas entre os dois trabalhos, comparando os esforços máximos e mínimos para cada combinação do Grupo 2 através da média e do parâmetro Xk , onde “Maior” significa que os valores obtidos neste trabalho são maiores, em módulo.

Tabela 4.12 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 2 – comparação com Ramos (2016).

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|------------|-------|-----------|-------|------------|-------|-----------|-------|
| | μ [kN] | | Xk [kN] | | μ [kN] | | Xk [kN] | |
| 2.0 | 1.89% | Menor | 0.33% | Menor | 0.65% | Menor | 0.01% | Menor |
| 2.1 | 4.81% | Menor | 0.78% | Menor | 0.51% | Menor | 0.21% | Menor |
| 2.2 | 4.83% | Menor | 0.83% | Menor | 2.14% | Menor | 0.06% | Maior |
| 2.3 | 2.26% | Menor | 0.14% | Menor | 1.14% | Menor | 0.08% | Maior |
| 2.4 | 6.42% | Menor | 3.11% | Menor | 0.93% | Menor | 0.29% | Maior |
| 2.5 | 5.22% | Menor | 0.49% | Menor | 1.60% | Menor | 0.25% | Maior |
| 2.6 | 4.62% | Menor | 0.84% | Menor | 0.47% | Menor | 0.08% | Menor |
| 2.7 | 3.95% | Menor | 1.83% | Menor | 1.39% | Menor | 1.65% | Menor |
| 2.8 | 1.79% | Menor | 3.56% | Menor | 0.09% | Menor | 0.18% | Menor |
| 2.9 | 4.29% | Menor | 5.00% | Menor | 0.80% | Menor | 0.32% | Maior |

Nos esforços máximos, observa-se que os resultados obtidos na análise por estacas realizada neste trabalho retornaram valores menores que em Ramos (2016) em todas as combinações.

Para os esforços mínimos, pode-se destacar que todas as médias observadas neste trabalho são menores, no entanto o parâmetro Xk encontrado foi maior em metade das simulações.

Para ambos os esforços máximos e mínimos, entretanto, não foram encontradas grandes diferenças como no Grupo 1. A maior diferença entre parâmetros Xk no Grupo 2 ficou em apenas 5%.

4.1.3. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 3

O Grupo 3 representa a situação de um navio amarrado à estrutura sujeito a ventos na direção transversal. As Tab. 4.13 e 4.14 trazem os valores extremos – máximos e mínimos – para cada um dos parâmetros estatísticos analisados (média, desvio padrão, coef. de variação e Xk) das combinações 3.0 e 3.2, que são as combinações que apresentaram os esforços normais máximos e mínimos dentro do Grupo 3, respectivamente.

Para a combinação 3.0, podemos observar que as estacas que apresentaram as médias máximas (E32) e mínimas (E26) também foram as que apresentaram os maiores e menores valores de Xk . A Fig. 4.9 mostra que estas estacas são as mais carregadas em praticamente metade das simulações.

A combinação 3.2 também repete esta situação, desta vez para as estacas E32 e E53. A Fig. 4.10 mostra que estas estacas são as mais carregadas em aproximadamente um terço das simulações. Também percebe-se a grande quantidade de estacas diferentes que registraram valores máximos e mínimos nesta combinação: seis estacas diferentes para os valores máximos e sete estacas diferentes para os valores mínimos.

Tabela 4.13 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 3.0.

| | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] |
|-----------------|----------------|----------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|
| Dados Atuais | μ - máx | \ NI_E32 | 872.10 | 131.00 | 463.70 | 1358.00 | 0.1502 | 1265.10 |
| | μ - mín | \ NI_E26 | -1629.00 | 132.70 | -2213.00 | -1136.00 | 0.0815 | -2027.10 |
| | σ - máx | \ NI_E18 | -1594.00 | 133.90 | -2208.00 | -1135.00 | 0.0840 | -1995.70 |
| | σ - mín | NI_E13 | -400.70 | 37.47 | -535.70 | -279.70 | 0.0935 | -513.11 |
| | δ - máx | \ NI_E42 | 580.30 | 108.40 | 244.40 | 966.70 | 0.1868 | 905.50 |
| | δ - mín | NI_E20 | -825.40 | 50.56 | -1000.00 | -656.90 | 0.0613 | -977.08 |
| | Xk - máx | \ NI_E32 | 872.10 | 131.00 | 463.70 | 1358.00 | 0.1502 | 1265.10 |
| | Xk - mín | \ NI_E26 | -1629.00 | 132.70 | -2213.00 | -1136.00 | 0.0815 | -2027.10 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - - | 897.70 | 128.50 | 463.70 | 1358.00 | 0.1431 | 1283.20 |
| | Xk - mín | - - | -1649.00 | 130.20 | -2213.00 | -1231.00 | 0.0790 | -2039.60 |

Tabela 4.14 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 3.2.

| | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] |
|-----------------|----------------|----------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|
| Dados Atuais | μ - máx | \ NI_E32 | 317.10 | 195.70 | -397.60 | 995.40 | 0.6172 | 904.20 |
| | μ - mín | NI_E53 | -2398.00 | 195.40 | -3084.00 | -1712.00 | 0.0815 | -2984.20 |
| | σ - máx | NI_E21 | -1992.00 | 304.00 | -3073.00 | -971.20 | 0.1526 | -2904.00 |
| | σ - mín | NI_E13 | -818.60 | 120.70 | -1215.00 | -428.70 | 0.1474 | -1180.70 |
| | δ - máx | \ NI_E36 | -106.00 | 212.90 | -835.40 | 622.80 | 2.0085 | -744.70 |
| | δ - mín | NI_E55 | -2398.00 | 195.30 | -3084.00 | -1728.00 | 0.0814 | -2983.90 |
| | Xk - máx | \ NI_E32 | 317.10 | 195.70 | -397.60 | 995.40 | 0.6172 | 904.20 |
| | Xk - mín | NI_E53 | -2398.00 | 195.40 | -3084.00 | -1712.00 | 0.0815 | -2984.20 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - - | 341.40 | 195.20 | -336.10 | 995.40 | 0.5718 | 927.00 |
| | Xk - mín | - - | -2418.00 | 191.50 | -3084.00 | -1847.00 | 0.0792 | -2992.50 |

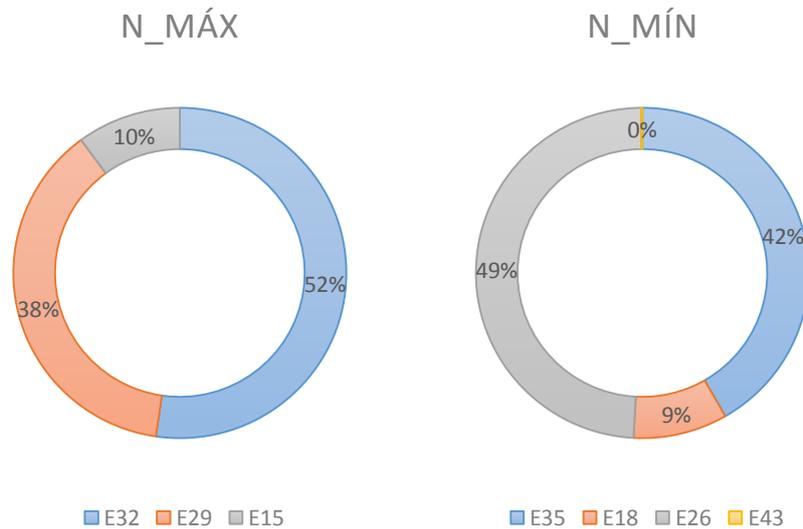


Figura 4.9 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 3.0.

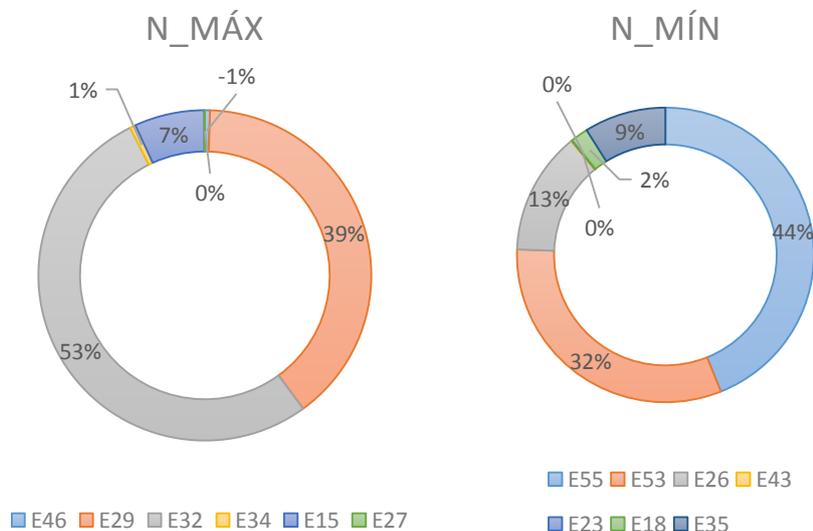


Figura 4.10 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 3.2.

As Tab. 4.15 e 4.16 apresentam um resumo dos resultados para as combinações do Grupo 3, evidenciando as combinações onde a estaca com parâmetros extremos de Xk coincide com valores extremos de outros parâmetros. Podemos perceber que os valores máximos de Xk coincidem com as maiores médias em 70% das vezes, enquanto que para os valores mínimos essa situação ocorre em 80% das combinações. Observa-se também na combinação 3.9 a estaca E15 apresenta os valores máximos para Xk e também para σ .

Tabela 4.15 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 3 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico.

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|---------------|------------------|----------|--------------|---------------|------------------|----------|--------------|
| | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] |
| 3.0 | NI_E32 | NI_E18 | NI_E42 | NI_E32 | NI_E26 | NI_E13 | NI_E20 | NI_E26 |
| 3.1 | NI_E32 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E32 | NI_E26 | NI_E13 | NI_E28 | NI_E26 |
| 3.2 | NI_E32 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E32 | NI_E53 | NI_E13 | NI_E55 | NI_E53 |
| 3.3 | NI_E29 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E53 | NI_E13 | NI_E48 | NI_E21 |
| 3.4 | NI_E32 | NI_E23 | NI_E36 | NI_E32 | NI_E55 | NI_E1 | NI_E60 | NI_E23 |
| 3.5 | NI_E29 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E55 | NI_E13 | NI_E60 | NI_E55 |
| 3.6 | NI_E32 | NI_E15 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E53 | NI_E40 | NI_E26 |
| 3.7 | NI_E17 | NI_E23 | NI_E42 | NI_E15 | NI_E43 | NI_E49 | NI_E37 | NI_E43 |
| 3.8 | NI_E27 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E35 | NI_E41 | NI_E41 | NI_E35 |
| 3.9 | NI_E17 | NI_E15 | NI_E46 | NI_E15 | NI_E43 | NI_E49 | NI_E37 | NI_E43 |

Tabela 4.16 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 3 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico.

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|---------------|------------------|----------|--------------|---------------|------------------|----------|--------------|
| | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] |
| 3.0 | 872.10 | 133.90 | 0.19 | 1265.10 | -1629.00 | 37.47 | 0.06 | -2027.10 |
| 3.1 | 306.60 | 303.60 | 2.28 | 892.50 | -2275.00 | 120.60 | 0.09 | -2889.40 |
| 3.2 | 317.10 | 304.00 | 2.01 | 904.20 | -2398.00 | 120.70 | 0.08 | -2984.20 |
| 3.3 | 304.20 | 304.00 | 1.94 | 895.20 | -2301.00 | 120.70 | 0.07 | -2904.00 |
| 3.4 | 302.30 | 304.00 | 2.32 | 889.40 | -2302.00 | 122.40 | 0.07 | -2904.00 |
| 3.5 | 268.70 | 304.00 | 1.89 | 859.70 | -2364.00 | 123.40 | 0.07 | -2949.60 |
| 3.6 | 289.50 | 201.40 | 2.80 | 889.90 | -2269.00 | 50.89 | 0.05 | -2866.30 |
| 3.7 | 765.10 | 309.00 | 2.10 | 1124.10 | -2265.00 | 45.05 | 0.05 | -2895.00 |
| 3.8 | 677.00 | 309.00 | 3.31 | 1054.70 | -2283.00 | 49.17 | 0.05 | -2913.00 |
| 3.9 | 715.30 | 137.80 | 0.28 | 1086.10 | -1709.00 | 45.48 | 0.05 | -2099.90 |

As Fig. 4.11 e 4.12 apresentam a distribuição de probabilidade das estacas onde foram observados os valores extremos de Xk para cada uma das dez combinações do Grupo 3.

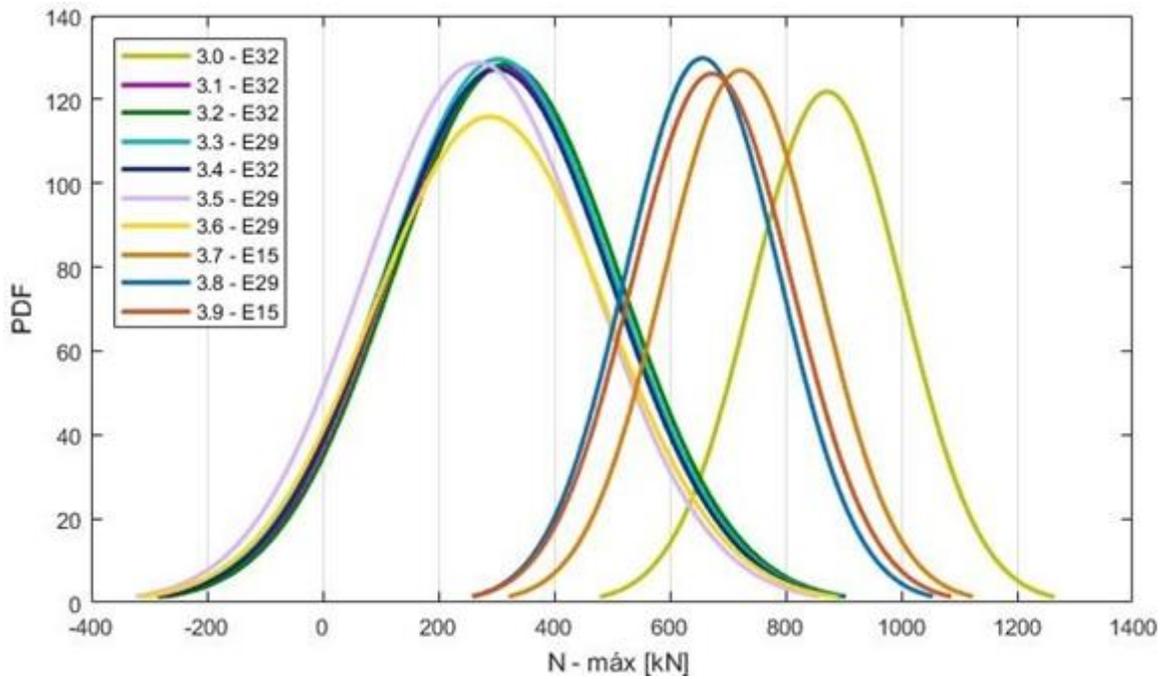


Figura 4.11 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo em cada combinação do Grupo 3.

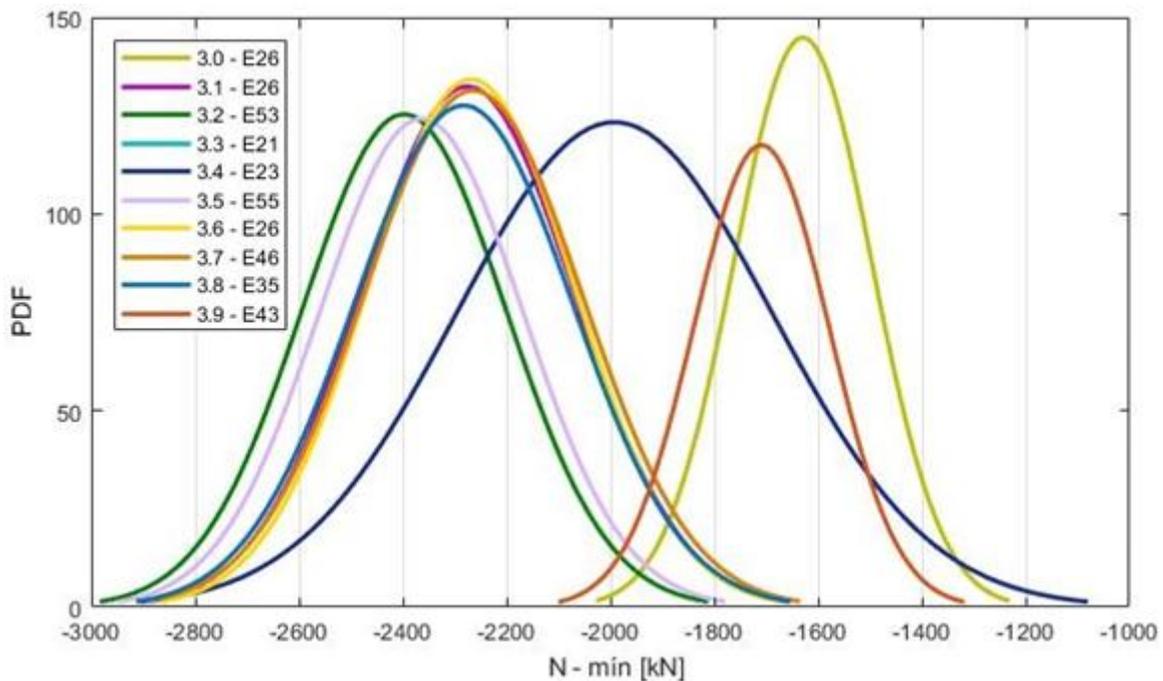


Figura 4.12 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo em cada combinação do Grupo 3.

Podemos observar visualmente que estes resultados seguem a tendência de se distribuir normalmente de acordo com o Teorema do Limite Central. Esta normalidade também foi verificada através do teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas destacadas acima. A Tab. 4.17 traz os resultados do teste para o Grupo 3, onde o valor crítico para 5% de significância era de 0,03037. Nenhuma distribuição foi rejeitada.

Tabela 4.17 – Teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas mais carregadas em cada combinação do Grupo 3.

| | MÁX | MÍN |
|-----|-------------|-------------|
| | Estatística | Estatística |
| 3.0 | 0.01638 | 0.01144 |
| 3.1 | 0.01029 | 0.01380 |
| 3.2 | 0.01050 | 0.01012 |
| 3.3 | 0.00880 | 0.01197 |
| 3.4 | 0.00957 | 0.01139 |
| 3.5 | 0.01072 | 0.01111 |
| 3.6 | 0.00974 | 0.01406 |
| 3.7 | 0.01404 | 0.01388 |
| 3.8 | 0.01363 | 0.01345 |
| 3.9 | 0.01324 | 0.01184 |

Em comparação com os resultados apresentados em Ramos (2016), a Tab. 4.18 traz um resumo das maiores diferenças de resultados encontradas entre os dois trabalhos, comparando os esforços máximos e mínimos para cada combinação do Grupo 3 através da média e do parâmetro Xk , onde “Maior” significa que os valores obtidos neste trabalho são maiores, em módulo.

Tabela 4.18 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 3 – comparação com Ramos (2016).

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|------------|-------|-----------|-------|------------|-------|-----------|-------|
| | μ [kN] | | Xk [kN] | | μ [kN] | | Xk [kN] | |
| 3.0 | 2.85% | Menor | 1.41% | Menor | 1.21% | Menor | 0.61% | Menor |
| 3.1 | 7.68% | Menor | 2.62% | Menor | 0.96% | Menor | 0.72% | Menor |
| 3.2 | 7.12% | Menor | 2.46% | Menor | 0.83% | Menor | 0.28% | Menor |
| 3.3 | 5.56% | Menor | 1.21% | Menor | 2.46% | Menor | 1.61% | Menor |
| 3.4 | 5.91% | Menor | 1.96% | Menor | 2.29% | Menor | 1.44% | Menor |
| 3.5 | 8.85% | Menor | 2.02% | Menor | 1.29% | Menor | 0.59% | Menor |
| 3.6 | 9.02% | Menor | 2.91% | Menor | 0.87% | Menor | 0.49% | Menor |
| 3.7 | 0.42% | Menor | 0.85% | Menor | 0.57% | Menor | 0.20% | Menor |
| 3.8 | 1.04% | Menor | 2.15% | Menor | 0.22% | Menor | 0.24% | Menor |
| 3.9 | 1.00% | Menor | 1.37% | Menor | 0.87% | Menor | 0.04% | Maior |

Nos esforços máximos, observa-se que os resultados obtidos na análise por estacas realizada neste trabalho retornaram valores menores do que os apresentados em Ramos (2016) em todas as combinações.

Para os esforços mínimos, apenas o parâmetro Xk apresentado neste trabalho foi maior, porém em apenas 0,04%.

Para ambos os esforços máximos e mínimos, entretanto, não foram encontradas grandes diferenças como no Grupo 1. A maior diferença entre parâmetros Xk no Grupo 3 ficou em apenas 2,91%.

4.1.4. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 4

Neste grupo, também temos um navio amarrado à estrutura, porém com o vento atuando no sentido longitudinal da embarcação. As Tab. 4.19 e 4.20 trazem os valores extremos – máximos e mínimos – para cada um dos parâmetros estatísticos analisados (média, desvio padrão, coef. de variação e Xk) das combinações 4.0 e 4.2, que são as combinações que apresentaram os esforços normais máximos e mínimos dentro do Grupo 4, respectivamente.

Para a combinação 4.0, podemos observar que as estacas que apresentaram as médias máximas (E29) e mínimas (E26) também foram as que apresentaram os maiores e menores valores de Xk . A Fig. 4.13 mostra que estas estacas são as mais carregadas em aproximadamente dois terços das simulações.

Na combinação 4.2 as estacas E29 e E53 apresentam os valores médios e de Xk extremos. A Fig. 4.14 mostra que estas estacas são as mais carregadas na grande maioria das simulações realizadas nesta combinação.

Tabela 4.19 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 4.0.

| | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] | |
|-----------------|-----------------|------------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|----------|
| Dados Atuais | μ - máx | \ NI_E29 | 874.00 | 131.20 | 351.10 | 1363.00 | 0.1501 | 1267.60 | |
| | μ - mín | \ NI_E26 | -1634.00 | 133.20 | -2222.00 | -1142.00 | 0.0815 | -2033.60 | |
| | σ - máx | \ NI_E18 | -1564.00 | 133.30 | -2159.00 | -1105.00 | 0.0852 | -1963.90 | |
| | σ - mín | NI_E13 | -398.60 | 37.59 | -534.70 | -273.80 | 0.0943 | -511.37 | |
| | δ - máx | \ NI_E42 | 567.80 | 108.80 | 224.10 | 952.80 | 0.1916 | 894.20 | |
| | δ - mín | NI_E37 | -802.40 | 49.17 | -967.90 | -640.90 | 0.0613 | -949.91 | |
| | Xk - máx | \ NI_E29 | 874.00 | 131.20 | 351.10 | 1363.00 | 0.1501 | 1267.60 | |
| | Xk - mín | \ NI_E26 | -1634.00 | 133.20 | -2222.00 | -1142.00 | 0.0815 | -2033.60 | |
| | Ramos (2016) | Xk - máx | - - | 893.00 | 128.40 | 458.70 | 1363.00 | 0.1438 | 1278.20 |
| | | Xk - mín | - - | -1647.00 | 130.60 | -2222.00 | -1227.00 | 0.0793 | -2038.80 |

Tabela 4.20 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 4.2.

| | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] | |
|-----------------|----------------|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|----------|
| Dados Atuais | μ - máx | \ | NI_E29 | 316.30 | 197.60 | -497.40 | 935.60 | 0.6247 | 909.10 |
| | μ - mín | | NI_E53 | -2400.00 | 195.30 | -3087.00 | -1728.00 | 0.0814 | -2985.90 |
| | σ - máx | | NI_E21 | -1991.00 | 304.00 | -3072.00 | -971.20 | 0.1527 | -2903.00 |
| | σ - mín | | NI_E13 | -816.50 | 120.80 | -1213.00 | -417.40 | 0.1479 | -1178.90 |
| | δ - máx | \ | NI_E36 | -116.00 | 212.00 | -838.30 | 622.30 | 1.8276 | -752.00 |
| | δ - mín | | NI_E53 | -2400.00 | 195.30 | -3087.00 | -1728.00 | 0.0814 | -2985.90 |
| | Xk - máx | \ | NI_E29 | 316.30 | 197.60 | -497.40 | 935.60 | 0.6247 | 909.10 |
| | Xk - mín | | NI_E53 | -2400.00 | 195.30 | -3087.00 | -1728.00 | 0.0814 | -2985.90 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 336.60 | 195.10 | -334.60 | 990.20 | 0.5796 | 921.90 |
| | Xk - mín | - | - | -2418.00 | 191.50 | -3087.00 | -1851.00 | 0.0792 | -2992.50 |



Figura 4.13 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 4.0.

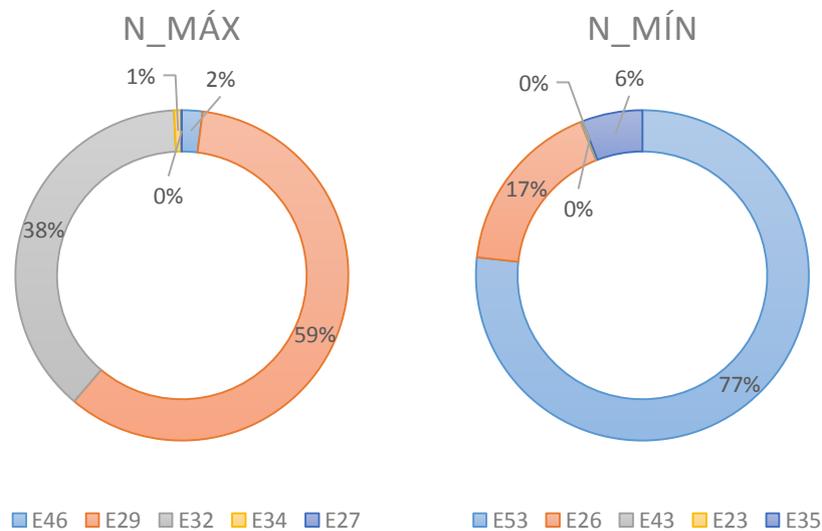


Figura 4.14 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 4.2.

As Tab. 4.21 e 4.22 apresentam um resumo dos resultados para as combinações do Grupo 4, evidenciando as combinações onde a estaca com parâmetros extremos de Xk coincide com valores extremos de outros parâmetros. Neste grupo, as estacas com os valores extremos da média e do parâmetro Xk coincidiram em 70% das vezes tanto para os valores máximos quanto para os mínimos. A estaca E53 também apresentou o menor coeficiente de variação na combinação 4.2.

Tabela 4.21 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 4 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico.

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|---------------|------------------|----------|--------------|---------------|------------------|----------|--------------|
| | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] |
| 4.0 | NI_E29 | NI_E18 | NI_E42 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E13 | NI_E37 | NI_E26 |
| 4.1 | NI_E29 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E13 | NI_E28 | NI_E26 |
| 4.2 | NI_E29 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E53 | NI_E13 | NI_E53 | NI_E53 |
| 4.3 | NI_E29 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E53 | NI_E13 | NI_E48 | NI_E21 |
| 4.4 | NI_E32 | NI_E23 | NI_E36 | NI_E32 | NI_E55 | NI_E1 | NI_E60 | NI_E26 |
| 4.5 | NI_E29 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E53 | NI_E13 | NI_E48 | NI_E53 |
| 4.6 | NI_E29 | NI_E29 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E53 | NI_E40 | NI_E26 |
| 4.7 | NI_E17 | NI_E23 | NI_E42 | NI_E15 | NI_E43 | NI_E49 | NI_E37 | NI_E23 |
| 4.8 | NI_E27 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E35 | NI_E41 | NI_E41 | NI_E35 |
| 4.9 | NI_E17 | NI_E29 | NI_E46 | NI_E15 | NI_E43 | NI_E49 | NI_E37 | NI_E43 |

Tabela 4.22 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 4 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico.

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|---------------|------------------|----------|--------------|---------------|------------------|----------|--------------|
| | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] |
| 4.0 | 874.00 | 133.30 | 0.19 | 1267.60 | -1634.00 | 37.59 | 0.06 | -2033.60 |
| 4.1 | 308.40 | 303.60 | 2.05 | 900.00 | -2281.00 | 120.70 | 0.09 | -2896.30 |
| 4.2 | 316.30 | 304.00 | 1.83 | 909.10 | -2400.00 | 120.80 | 0.08 | -2985.90 |
| 4.3 | 313.20 | 304.00 | 1.77 | 906.00 | -2304.00 | 120.80 | 0.07 | -2904.00 |
| 4.4 | 285.00 | 304.00 | 2.09 | 867.60 | -2301.00 | 122.40 | 0.07 | -2904.20 |
| 4.5 | 277.70 | 304.00 | 1.73 | 870.80 | -2366.00 | 123.50 | 0.07 | -2951.60 |
| 4.6 | 286.20 | 200.20 | 2.25 | 886.80 | -2263.00 | 50.78 | 0.05 | -2860.00 |
| 4.7 | 748.20 | 308.90 | 1.97 | 1098.40 | -2260.00 | 44.97 | 0.05 | -2890.70 |
| 4.8 | 673.00 | 309.00 | 2.58 | 1051.60 | -2266.00 | 49.18 | 0.05 | -2894.20 |
| 4.9 | 698.40 | 136.50 | 0.28 | 1060.40 | -1704.00 | 45.39 | 0.05 | -2094.60 |

As Fig. 4.15 e 4.16 apresentam a distribuição de probabilidade das estacas onde foram observados os valores extremos de Xk para cada uma das dez combinações do Grupo 4.

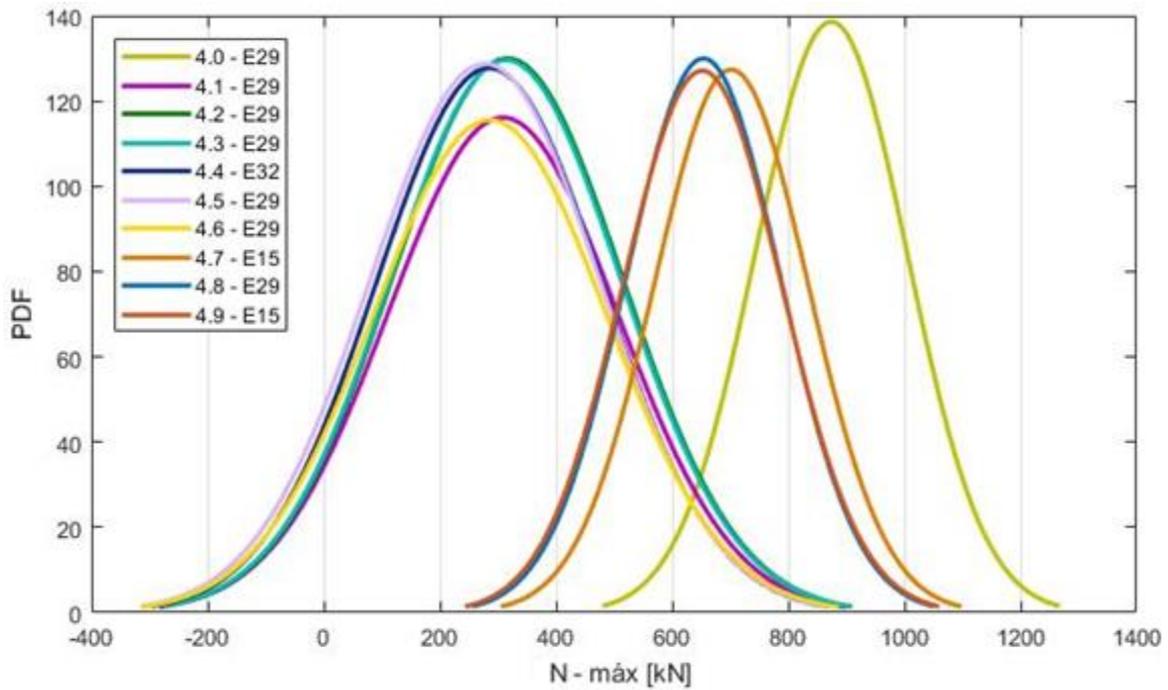


Figura 4.15 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo em cada combinação do Grupo 4.

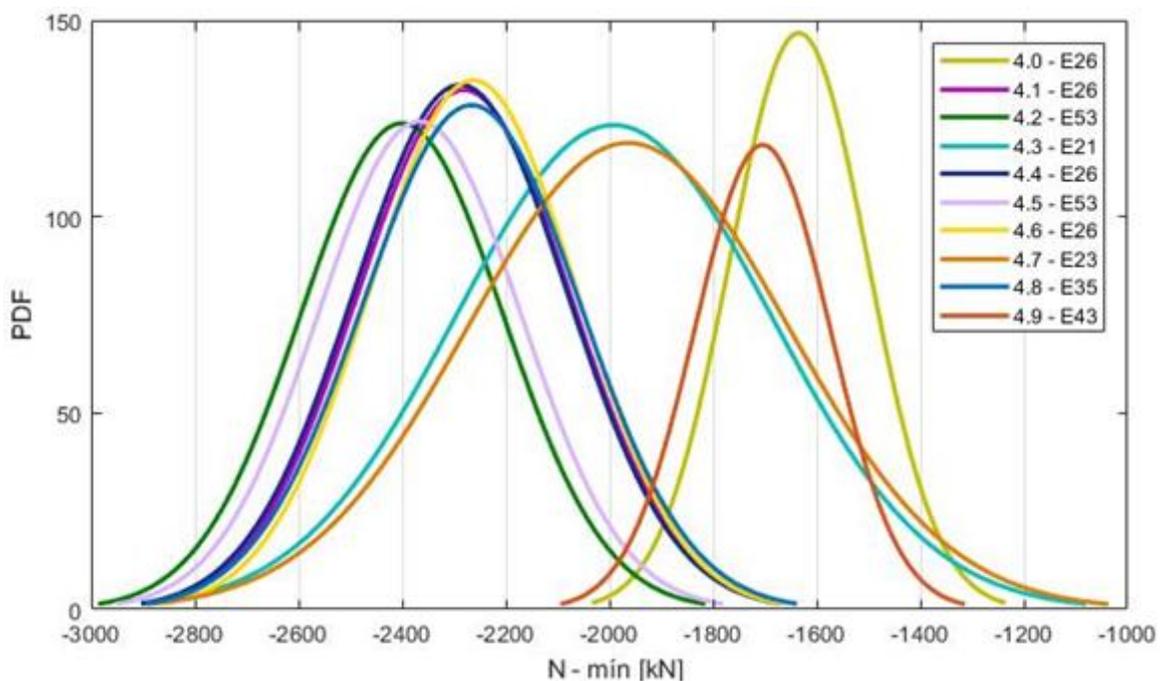


Figura 4.16 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo em cada combinação do Grupo 4.

Podemos observar visualmente que estes resultados seguem a tendência de se distribuir normalmente de acordo com o Teorema do Limite Central. Esta normalidade também foi verificada através do teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas destacadas acima. A Tab. 4.23 traz os resultados do teste para o Grupo 4, onde o valor crítico para 5% de significância era de 0,03037. Todas as distribuições ajustaram-se à normal.

Tabela 4.23 – Teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas mais carregadas em cada combinação do Grupo 4.

| | MÁX | MÍN |
|-----|-------------|-------------|
| | Estatística | Estatística |
| 4.0 | 0.01086 | 0.01185 |
| 4.1 | 0.01168 | 0.01397 |
| 4.2 | 0.01084 | 0.00998 |
| 4.3 | 0.01096 | 0.01193 |
| 4.4 | 0.01149 | 0.01357 |
| 4.5 | 0.01214 | 0.01029 |
| 4.6 | 0.00823 | 0.01440 |
| 4.7 | 0.01391 | 0.01080 |
| 4.8 | 0.01360 | 0.01093 |
| 4.9 | 0.01240 | 0.01170 |

Em comparação com os resultados apresentados em Ramos (2016), a Tab. 4.18 traz um resumo das maiores diferenças de resultados encontradas entre os dois trabalhos, comparando os esforços máximos e mínimos para cada combinação do Grupo 4 através da média e do parâmetro Xk , onde “Maior” significa que os valores obtidos neste trabalho são maiores, em módulo.

Tabela 4.24 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 4 – comparação com Ramos (2016).

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|------------|-------|-----------|-------|------------|-------|-----------|-------|
| | μ [kN] | | Xk [kN] | | μ [kN] | | Xk [kN] | |
| 4.0 | 2.13% | Menor | 0.83% | Menor | 0.79% | Menor | 0.26% | Menor |
| 4.1 | 5.89% | Menor | 1.33% | Menor | 0.61% | Menor | 0.44% | Menor |
| 4.2 | 6.03% | Menor | 1.39% | Menor | 0.74% | Menor | 0.22% | Menor |
| 4.3 | 3.78% | Menor | 0.63% | Menor | 2.25% | Menor | 1.40% | Menor |
| 4.4 | 7.62% | Menor | 2.74% | Menor | 2.29% | Menor | 1.45% | Menor |
| 4.5 | 4.99% | Menor | 0.57% | Menor | 1.21% | Menor | 0.52% | Menor |
| 4.6 | 6.71% | Menor | 1.59% | Menor | 0.79% | Menor | 0.40% | Menor |
| 4.7 | 0.36% | Menor | 0.71% | Menor | 0.62% | Menor | 0.26% | Menor |
| 4.8 | 1.06% | Menor | 2.23% | Menor | 0.26% | Menor | 0.35% | Menor |
| 4.9 | 1.01% | Menor | 1.30% | Menor | 0.81% | Menor | 0.16% | Maior |

Nos esforços máximos, observa-se que os resultados obtidos na análise por estacas realizada neste trabalho retornaram valores menores do que os apresentados em Ramos (2016) em todas as combinações.

Para os esforços mínimos, apenas o parâmetro Xk apresentado neste trabalho foi maior, porém em apenas 0,16%.

Para ambos os esforços máximos e mínimos, entretanto, não foram encontradas grandes diferenças como no Grupo 1. A maior diferença no Grupo 4 ficou em apenas 2,74% na combinação 4.4, para os valores de Xk .

4.1.5. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 5

O quinto grupo de combinações representa a situação de dois navios amarrados à estrutura, com o vento atuando no sentido transversal das embarcações. As Tab. 4.25 e 4.26 trazem os valores extremos – máximos e mínimos – para cada um dos parâmetros estatísticos analisados (média, desvio padrão, coef. de variação e Xk) das combinações 5.0 e 5.4, que são as combinações que apresentaram os esforços normais máximos e mínimos dentro do Grupo 5, respectivamente.

Para a combinação 5.0, podemos observar que as estacas que apresentaram as médias máximas (E29) e mínimas (E26) também foram as que apresentaram os maiores e menores valores de Xk . A Fig. 4.17 mostra que estas estacas são as mais carregadas na maior parte das simulações.

Na combinação 5.4 as estacas E29 e E26 apresentam os valores médios e de Xk extremos. A Fig. 4.18 mostra que estas estacas são as mais carregadas na maioria das simulações realizadas nesta combinação, porém, novamente, nota-se um grande número de estacas que também apresentaram valores extremos em menor quantidade (oito estacas em cada caso).

Tabela 4.25 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 5.0.

| | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] | | |
|-----------------|-----------------|------------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|----------|----------|
| Dados Atuais | μ - máx | \ | NI_E29 | 886.10 | 135.00 | 357.30 | 1393.00 | 0.1524 | 1291.10 | |
| | μ - mín | \ | NI_E26 | -1651.00 | 137.30 | -2181.00 | -1149.00 | 0.0832 | -2062.90 | |
| | σ - máx | \ | NI_E18 | -1609.00 | 137.50 | -2092.00 | -1142.00 | 0.0855 | -2021.50 | |
| | σ - mín | | NI_E13 | -399.70 | 38.10 | -538.90 | -280.40 | 0.0953 | -514.00 | |
| | δ - máx | \ | NI_E42 | 600.20 | 113.10 | 237.70 | 933.50 | 0.1884 | 939.50 | |
| | δ - mín | | NI_E20 | -827.70 | 50.69 | -994.90 | -653.50 | 0.0612 | -979.77 | |
| | Xk - máx | \ | NI_E29 | 886.10 | 135.00 | 357.30 | 1393.00 | 0.1524 | 1291.10 | |
| | Xk - mín | \ | NI_E26 | -1651.00 | 137.30 | -2181.00 | -1149.00 | 0.0832 | -2062.90 | |
| | Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 918.90 | 132.10 | 459.90 | 1393.00 | 0.1438 | 1315.20 |
| | | Xk - mín | - | - | -1675.00 | 134.60 | -2181.00 | -1233.00 | 0.0804 | -2078.80 |

Tabela 4.26 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 5.4.

| | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] |
|-----------------|----------------|----------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|
| Dados Atuais | μ - máx | \ NI_E29 | 283.90 | 200.00 | -398.50 | 1034.00 | 0.7045 | 883.90 |
| | μ - mín | \ NI_E26 | -2310.00 | 208.50 | -3010.00 | -1566.00 | 0.0903 | -2935.50 |
| | σ - máx | NI_E21 | -1994.00 | 303.70 | -3006.00 | -993.60 | 0.1523 | -2905.10 |
| | σ - mín | NI_E13 | -1668.00 | 120.80 | -2057.00 | -1290.00 | 0.0724 | -2030.40 |
| | δ - máx | \ NI_E36 | -96.36 | 214.50 | -825.50 | 738.60 | 2.2260 | -739.86 |
| | δ - mín | \ NI_E13 | -1668.00 | 120.80 | -2057.00 | -1290.00 | 0.0724 | -2030.40 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | \ NI_E29 | 283.90 | 200.00 | -398.50 | 1034.00 | 0.7045 | 883.90 |
| | Xk - mín | NI_E26 | -2310.00 | 208.50 | -3010.00 | -1566.00 | 0.0903 | -2935.50 |
| | Xk - máx | - - | 315.20 | 196.10 | -346.60 | 1061.00 | 0.6221 | 903.50 |
| | Xk - mín | - - | -2363.00 | 194.50 | -3024.00 | -1770.00 | 0.0823 | -2946.50 |

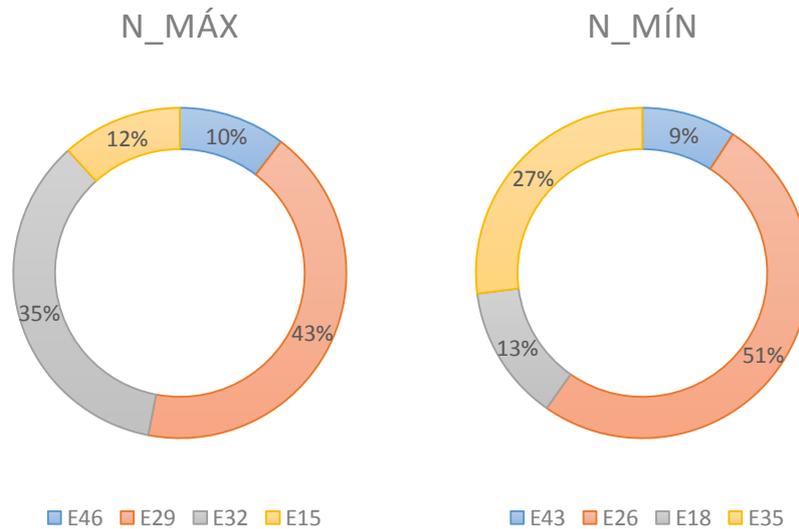


Figura 4.17 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 5.0.

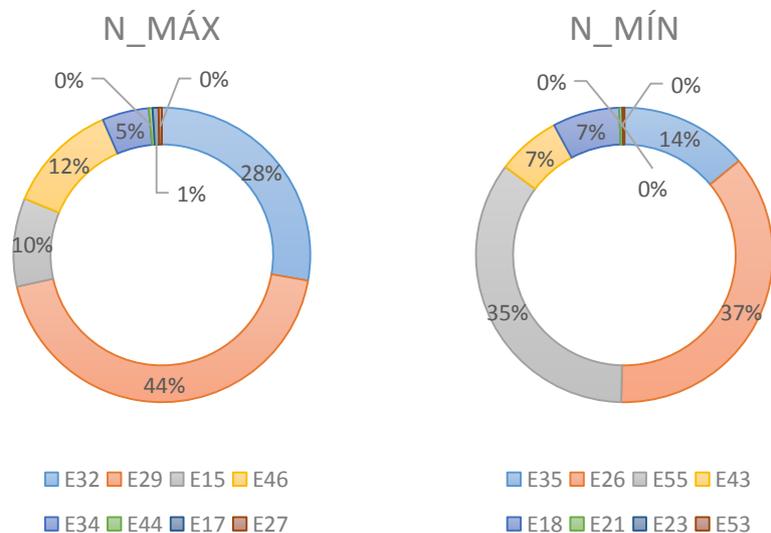


Figura 4.18 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 5.4.

As Tab. 4.27 e 4.28 apresentam um resumo dos resultados para as combinações do Grupo 5, evidenciando as combinações onde a estaca com valores extremos de Xk coincide com valores extremos de outros parâmetros. Neste grupo, as estacas com os valores máximos de média e parâmetro Xk coincidiram em 71% das vezes. Para os valores mínimos, foram 85%. Apenas a combinação 5.6 repetiu a estaca com maior desvio-padrão e maior parâmetro Xk .

Tabela 4.27 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 5 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico.

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|---------------|------------------|----------|--------------|---------------|------------------|----------|--------------|
| | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] |
| 5.0 | NI_E29 | NI_E18 | NI_E42 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E13 | NI_E20 | NI_E26 |
| 5.1 | NI_E29 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E13 | NI_E33 | NI_E26 |
| 5.2 | NI_E29 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E55 | NI_E13 | NI_E6 | NI_E26 |
| 5.3 | NI_E29 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E13 | NI_E1 | NI_E26 |
| 5.4 | NI_E29 | NI_E21 | NI_E36 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E13 | NI_E13 | NI_E26 |
| 5.5 | NI_E17 | NI_E23 | NI_E42 | NI_E15 | NI_E43 | NI_E49 | NI_E37 | NI_E43 |
| 5.6 | NI_E27 | NI_E29 | NI_E46 | NI_E29 | NI_E35 | NI_E41 | NI_E37 | NI_E35 |

Tabela 4.28 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 5 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico.

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|---------------|------------------|----------|--------------|---------------|------------------|----------|--------------|
| | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] |
| 5.0 | 886.10 | 137.50 | 0.19 | 1291.10 | -1651.00 | 38.10 | 0.06 | -2062.90 |
| 5.1 | 321.00 | 303.70 | 2.66 | 921.00 | -2298.00 | 120.80 | 0.09 | -2923.50 |
| 5.2 | 329.00 | 303.70 | 2.35 | 929.00 | -2307.00 | 120.80 | 0.08 | -2930.50 |
| 5.3 | 325.70 | 303.70 | 2.31 | 925.70 | -2300.00 | 120.80 | 0.07 | -2925.50 |
| 5.4 | 283.90 | 303.70 | 2.23 | 883.90 | -2310.00 | 120.80 | 0.07 | -2935.50 |
| 5.5 | 666.50 | 309.20 | 2.39 | 1041.20 | -2279.00 | 49.50 | 0.05 | -2913.80 |
| 5.6 | 646.00 | 142.10 | 0.27 | 1054.40 | -1743.00 | 49.61 | 0.05 | -2146.80 |

As Fig. 4.19 e 4.20 apresentam a distribuição de probabilidade das estacas onde foram observados os valores extremos de Xk para cada uma das sete combinações do Grupo 5.

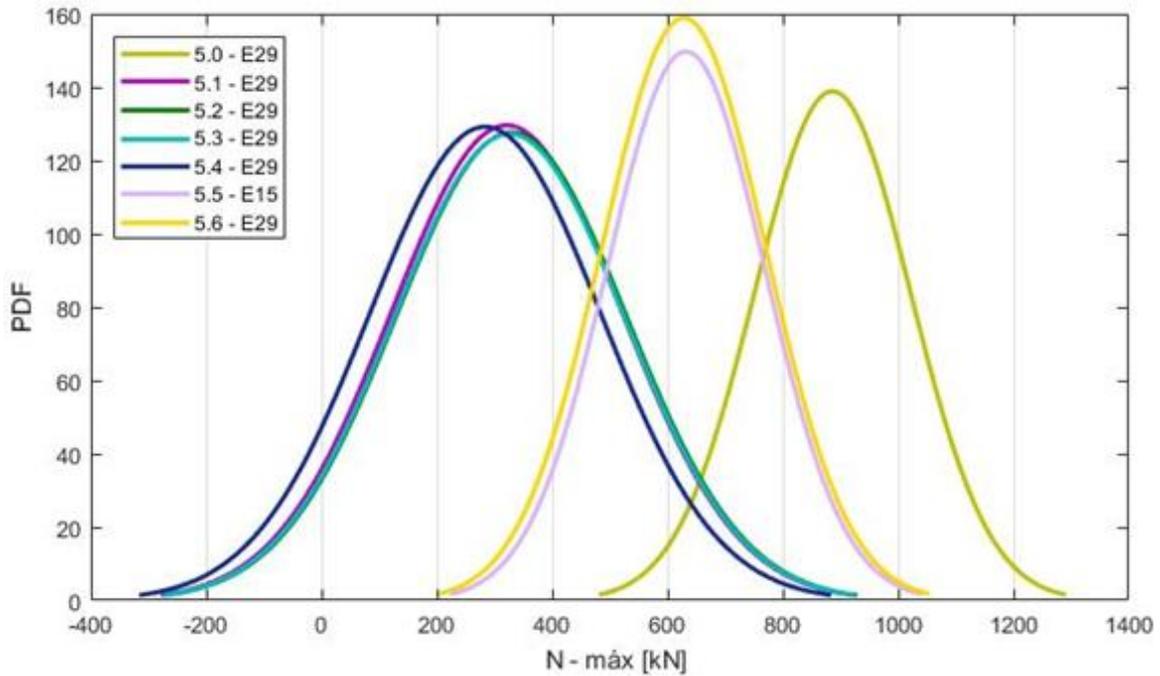


Figura 4.19 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo em cada combinação do Grupo 5.

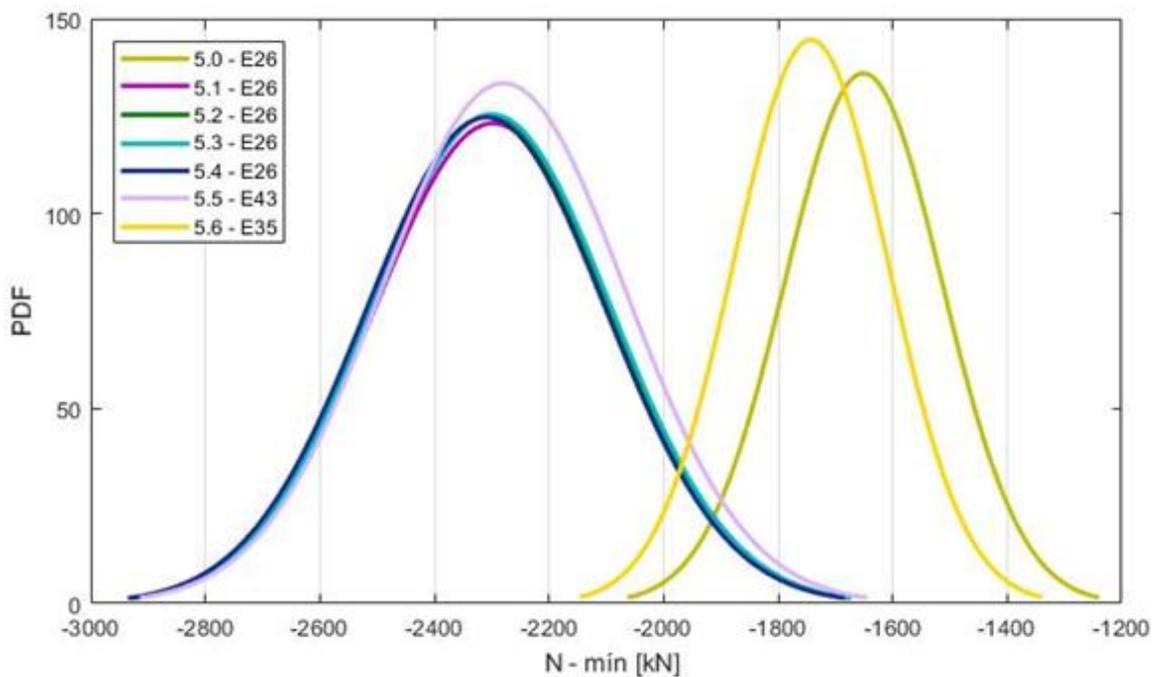


Figura 4.20 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo em cada combinação do Grupo 5.

Podemos observar visualmente que estes resultados seguem a tendência de se distribuir normalmente de acordo com o Teorema do Limite Central. Esta normalidade também foi verificada através do teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas destacadas acima. A Tab. 4.29 traz os

resultados do teste para o Grupo 5, onde o valor crítico para 5% de significância é de 0,03037. Todas as distribuições ajustaram-se a uma distribuição normal.

Tabela 4.29 – Teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas mais carregadas em cada combinação do Grupo 5.

| | MÁX | MÍN |
|-----|-------------|-------------|
| | Estatística | Estatística |
| 5.0 | 0.01541 | 0.03008 |
| 5.1 | 0.01273 | 0.01394 |
| 5.2 | 0.01273 | 0.01577 |
| 5.3 | 0.01346 | 0.01380 |
| 5.4 | 0.01257 | 0.01361 |
| 5.5 | 0.01209 | 0.01778 |
| 5.6 | 0.01364 | 0.02530 |

Em comparação com os resultados apresentados em Ramos (2016), a Tab. 4.30 traz um resumo das maiores diferenças de resultados encontradas entre os dois trabalhos, comparando os esforços máximos e mínimos para cada combinação do Grupo 5 através da média e do parâmetro Xk , onde “Maior” significa que os valores obtidos neste trabalho são maiores, em módulo.

Tabela 4.30 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 5 – comparação com Ramos (2016).

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|------------|-------|-----------|-------|------------|-------|-----------|-------|
| | μ [kN] | | Xk [kN] | | μ [kN] | | Xk [kN] | |
| 5.0 | 3.57% | Menor | 1.83% | Menor | 1.43% | Menor | 0.76% | Menor |
| 5.1 | 9.07% | Menor | 2.44% | Menor | 0.99% | Menor | 0.64% | Menor |
| 5.2 | 9.02% | Menor | 2.48% | Menor | 2.74% | Menor | 2.10% | Menor |
| 5.3 | 6.00% | Menor | 1.32% | Menor | 1.79% | Menor | 0.53% | Menor |
| 5.4 | 9.93% | Menor | 2.17% | Menor | 2.24% | Menor | 0.37% | Menor |
| 5.5 | 1.02% | Menor | 1.57% | Menor | 0.91% | Menor | 0.30% | Menor |
| 5.6 | 2.56% | Menor | 3.65% | Menor | 1.08% | Menor | 0.02% | Menor |

Para o Grupo 5, todos os valores do parâmetro Xk encontrados neste trabalho foram menores, chegando a 3,56% de diferença na combinação 5.6, por exemplo.

4.1.6. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 6

O último grupo de combinações estudado também possui dois navios amarrados à estrutura, porém sendo considerada uma situação de ventos extremos, também no sentido transversal. As Tab. 4.31 e 4.32 trazem os valores extremos – máximos e mínimos – para cada um dos parâmetros estatísticos analisados (média, desvio padrão, coef. de variação e Xk) das combinações 6.0 e 6.2, que são as combinações que apresentaram os esforços normais máximos e mínimos dentro do Grupo 6,

respectivamente.

Para a combinação 6.0, podemos observar que as estacas que apresentaram as médias máximas (E29) e mínimas (E26) também foram as que apresentaram os maiores e menores valores de Xk . A Fig. 4.21 mostra que estas estacas são as mais carregadas em menos da metade das simulações executadas.

Na combinação 6.2 as estacas E29 e E26 também apresentam os valores médios e de Xk extremos. A Fig. 4.22 mostra que, assim como para os valores máximos, estas estacas são as mais carregadas em pouco menos da metade das simulações realizadas. Novamente, nota-se um grande número de estacas que também apresentaram valores extremos em menor quantidade (seis estacas em cada caso).

Tabela 4.31 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 6.0.

| | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] | |
|-----------------|----------------|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|----------|
| Dados Atuais | μ - máx | \ | NI_E29 | 1021.00 | 211.30 | 188.80 | 1971.00 | 0.2070 | 1654.90 |
| | μ - mín | \ | NI_E26 | -1800.00 | 212.90 | -2767.00 | -1044.00 | 0.1183 | -2438.70 |
| | σ - máx | \ | NI_E18 | -1760.00 | 220.60 | -2798.00 | -1137.00 | 0.1253 | -2421.80 |
| | σ - mín | | NI_E12 | -500.40 | 41.12 | -648.60 | -367.10 | 0.0822 | -623.76 |
| | δ - máx | \ | NI_E42 | 727.70 | 182.30 | 169.20 | 1696.00 | 0.2505 | 1274.60 |
| | δ - mín | | NI_E20 | -846.70 | 53.91 | -1045.00 | -642.80 | 0.0637 | -1008.43 |
| | Xk - máx | \ | NI_E29 | 1021.00 | 211.30 | 188.80 | 1971.00 | 0.2070 | 1654.90 |
| | Xk - mín | \ | NI_E26 | -1800.00 | 212.90 | -2767.00 | -1044.00 | 0.1183 | -2438.70 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 1135.00 | 185.80 | 581.90 | 2077.00 | 0.1637 | 1692.40 |
| | Xk - mín | - | - | -1905.00 | 191.00 | -2798.00 | -1365.00 | 0.1003 | -2478.00 |

Tabela 4.32 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 6.2.

| | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] | |
|-----------------|----------------|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|----------|
| Dados Atuais | μ - máx | \ | NI_E29 | 465.00 | 263.10 | -370.10 | 1573.00 | 0.5658 | 1254.30 |
| | μ - mín | \ | NI_E26 | -2455.00 | 269.80 | -3493.00 | -1655.00 | 0.1099 | -3264.40 |
| | σ - máx | | NI_E21 | -2007.00 | 303.70 | -3021.00 | -1003.00 | 0.1513 | -2918.10 |
| | σ - mín | | NI_E13 | -807.60 | 125.80 | -1239.00 | -426.90 | 0.1558 | -1185.00 |
| | δ - máx | \ | NI_E42 | -0.56 | 254.20 | -833.10 | 852.90 | 451.27 | -763.16 |
| | δ - mín | | NI_E8 | -2221.00 | 181.30 | -2796.00 | -1635.00 | 0.0816 | -2764.90 |
| | Xk - máx | \ | NI_E29 | 465.00 | 263.10 | -370.10 | 1573.00 | 0.5658 | 1254.30 |
| | Xk - mín | \ | NI_E26 | -2455.00 | 269.80 | -3493.00 | -1655.00 | 0.1099 | -3264.40 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 577.40 | 234.00 | -152.20 | 1573.00 | 0.4053 | 1279.40 |
| | Xk - mín | - | - | -2562.00 | 240.70 | -3493.00 | -1873.00 | 0.0940 | -3284.10 |

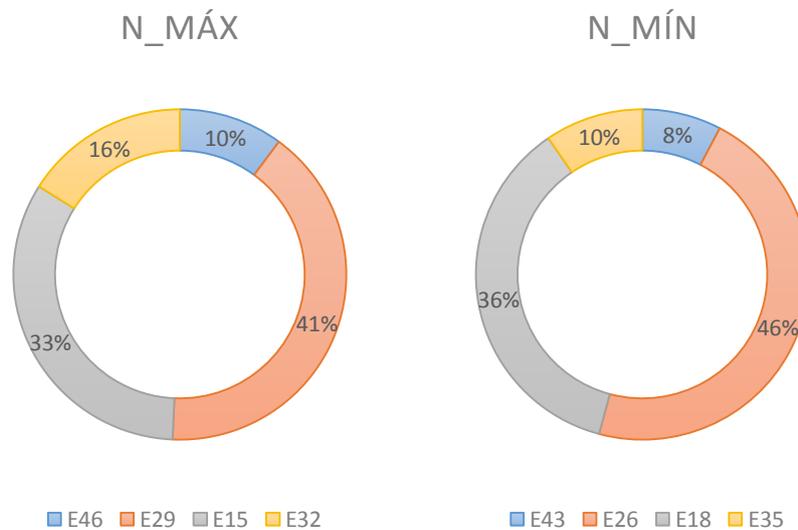


Figura 4.21 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 6.0.

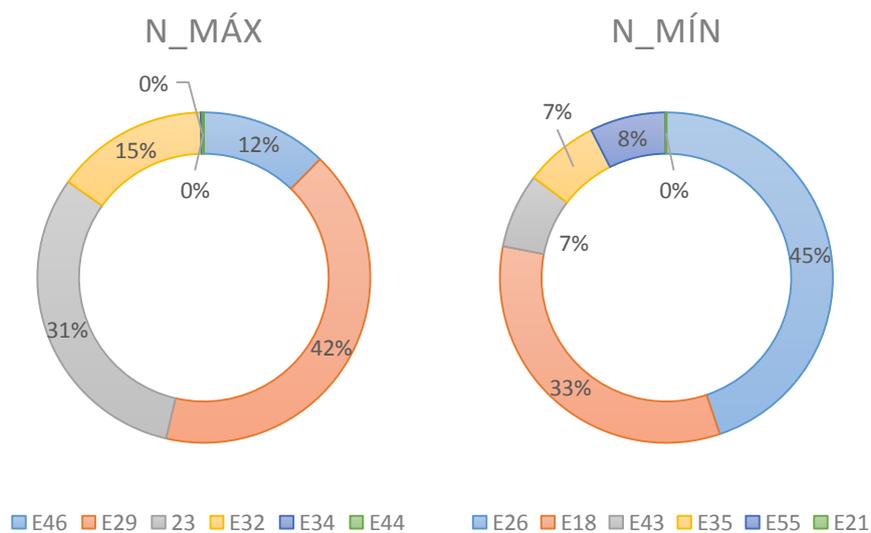


Figura 4.22 – Estaca com valores máximos e mínimos para o esforço normal – Comb. 6.2.

As Tab. 4.33 e 4.34 apresentam um resumo dos resultados para as combinações do Grupo 6, evidenciando as combinações onde a estaca com valores extremos de Xk coincide com valores extremos de outros parâmetros. Neste grupo, as estacas com os valores máximos de média e parâmetro Xk coincidiram em 60% das vezes. Para os valores mínimos, foram 80%. Apenas a combinação 6.4 repetiu a estaca com maior desvio-padrão e maior parâmetro Xk .

Tabela 4.33 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 6 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico.

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|---------------|------------------|----------|--------------|---------------|------------------|----------|--------------|
| | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] |
| 6.0 | NI_E29 | NI_E18 | NI_E42 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E12 | NI_E20 | NI_E26 |
| 6.1 | NI_E29 | NI_E21 | NI_E25 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E13 | NI_E43 | NI_E26 |
| 6.2 | NI_E29 | NI_E21 | NI_E42 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E13 | NI_E8 | NI_E26 |
| 6.3 | NI_E17 | NI_E23 | NI_E25 | NI_E15 | NI_E43 | NI_E49 | NI_E20 | NI_E26 |
| 6.4 | NI_E34 | NI_E29 | NI_E15 | NI_E29 | NI_E26 | NI_E49 | NI_E24 | NI_E26 |

Tabela 4.34 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 6 – estacas com valores máximos e mínimos para cada parâmetro estatístico.

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|---------------|------------------|----------|--------------|---------------|------------------|----------|--------------|
| | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] |
| 6.0 | 1021.00 | 220.60 | 0.25 | 1654.90 | -1800.00 | 41.12 | 0.06 | -2438.70 |
| 6.1 | 457.00 | 303.70 | 105.45 | 1246.30 | -2448.00 | 125.80 | 0.10 | -3257.40 |
| 6.2 | 465.00 | 303.70 | 451.27 | 1254.30 | -2455.00 | 125.80 | 0.08 | -3264.40 |
| 6.3 | 797.00 | 308.90 | 6.94 | 1417.60 | -2425.00 | 45.72 | 0.05 | -3165.50 |
| 6.4 | 787.30 | 221.90 | 0.30 | 1434.50 | -1852.00 | 46.14 | 0.05 | -2514.40 |

É importante ressaltar que os valores dos parâmetros Xk máximos nas combinações do Grupo 6 excedem os valores máximos encontrados em quase todas as outras combinações dos outros grupos, mostrando a influência que os ventos extremos têm sobre os esforços de tração nas estacas.

As Fig. 4.23 e 4.24 apresentam a distribuição de probabilidade das estacas onde foram observados os valores extremos de Xk para cada uma das sete combinações do Grupo 6.

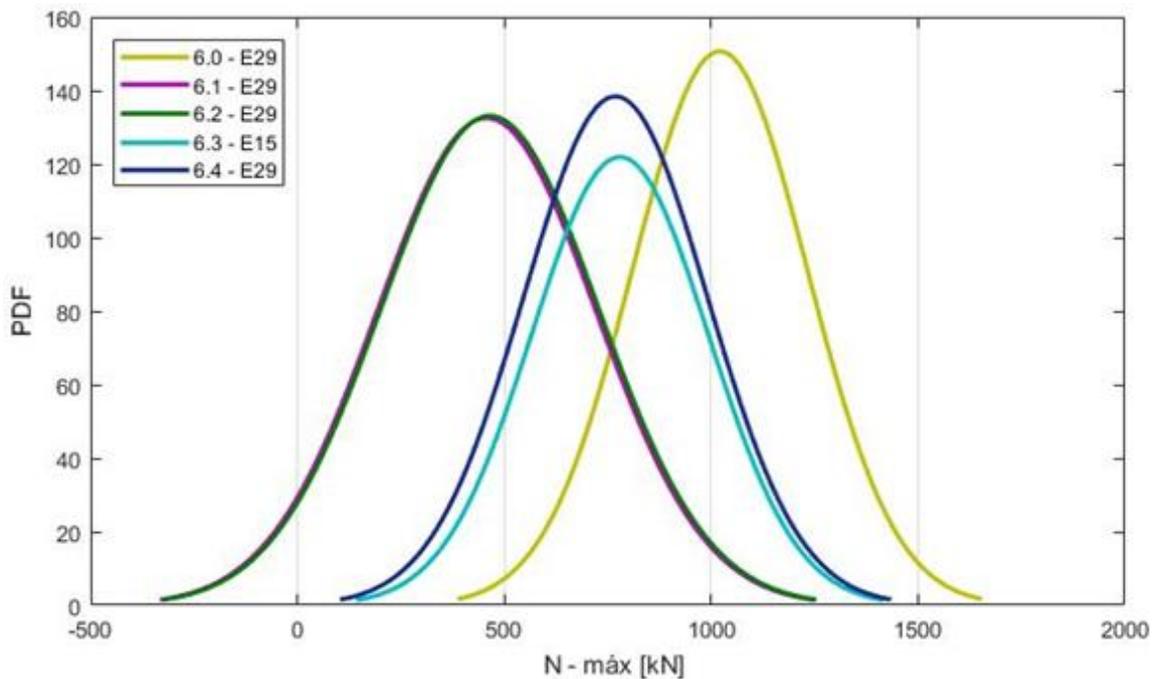


Figura 4.23 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo em cada combinação do Grupo 6.

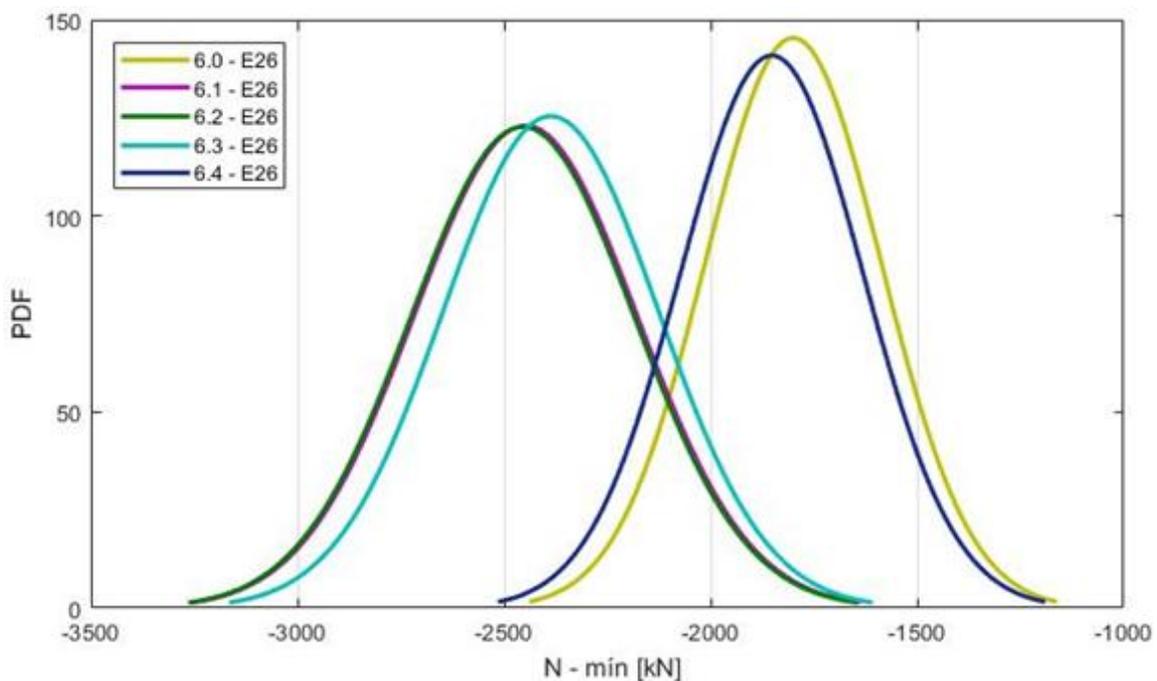


Figura 4.24 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo em cada combinação do Grupo 6.

Podemos observar visualmente que estes resultados seguem a tendência de se distribuir normalmente de acordo com o Teorema do Limite Central. Esta normalidade também foi verificada através do teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas destacadas acima. A Tab. 4.35 traz os

resultados do teste para o Grupo 6, onde o valor crítico para 5% de significância é de 0,03037. Na combinação 6.4, nota-se que o teste falha por uma diferença de 9,61%. O fato de que neste grupo a velocidade do vento foi aplicada como uma distribuição de Valores Extremos Tipo I pode explicar este fato.

Tabela 4.35 – Teste de Kolmogorov-Smirnov para as estacas mais carregadas em cada combinação do Grupo 6.

| | MÁX | MÍN |
|-----|-------------|----------------|
| | Estatística | Estatística |
| 6.0 | 0.01976 | 0.02009 |
| 6.1 | 0.01944 | 0.01810 |
| 6.2 | 0.01944 | 0.01810 |
| 6.3 | 0.01282 | 0.02106 |
| 6.4 | 0.02653 | <u>0.03360</u> |

Em comparação com os resultados apresentados em Ramos (2016), a Tab. 4.36 traz um resumo das maiores diferenças de resultados encontradas entre os dois trabalhos, comparando os esforços máximos e mínimos para cada combinação do Grupo 6 através da média e do parâmetro Xk , onde “Maior” significa que os valores obtidos neste trabalho são maiores, em módulo.

Tabela 4.36 – Resumo dos resultados obtidos para o Grupo 6 – comparação com Ramos (2016).

| | MÁX | | | | MÍN | | | |
|-----|------------|-------|-----------|-------|------------|-------|-----------|-------|
| | μ [kN] | | Xk [kN] | | μ [kN] | | Xk [kN] | |
| 6.0 | 10.04% | Menor | 2.22% | Menor | 5.51% | Menor | 1.59% | Menor |
| 6.1 | 19.68% | Menor | 1.97% | Menor | 4.00% | Menor | 0.92% | Menor |
| 6.2 | 19.47% | Menor | 1.96% | Menor | 4.18% | Menor | 0.60% | Menor |
| 6.3 | 9.73% | Menor | 4.19% | Menor | 3.12% | Menor | 2.47% | Menor |
| 6.4 | 12.15% | Menor | 9.46% | Menor | 5.27% | Menor | 0.24% | Menor |

Para o Grupo 6, notam-se resultados significativamente menores encontrados neste trabalho, principalmente nas combinações 6.1 e 6.2, com quase 10% de diferença no valor do parâmetro Xk da combinação 6.4.

4.1.7. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade Para os Piores Casos de Cada Grupo

Nesta seção é apresentado um resumo dos piores casos observados em cada grupo, ressaltando quais estacas são mais exigidas com relação ao parâmetro Xk . A Tab. 4.37 traz os parâmetros estatísticos das estacas que apresentaram os valores mais extremos em cada grupo.

Tabela 4.37 – Resumo dos piores casos observados em cada grupo com relação ao par. Xk .

| MÁX | | | | | MÍN | | | | | | |
|-----|---------------|------------------|----------|--------------|--------|---------------|------------------|----------|--------------|----------|-----|
| | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | δ | Xk [kN] | Estaca | |
| 1.0 | 770.40 | 129.30 | 0.1678 | 1158.30 | E46 | 1.2 | -1998.00 | 303.60 | 0.1520 | -2908.80 | E23 |
| 2.0 | 920.20 | 143.70 | 0.1562 | 1351.30 | E29 | 2.5 | -2341.00 | 212.90 | 0.0909 | -2979.70 | E26 |
| 3.0 | 872.10 | 131.00 | 0.1502 | 1265.10 | E32 | 3.2 | -2398.00 | 195.40 | 0.0815 | -2984.20 | E53 |
| 4.0 | 874.00 | 131.20 | 0.1501 | 1267.60 | E29 | 4.2 | -2400.00 | 195.30 | 0.0814 | -2985.90 | E53 |
| 5.0 | 886.10 | 135.00 | 0.1524 | 1291.10 | E29 | 5.4 | -2310.00 | 208.50 | 0.0903 | -2935.50 | E26 |
| 6.0 | 1021.00 | 211.30 | 0.2070 | 1654.90 | E29 | 6.2 | -2455.00 | 269.80 | 0.1099 | -3264.40 | E26 |

Com exceção do Grupo 6, onde há a atuação de ventos extremos, nos demais grupos não se nota diferenças muito significativas entre os esforços observados nas estacas mais exigidas. As Fig. 4.25 e 4.26 trazem as distribuições de probabilidade dos esforços nestas estacas:

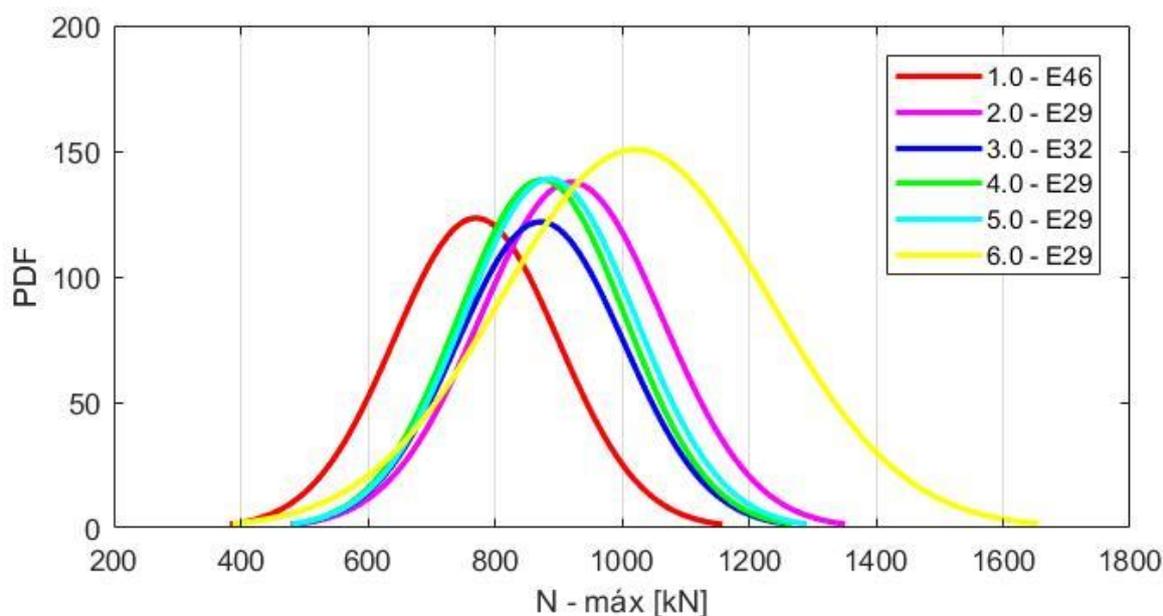


Figura 4.25 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo.

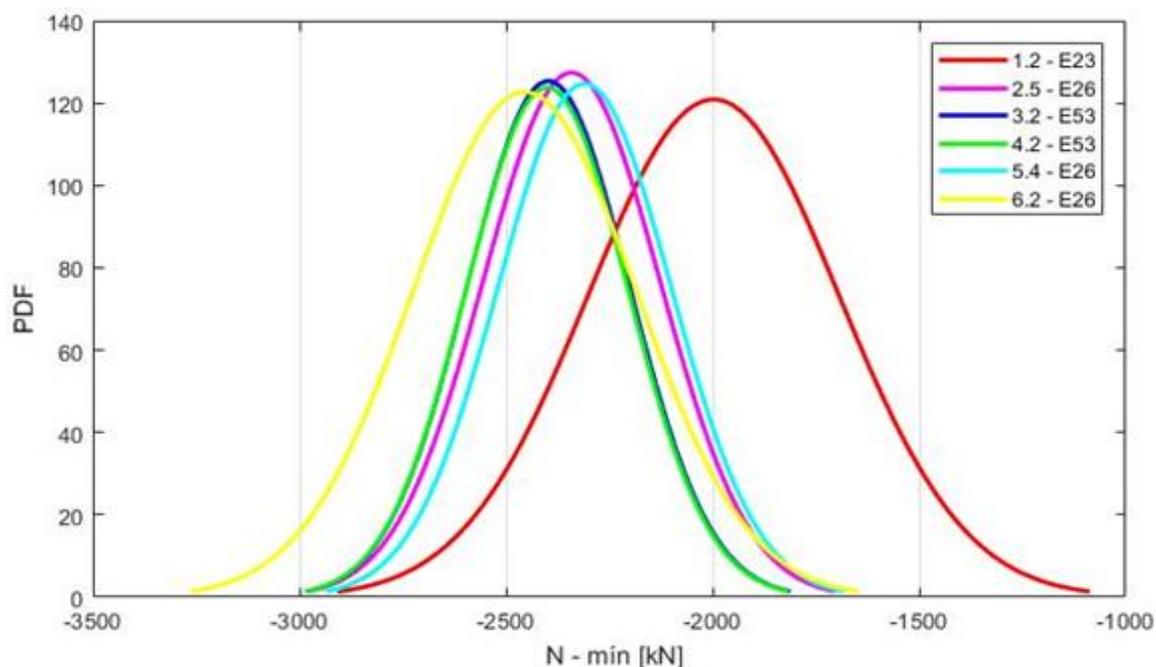


Figura 4.26 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo.

Considerando os valores dos parâmetros Xk máximos observados em cada uma das cinquenta e duas combinações de todos os seis grupos, observa-se que a estaca E29 é a mais exigida em 65% das vezes (Fig. 4.27). Conforme a Fig. 3.4, esta é uma estaca inclinada e rotacionada em 3° em direção ao centro e está localizada próximo à lateral do módulo. Além disso, todas as estacas mostradas na Fig. 4.27 são inclinadas.

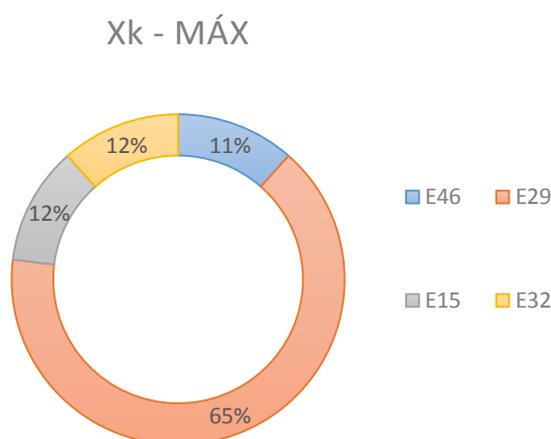


Figura 4.27 – Ocorrências das estacas com parâmetro Xk máximo em todas as combinações.

Para os parâmetros Xk mínimos, nota-se que um número maior de estacas aparece como a

mais exigida, com a estaca E26 aparecendo em 52% das vezes. Esta estaca também é inclinada, porém sem rotação, e localiza-se próxima à estaca E29. Neste caso, apenas metade das estacas são inclinadas.

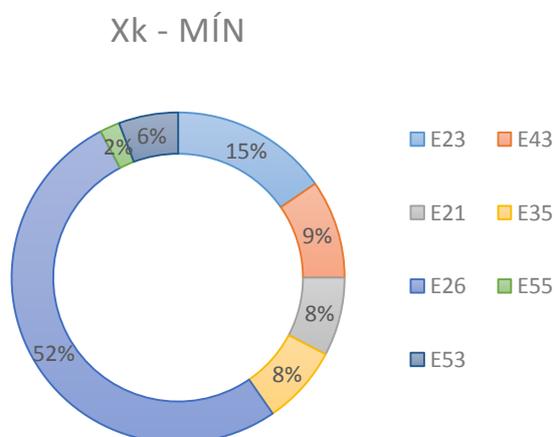


Figura 4.28 – Ocorrências das estacas com parâmetro Xk mínimo em todas as combinações.

Ainda com relação aos piores casos de acordo com o parâmetro Xk , observou-se uma tendência de que as estacas que apresentam os valores médios máximos e mínimos também apresentem os parâmetros Xk mais intensos, tendo ocorrido em 67,3% das combinações para os esforços máximos e em 69,2% das combinações para os esforços mínimos. Além disso, com exceção do Grupo 1, esta reincidência ocorreu em todos os piores casos de cada grupo.

4.2. Parâmetros Estatísticos das Variáveis de Saída – Modelo Alterado

Aqui são apresentados os resultados obtidos através da análise probabilística do modelo após as modificações implementadas na aplicação da sobrecarga acidental, onde a distribuição de probabilidade Normal foi substituída por uma distribuição de probabilidade Beta, procurando um melhor ajuste com o comportamento real da sobrecarga acidental, que pode ser melhor representado por uma distribuição de Valores Extremos Tipo I. Para esta análise, foram executadas duas combinações de cada grupo, sendo estas as combinações que apresentam os maiores e menores valores do parâmetro Xk em cada um dos seis grupos. No caso dos esforços máximos, como nas combinações que geraram os maiores valores não foi considerada a sobrecarga acidental, escolheu-se a combinação com o segundo maior valor de Xk .

Estes resultados são posteriormente comparados com os resultados obtidos neste trabalho e também com os resultados apresentados em Ramos (2016).

4.2.1. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 1

No Grupo 1, foram modificadas as combinações 1.2 e 1.8. As Tab. 4.38 e 4.39 trazem os valores extremos – máximos e mínimos – para cada um dos parâmetros estatísticos analisados (média, desvio padrão, coef. de variação e Xk) das combinações analisadas, comparando estes valores com os obtidos no modelo inalterado e com os apresentados por Ramos (2016) nas mesmas combinações.

Tabela 4.38 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 1.2.1 (beta).

| | | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] |
|--------------------------|----------------|---|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|
| Comb. 1.2.1 (beta) | μ - máx | \ | E46 | 135.00 | 220.50 | -701.00 | 792.30 | 1.6333 | 796.50 |
| | μ - mín | | E53 | -2425.00 | 239.30 | -3529.00 | -1945.00 | 0.0987 | -3142.90 |
| | σ - máx | | E21 | -2167.00 | 378.30 | -3982.00 | -1418.00 | 0.1746 | -3301.90 |
| | σ - mín | | E13 | -892.70 | 148.10 | -1569.00 | -597.40 | 0.1659 | -1337.00 |
| | δ - máx | \ | E27 | 45.58 | 201.90 | -739.60 | 605.90 | 4.4296 | 651.28 |
| | δ - mín | | E6 | -2331.00 | 224.50 | -3382.00 | -1889.00 | 0.0963 | -3004.50 |
| | Xk - máx | \ | E46 | 135.00 | 220.50 | -701.00 | 792.30 | 1.6333 | 796.50 |
| | Xk - mín | | E23 | -2171.00 | 378.20 | -3986.00 | -1422.00 | 0.1742 | -3305.60 |
| Comb. 1.2 | Xk - máx | \ | E46 | 216.70 | 193.20 | -478.60 | 902.90 | 0.8916 | 796.30 |
| | Xk - mín | | E23 | -1998.00 | 303.60 | -2990.00 | -955.30 | 0.1520 | -2908.80 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 239.50 | 193.10 | -427.20 | 902.90 | 0.8063 | 818.80 |
| | Xk - mín | - | - | -2320.00 | 192.80 | -2990.00 | -1691.00 | 0.0831 | -2898.40 |

Como era esperado, no momento que a sobrecarga é aplicada com a nova distribuição, os valores mínimos aumentam e os valores máximos diminuem. Para a combinação 1.2.1, os valores mínimos do parâmetro Xk são 13,64% maiores que na combinação 1.2 e 14,05% maiores que os apresentados por Ramos (2016). Em compensação, os valores das médias máximas observadas diminuíram 37,70% em relação à combinação 1.2 e 43,63% em relação à Ramos (2016). As Fig. 4.29 e 4.30 trazem as distribuições do probabilidade dos esforços nas estacas mais carregadas.

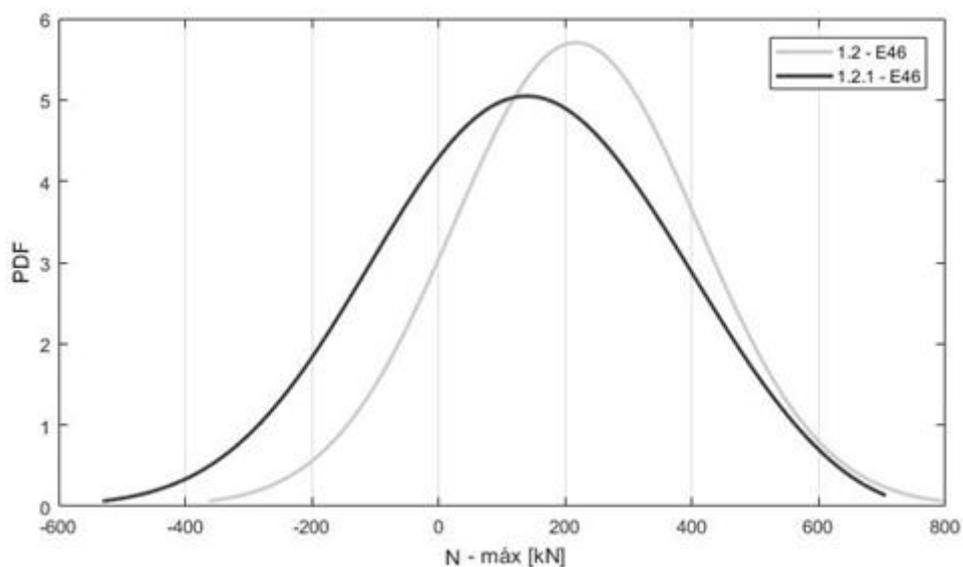


Figura 4.29 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo.

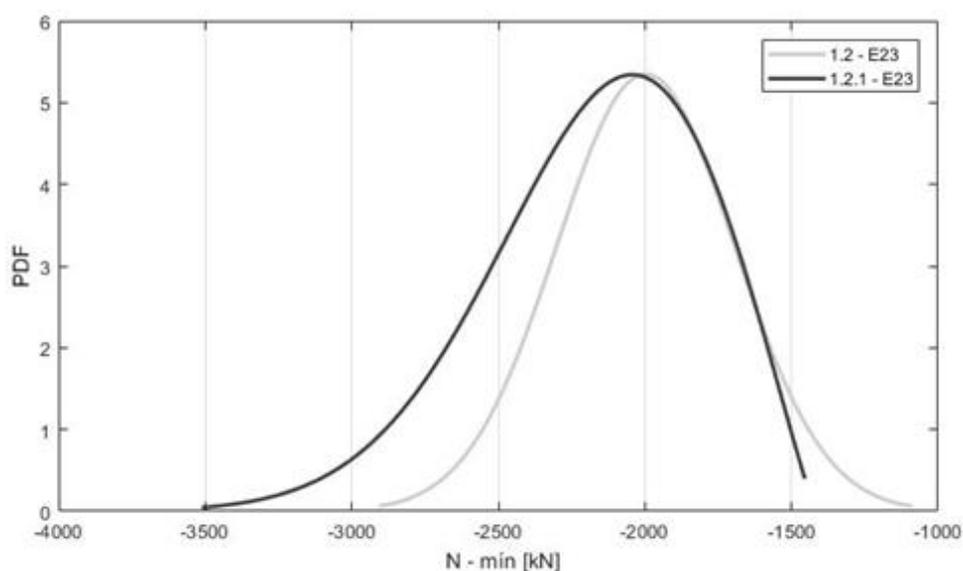


Figura 4.30 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo.

Com base nos gráficos anteriores, pode-se perceber uma mudança na distribuição de probabilidade para as combinações modificadas. De fato, analisando estas distribuições no *software* EasyFit com base no teste de Kolmogorov-Smirnov, para um nível de significância de 5%, ambas as distribuições não se ajustam a uma distribuição Normal, sendo mais ajustadas a uma distribuição de Valores Extremos Generalizada (Fig. 4.31 e 4.32).

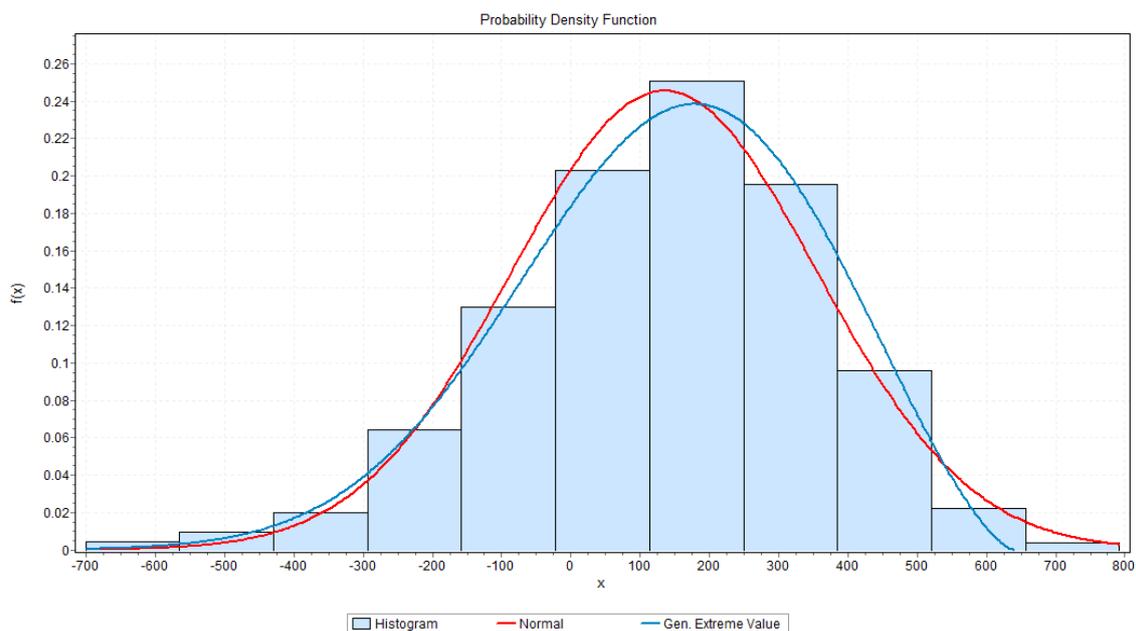


Figura 4.31 – Ajuste de curvas: 1.2.1 – E46.

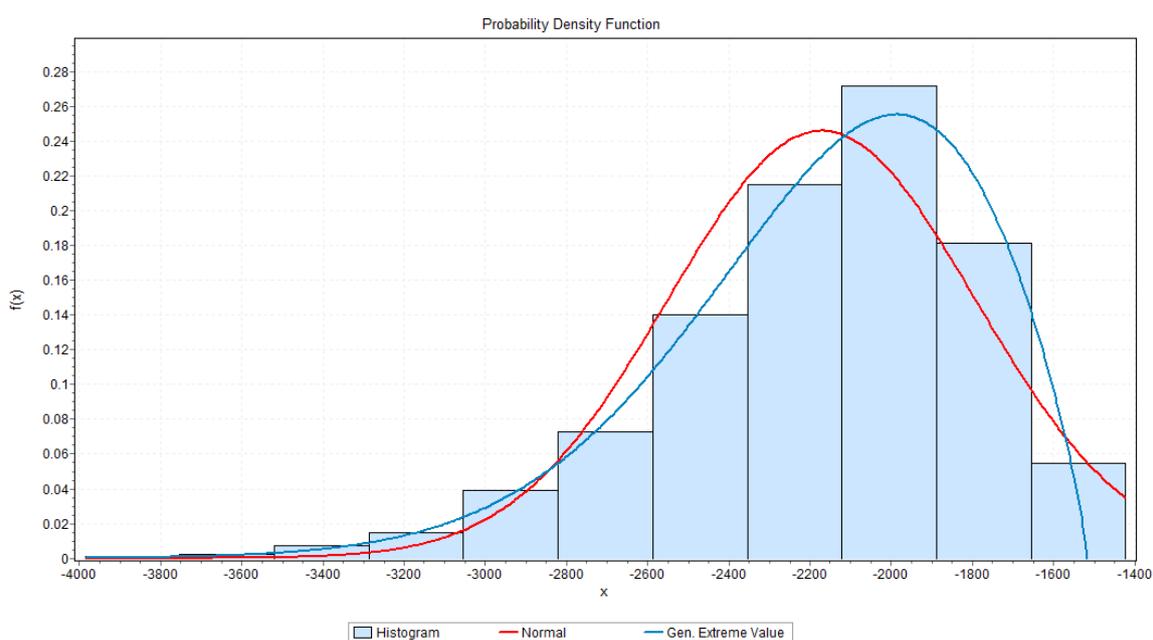


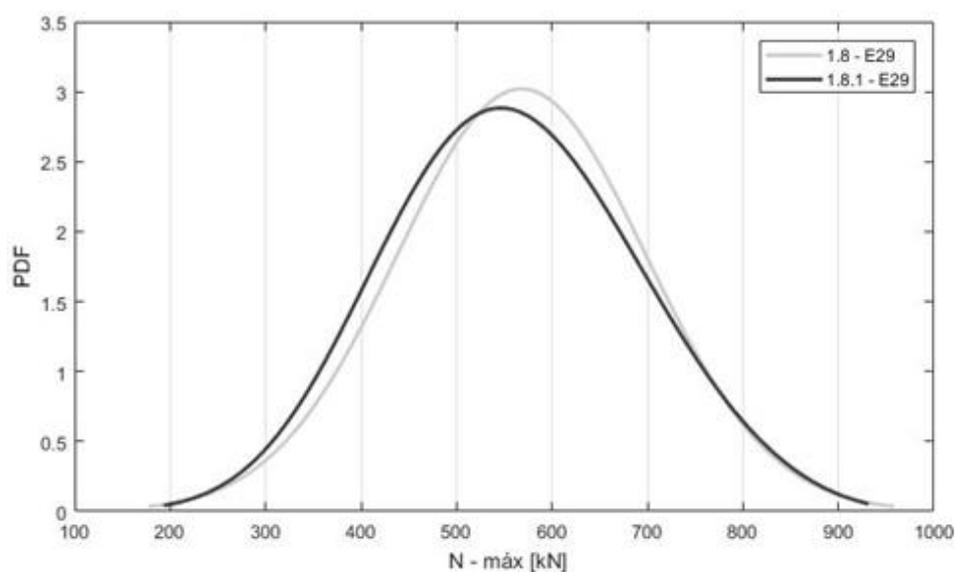
Figura 4.32 – Ajuste de curvas: 1.2.1 – E23.

Para a estaca E23 a diferença é mais nítida, pois os esforços de compressão decorrentes da sobrecarga são maiores. Podemos perceber também que o Teorema do Limite Central não se verifica, pois a sobrecarga contribui muito mais para os esforços de compressão do que as outras ações, de modo que a soma de todos os esforços não se aproxima de uma distribuição normal.

Tabela 4.39 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 1.8.1 (beta).

| | | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] |
|--------------------------|----------------|---|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|
| Comb. 1.8.1 (beta) | μ - máx | \ | E27 | 563.10 | 113.30 | 108.80 | 953.30 | 0.2012 | 903.00 |
| | μ - mín | | E21 | -2133.00 | 385.00 | -3981.00 | -1371.00 | 0.1805 | -3288.00 |
| | σ - máx | | E21 | -2133.00 | 385.00 | -3981.00 | -1371.00 | 0.1805 | -3288.00 |
| | σ - mín | | E59 | -755.60 | 45.12 | -912.10 | -590.90 | 0.0597 | -890.96 |
| | δ - máx | \ | E34 | -265.30 | 194.40 | -1006.00 | 316.40 | 0.7328 | -848.50 |
| | δ - mín | | E24 | -1046.00 | 50.81 | -1211.00 | -870.90 | 0.0486 | -1198.43 |
| | Xk - máx | \ | E29 | 558.20 | 131.00 | 12.00 | 1003.00 | 0.2347 | 951.20 |
| | Xk - mín | | E21 | -2133.00 | 385.00 | -3981.00 | -1371.00 | 0.1805 | -3288.00 |
| Comb. 1.8 | Xk - máx | \ | E29 | 568.10 | 130.30 | 22.90 | 1010.00 | 0.2294 | 959.00 |
| | Xk - mín | | E21 | -1956.00 | 308.90 | -2966.00 | -896.00 | 0.1579 | -2882.70 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 239.50 | 193.10 | -427.20 | 902.90 | 0.8063 | 818.80 |
| | Xk - mín | - | - | -2320.00 | 192.80 | -2990.00 | -1691.00 | 0.0831 | -2898.40 |

Para a combinação 1.8.1, os valores mínimos do parâmetro Xk são 14,06% maiores que na combinação 1.8 e 13,44% maiores que os apresentados por Ramos (2016). Em compensação, os valores das médias máximas observadas diminuíram 0,88% em relação à combinação 1.8 porém aumentaram 135,11% em relação à Ramos (2016). Em ambas as combinações, observa-se que as estacas que apresentaram os parâmetros Xk máximos e mínimos não mudaram. As Fig. 4.33 e 4.34 trazem as distribuições do probabilidade dos esforços nas estacas mais carregadas.

Figura 4.33 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo.

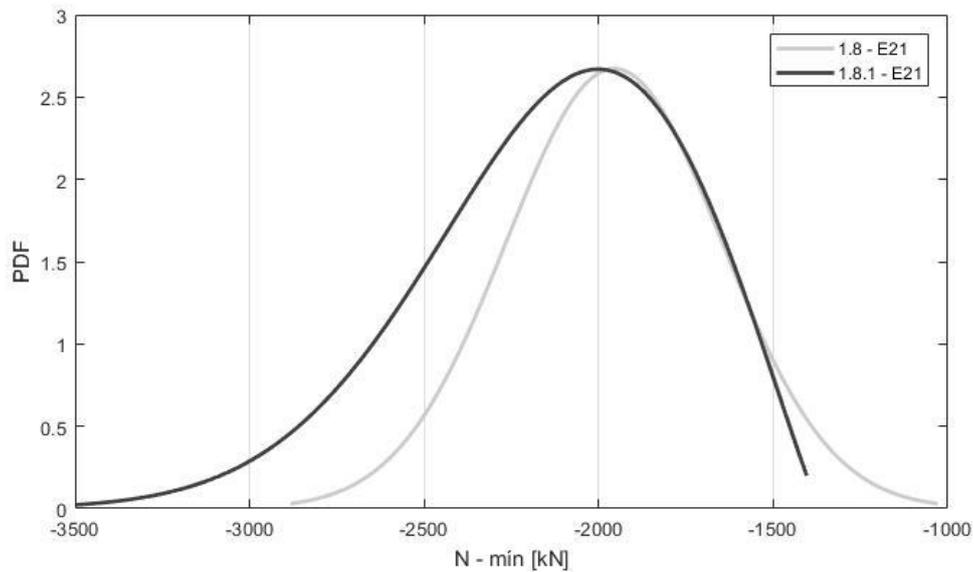


Figura 4.34 – Distribuições de probabilidade das estacas com X_k mínimo.

Assim como na combinação anterior, a estaca E21 (Fig. 4.35), que apresenta os maiores esforços de compressão, não apresenta uma distribuição normal para os esforços axiais. Analisando estas distribuições no *software* EasyFit com base no teste de Kolmogorov-Smirnov, para um nível de significância de 5% a aproximação a uma curva normal é rejeitada, sendo mais ajustadas a uma distribuição de Valores Extremos Generalizada.

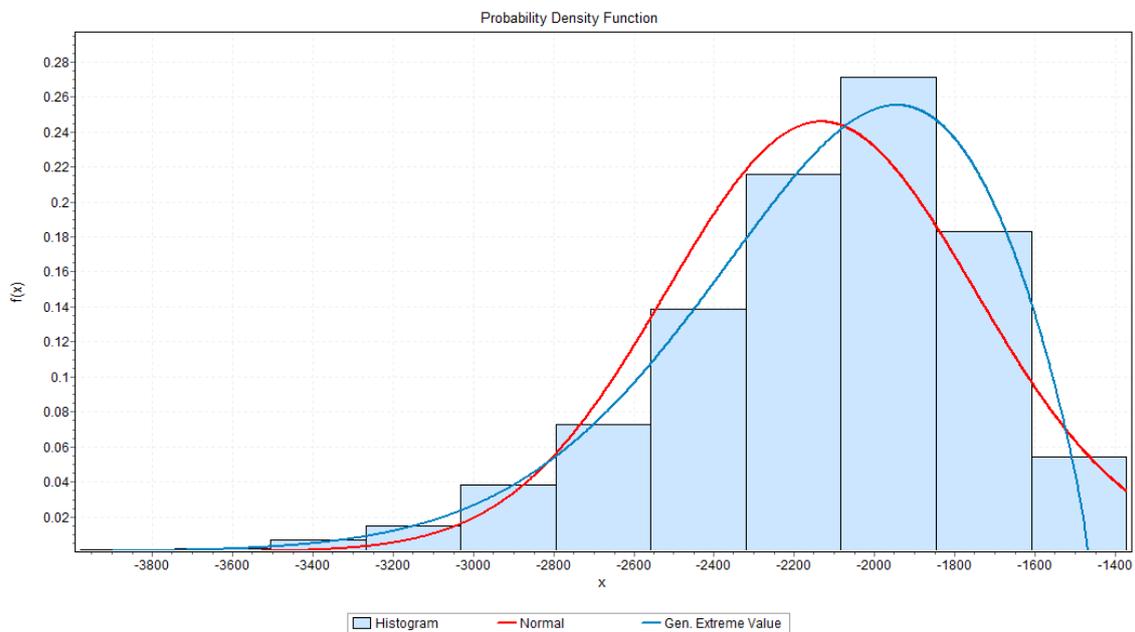


Figura 4.35 – Ajuste de curvas: 1.8.1 – E21.

4.2.2. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 2

No Grupo 2, foram modificadas as combinações 2.5 e 2.8. As Tab. 4.40 e 4.41 trazem os valores extremos – máximos e mínimos – para cada um dos parâmetros estatísticos analisados (média, desvio padrão, coef. de variação e Xk) das combinações analisadas, comparando estes valores com os obtidos no modelo inalterado e com os apresentados por Ramos (2016) nas mesmas combinações.

Tabela 4.40 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 2.5.1 (beta).

| | | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] |
|--------------------------|----------------|---|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|
| Comb. 2.5.1 (beta) | μ - máx | \ | E29 | 235.50 | 232.80 | -747.30 | 926.80 | 0.9885 | 933.90 |
| | μ - mín | | E26 | -2435.00 | 244.70 | -3512.00 | -1654.00 | 0.1005 | -3169.10 |
| | σ - máx | | E21 | -2167.00 | 378.60 | -3991.00 | -1429.00 | 0.1747 | -3302.80 |
| | σ - mín | | E13 | -1725.00 | 149.00 | -2400.00 | -1380.00 | 0.0864 | -2172.00 |
| | δ - máx | \ | E15 | 99.07 | 225.50 | -781.60 | 767.00 | 2.2762 | 775.57 |
| | δ - mín | | E1 | -1769.00 | 150.60 | -2463.00 | -1467.00 | 0.0851 | -2220.80 |
| | Xk - máx | \ | E29 | 235.50 | 232.80 | -747.30 | 926.80 | 0.9885 | 933.90 |
| | Xk - mín | | E23 | -2168.00 | 378.50 | -3991.00 | -1429.00 | 0.1746 | -3303.50 |
| Comb. 2.5 | Xk - máx | \ | E29 | 317.60 | 206.20 | -374.20 | 1045.00 | 0.6492 | 936.20 |
| | Xk - mín | | E26 | -2341.00 | 212.90 | -2987.00 | -1472.00 | 0.0909 | -2979.70 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 335.10 | 201.90 | -345.40 | 1045.00 | 0.6025 | 940.80 |
| | Xk - mín | - | - | -2379.00 | 197.80 | -2989.00 | -1772.00 | 0.0831 | -2972.40 |

Como era esperado, no momento que a sobrecarga é aplicada com a nova distribuição, os valores mínimos aumentam e os valores máximos diminuem. Para a combinação 2.5.1, os valores mínimos do parâmetro Xk são 10,87% maiores que na combinação 2.5 e 11,14% maiores que os apresentados por Ramos (2016). Em compensação, os valores das médias máximas observadas diminuíram 25,85% em relação à combinação 2.5 e 29,72% em relação à Ramos (2016). Porém, assim como no Grupo 1, esta redução significativa nas médias máximas não se reflete nos parâmetros Xk máximos, onde os valores não chegam a ser 1% menores que os obtidos anteriormente. Por fim, nota-se que a estaca E23, que apresentou o menor parâmetro Xk , não foi a que apresentou a menor média, ao contrário do modelo inalterado. As Fig. 4.36 e 4.37 trazem as distribuições de probabilidade dos esforços nas estacas mais carregadas.

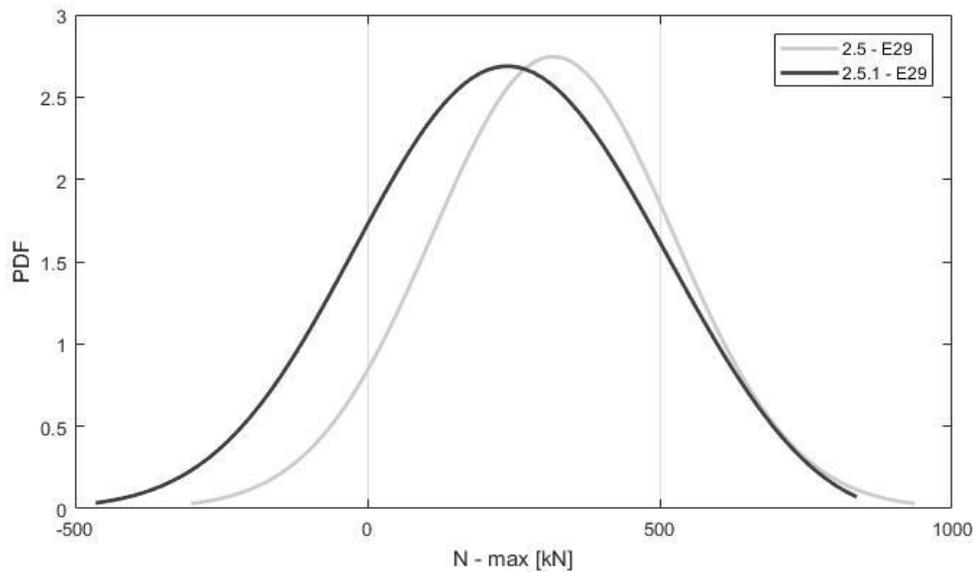


Figura 4.36 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo.

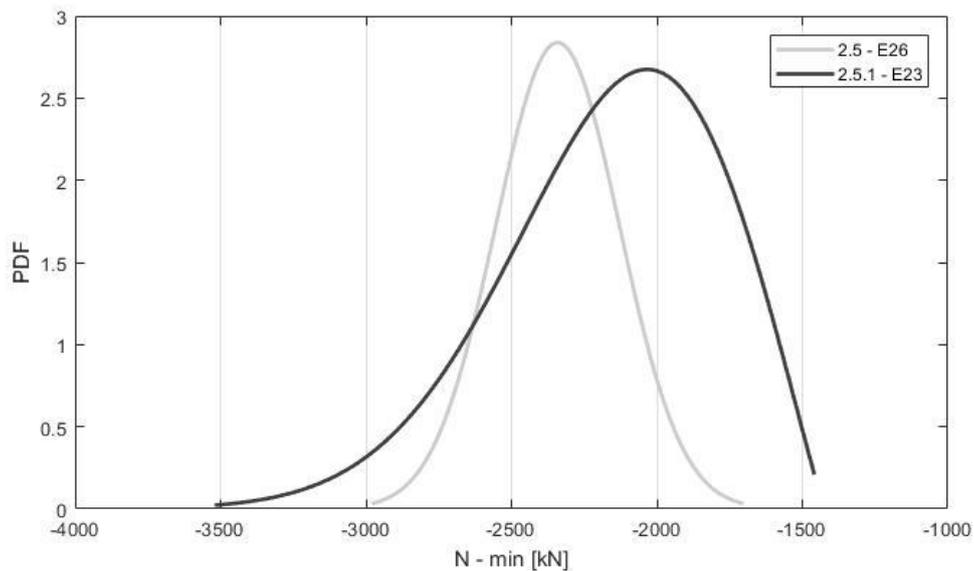


Figura 4.37 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo.

Com base nos gráficos anteriores, pode-se perceber uma mudança na distribuição de probabilidade para as combinações modificadas. Ao analisar estas distribuições no *software* EasyFit com base no teste de Kolmogorov-Smirnov, para um nível de significância de 5%, apenas a distribuição referente à estaca E29 ajustou-se à distribuição Normal, enquanto a estaca E23 seguiu uma distribuição de Valores Extremos Generalizada (Fig. 4.38 e 4.39).

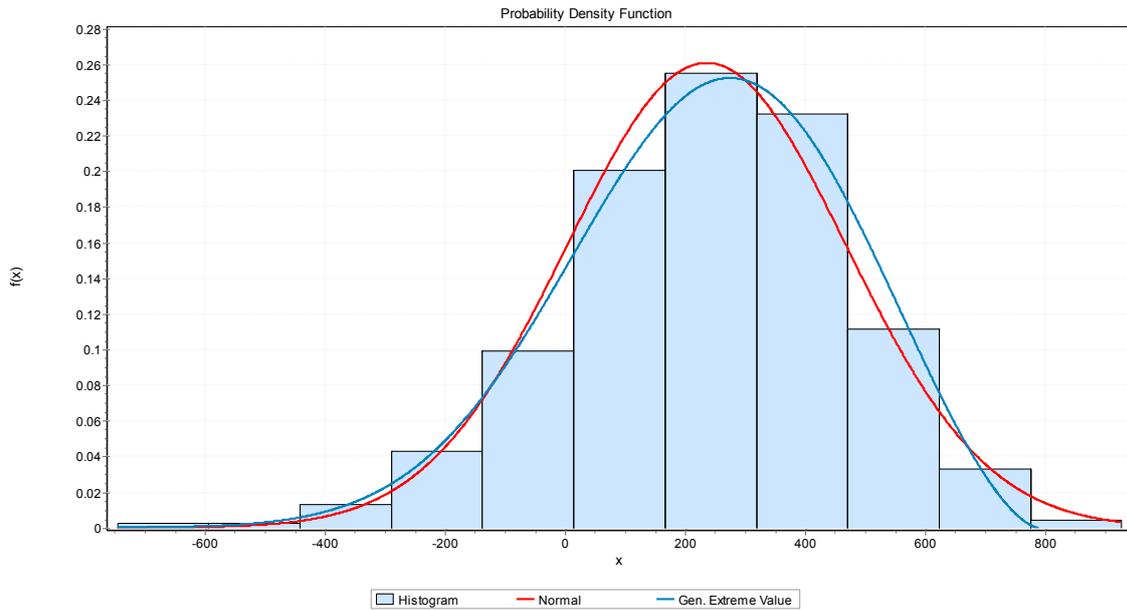


Figura 4.38 – Ajuste de curvas: 2.5.1 – E29.

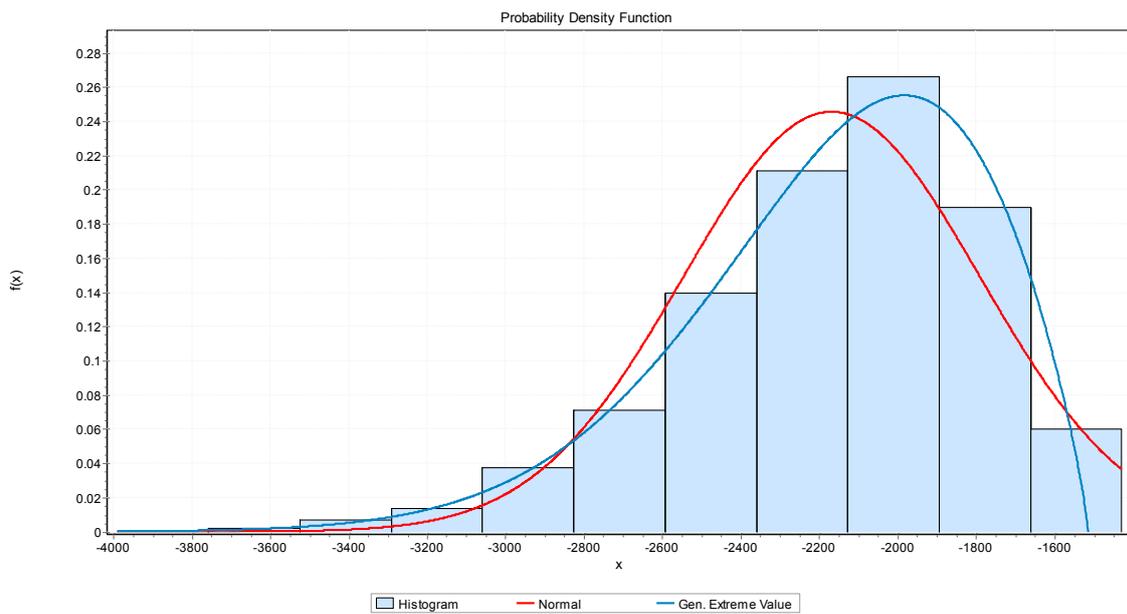


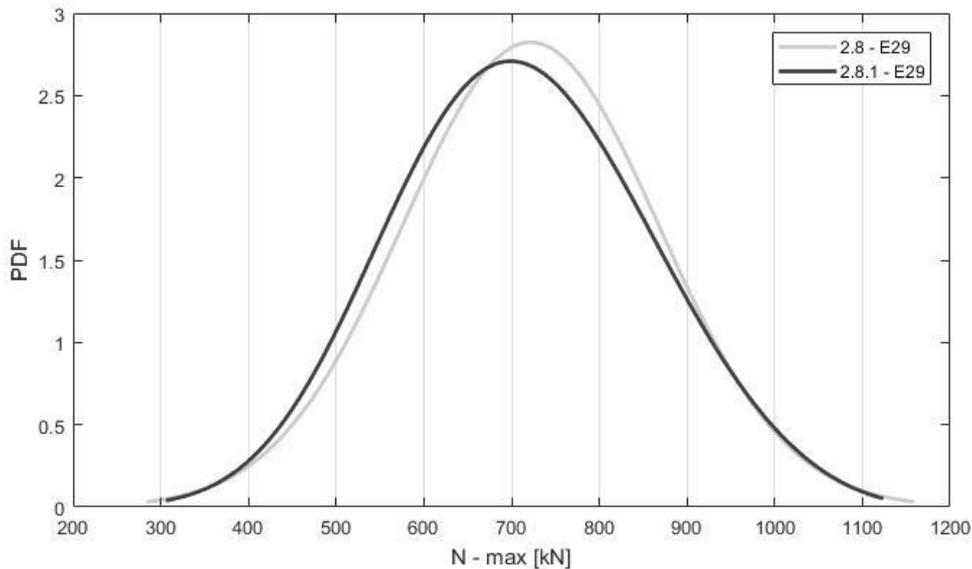
Figura 4.39 – Ajuste de curvas: 2.5.1 – E23.

Para a estaca E23 a diferença é mais nítida, pois os esforços de compressão decorrentes da sobrecarga são maiores. Podemos perceber que neste caso o Teorema do Limite Central não se verifica, pois a sobrecarga contribui muito mais para os esforços de compressão do que as outras ações, de modo que a soma de todos os esforços não se aproxima de uma distribuição normal.

Tabela 4.41 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 2.8.1 (beta).

| | | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] | |
|--------------------------|----------------|------------|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|----------|
| Comb. 2.8.1 (beta) | μ - máx | \ | E27 | 736.30 | 124.90 | 265.60 | 1098.00 | 0.1696 | 1111.00 | |
| | μ - mín | | E35 | -2412.00 | 247.80 | -3552.00 | -1697.00 | 0.1027 | -3155.40 | |
| | σ - máx | | E21 | -2141.00 | 385.30 | -3997.00 | -1389.00 | 0.1800 | -3296.90 | |
| | σ - mín | | E59 | -754.40 | 45.18 | -906.20 | -596.70 | 0.0599 | -889.94 | |
| | δ - máx | \ | E17 | 56.96 | 217.90 | -827.40 | 676.20 | 3.8255 | 710.66 | |
| | δ - mín | | E24 | -1058.00 | 50.92 | -1220.00 | -872.10 | 0.0481 | -1210.76 | |
| | Xk - máx | \ | E29 | 711.80 | 146.60 | 140.20 | 1173.00 | 0.2060 | 1151.60 | |
| | Xk - mín | | E21 | -2141.00 | 385.30 | -3997.00 | -1389.00 | 0.1800 | -3296.90 | |
| | Comb. 2.8 | Xk - máx | \ | E29 | 721.70 | 145.90 | 151.10 | 1184.00 | 0.2022 | 1159.40 |
| | | Xk - mín | | E35 | -2314.00 | 212.90 | -3012.00 | -1507.00 | 0.0920 | -2952.70 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 741.10 | 133.50 | 282.10 | 1184.00 | 0.1801 | 1141.60 | |
| | Xk - mín | - | - | -2316.00 | 214.00 | -3012.00 | -1507.00 | 0.0924 | -2958.00 | |

Na combinação 2.8.1, foi observado um aumento de quase 12% do parâmetro Xk em relação a Ramos (2016) e à combinação 2.5. Novamente, houve uma mudança na estaca com esforços de compressão mais intensos. As Fig. 4.40 e 4.41 trazem as distribuições do probabilidade dos esforços nas estacas mais carregadas.

Figura 4.40 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo.

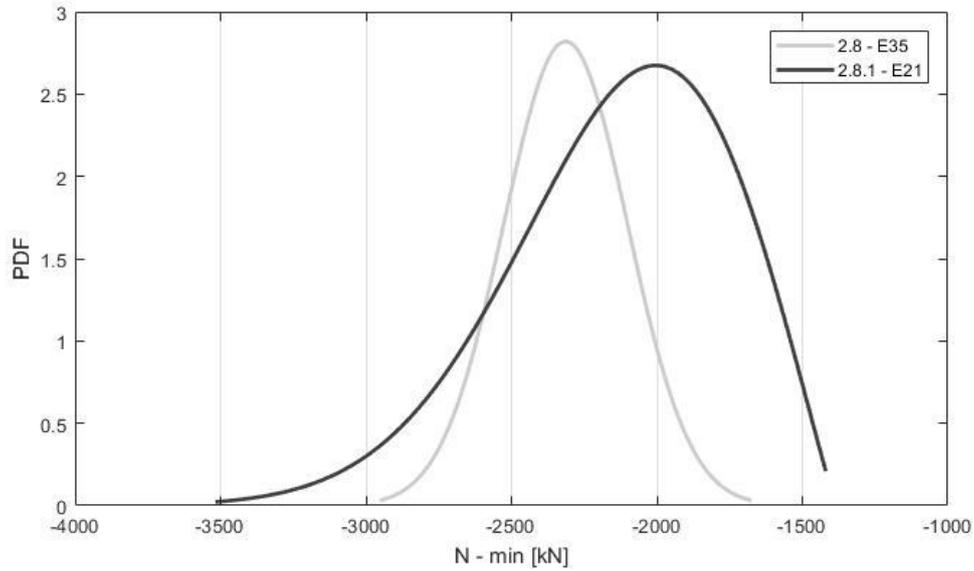


Figura 4.41 – Distribuições de probabilidade das estacas com X_k mínimo.

Assim como na combinação anterior, a estaca E21 (Fig. 4.43), que apresenta os maiores esforços de compressão, não apresenta uma distribuição normal para os esforços axiais. Analisando estas distribuições no *software* EasyFit com base no teste de Kolmogorov-Smirnov, para um nível de significância de 5% a aproximação a uma curva normal é rejeitada, sendo mais ajustadas a uma distribuição de Valores Extremos Generalizada.

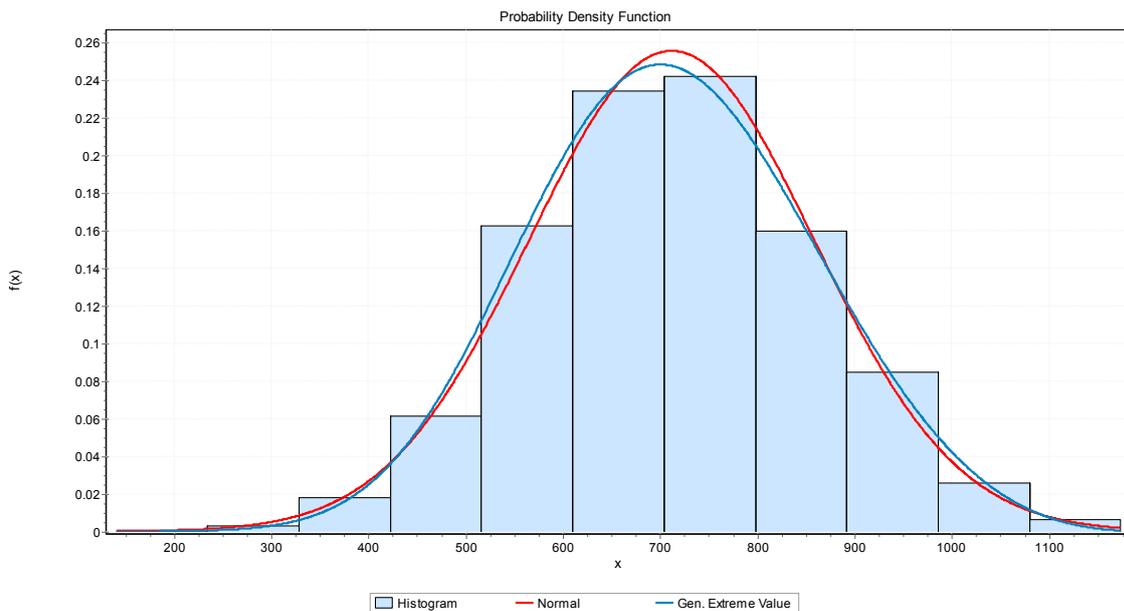


Figura 4.42 – Ajuste de curvas: 2.8.1 – E29.

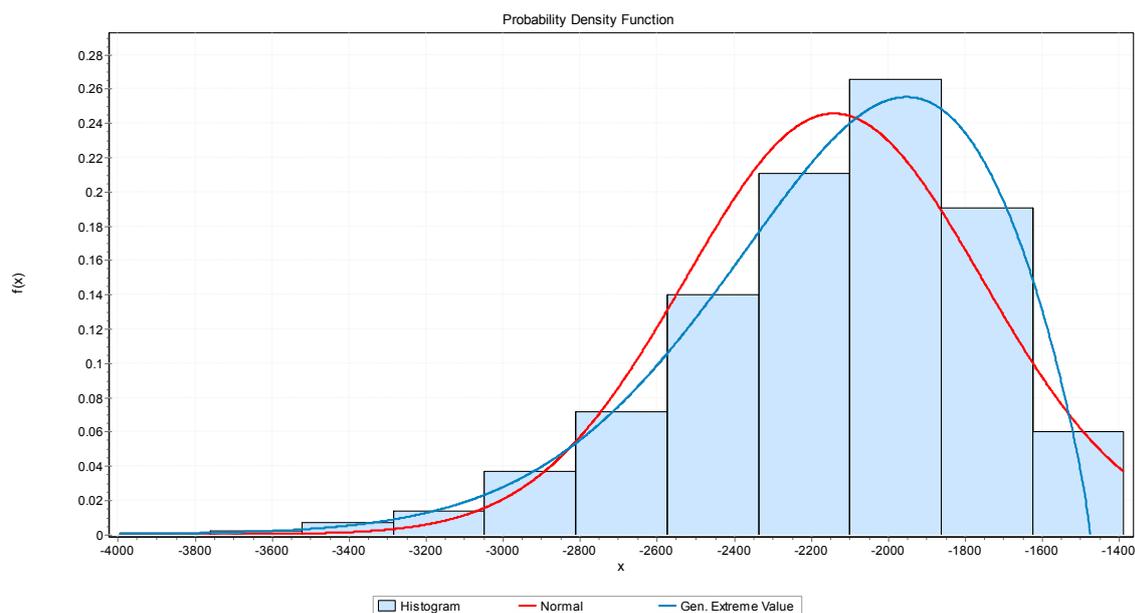


Figura 4.43 – Ajuste de curvas: 2.8.1 – E21.

4.2.3. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 3

No Grupo 3, foram modificadas as combinações 3.2 e 3.7. As Tab. 4.42 e 4.43 trazem os valores extremos – máximos e mínimos – para cada um dos parâmetros estatísticos analisados (média, desvio padrão, coef. de variação e Xk) das combinações analisadas, comparando estes valores com os obtidos no modelo inalterado e com os apresentados por Ramos (2016) nas mesmas combinações.

Tabela 4.42 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 3.2.1 (beta).

| | | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] |
|--------------------------|----------------|---|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|
| Comb. 3.2.1 (beta) | μ - máx | \ | E32 | 235.00 | 223.30 | -644.60 | 893.60 | 0.9502 | 904.90 |
| | μ - mín | | E55 | -2507.00 | 241.50 | -3808.00 | -1984.00 | 0.0963 | -3231.50 |
| | σ - máx | | E21 | -2166.00 | 379.60 | -4231.00 | -1424.00 | 0.1753 | -3304.80 |
| | σ - mín | | E13 | -885.10 | 148.70 | -1658.00 | -586.60 | 0.1680 | -1331.20 |
| | δ - máx | \ | E17 | 153.60 | 203.20 | -689.20 | 723.70 | 1.3229 | 763.20 |
| | δ - mín | | E55 | -2507.00 | 241.50 | -3808.00 | -1984.00 | 0.0963 | -3231.50 |
| | Xk - máx | \ | E32 | 235.00 | 223.30 | -644.60 | 893.60 | 0.9502 | 904.90 |
| | Xk - mín | | E21 | -2166.00 | 379.60 | -4231.00 | -1424.00 | 0.1753 | -3304.80 |
| Comb. 3.2 | Xk - máx | \ | E32 | 317.10 | 195.70 | -397.60 | 995.40 | 0.6172 | 904.20 |
| | Xk - mín | | E53 | -2398.00 | 195.40 | -3084.00 | -1712.00 | 0.0815 | -2984.20 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 341.40 | 195.20 | -336.10 | 995.40 | 0.5718 | 927.00 |
| | Xk - mín | - | - | -2418.00 | 191.50 | -3084.00 | -1847.00 | 0.0792 | -2992.50 |

Como era esperado, no momento que a sobrecarga é aplicada com a nova distribuição, os valores mínimos aumentam e os valores máximos diminuem. Para a combinação 3.2.1, os valores mínimos do parâmetro Xk são 10,74% maiores que na combinação 3.2 e 10,44% maiores que os apresentados por Ramos (2016). Em compensação, os valores das médias máximas observadas diminuíram 25,89% em relação à combinação 3.2 e 31,17% em relação à Ramos (2016). Porém esta redução significativa nas médias máximas não se reflete nos parâmetros Xk máximos, onde os valores são no máximo 2,38% menores que os obtidos anteriormente. Novamente, nota-se uma alteração na estaca mais exigida para os esforços de compressão, enquanto que a estaca mais tracionada permanece a mesma. As Fig. 4.44 e 4.45 trazem as distribuições de probabilidade dos esforços nas estacas mais carregadas.

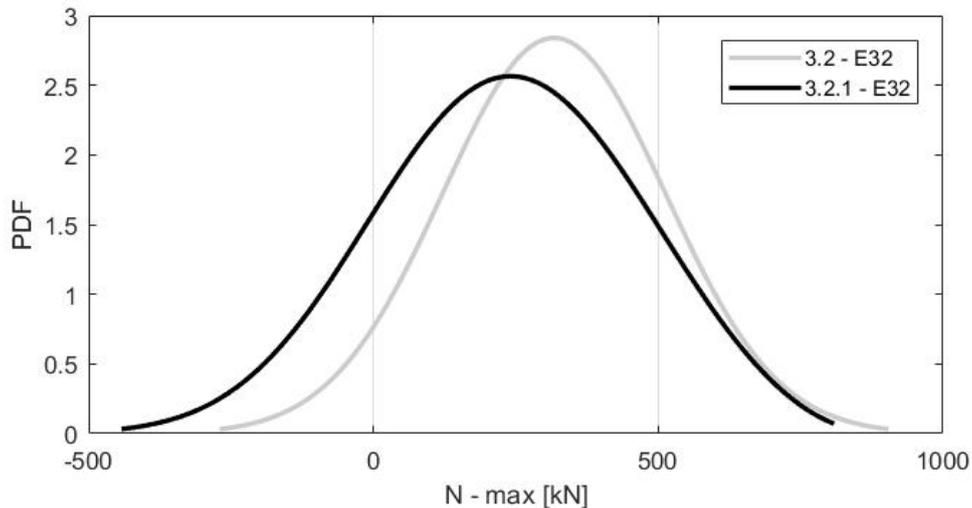


Figura 4.44 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo.

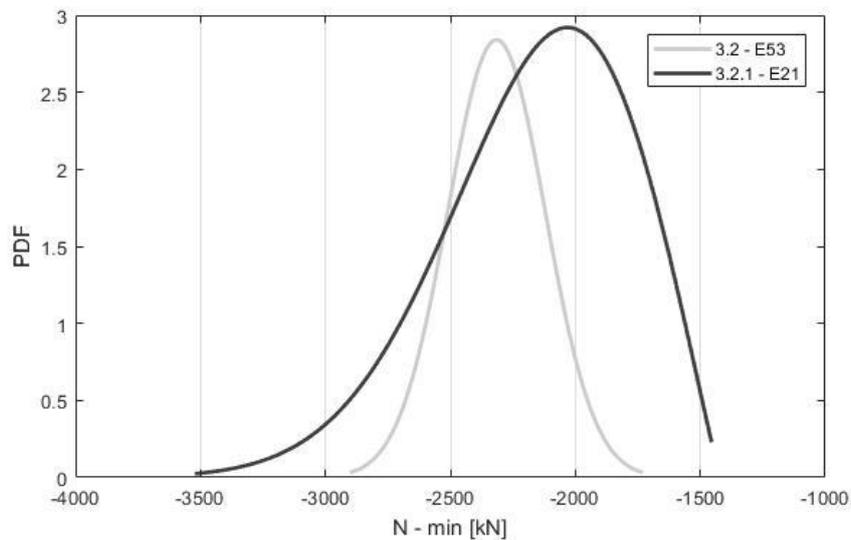


Figura 4.45 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo.

Com base nos gráficos das Fig. 4.44 e 4.45, pode-se perceber uma mudança na distribuição de probabilidade para as combinações modificadas. Ao analisar estas distribuições no *software* EasyFit com base no teste de Kolmogorov-Smirnov, para um nível de significância de 5%, nenhuma das distribuições ajustou-se à distribuição Normal, seguindo uma distribuição de Valores Extremos Generalizada (Fig. 4.46 e 4.47).

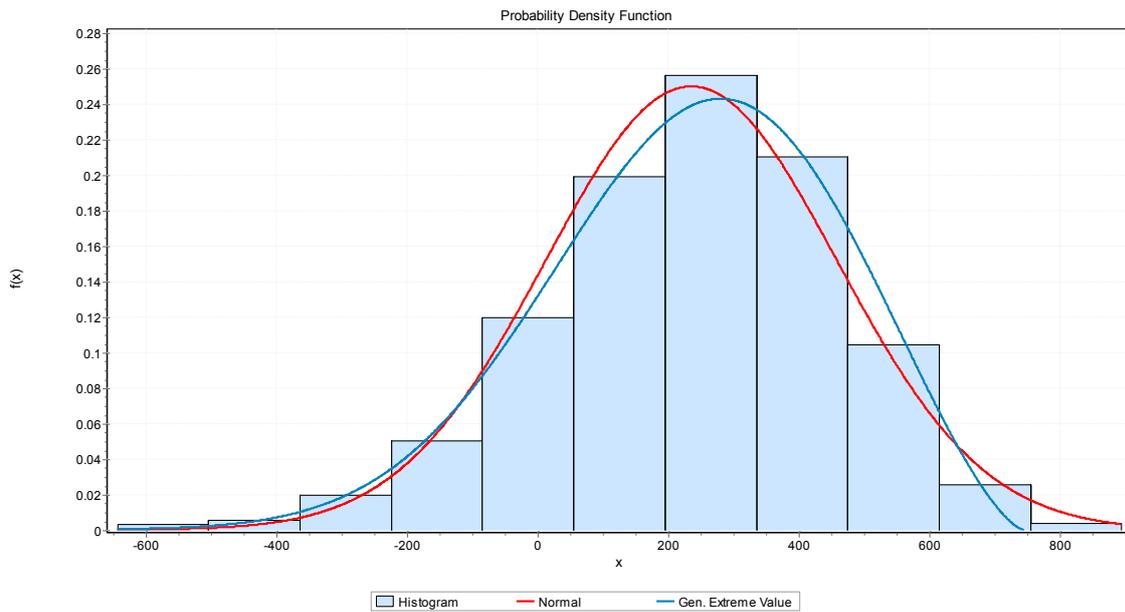


Figura 4.46 – Ajuste de curvas: 3.2.1 – E32.

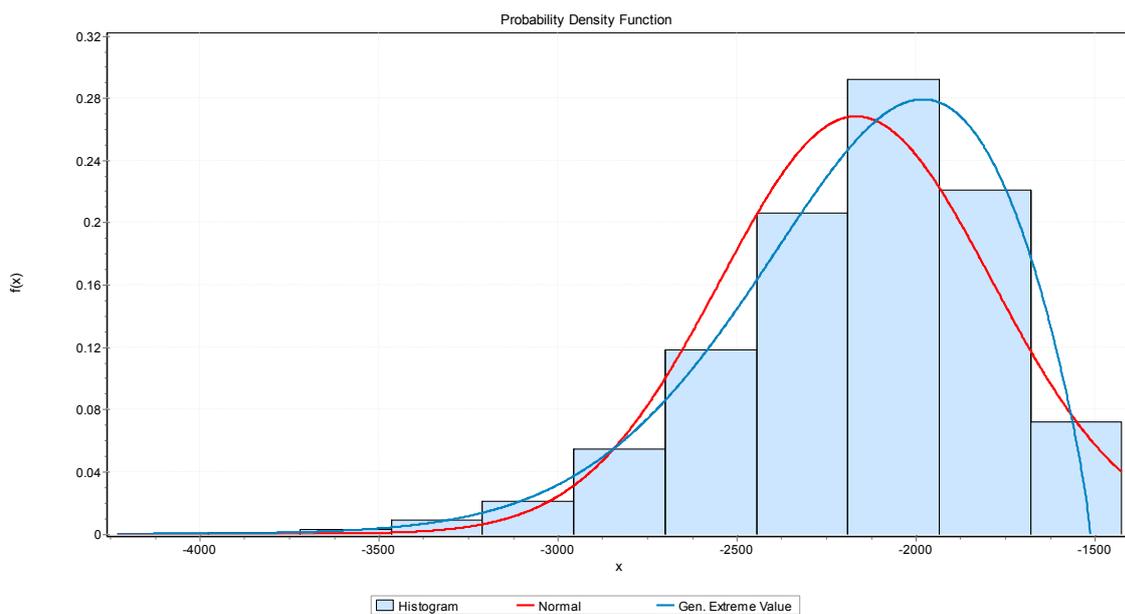


Figura 4.47 – Ajuste de curvas: 3.2.1 – E21.

Na estaca E21 percebemos uma maior distorção, pois os esforços de compressão decorrentes da sobrecarga são maiores. Neste caso, o Teorema do Limite Central não se verifica, pois a sobrecarga contribui muito mais para os esforços de compressão do que as outras ações, de modo que a soma de todos os esforços não se aproxima de uma distribuição normal.

Tabela 4.43 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 3.7.1 (beta).

| | | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] |
|--------------------------|----------------|---|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|
| Comb. 3.7.1 (beta) | μ - máx | \ | E17 | 774.00 | 116.00 | 353.10 | 1142.00 | 0.1499 | 1122.00 |
| | μ - mín | \ | E43 | -2363.00 | 245.70 | -3515.00 | -1664.00 | 0.1040 | -3100.10 |
| | σ - máx | | E23 | -2140.00 | 385.20 | -4037.00 | -1389.00 | 0.1800 | -3295.60 |
| | σ - mín | | E49 | -757.70 | 45.06 | -912.40 | -605.80 | 0.0595 | -892.88 |
| | δ - máx | \ | E27 | 110.60 | 218.60 | -798.00 | 685.10 | 1.9765 | 766.40 |
| | δ - mín | \ | E37 | -1192.00 | 54.25 | -1373.00 | -959.40 | 0.0455 | -1354.75 |
| | Xk - máx | \ | E17 | 774.00 | 116.00 | 353.10 | 1142.00 | 0.1499 | 1122.00 |
| | Xk - mín | | E23 | -2140.00 | 385.20 | -4037.00 | -1389.00 | 0.1800 | -3295.60 |
| Comb. 3.7 | Xk - máx | \ | E15 | 722.70 | 133.80 | 219.30 | 1155.00 | 0.1851 | 1124.10 |
| | Xk - mín | | E43 | -2265.00 | 210.00 | -3000.00 | -1473.00 | 0.0927 | -2895.00 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 768.30 | 117.50 | 346.60 | 1155.00 | 0.1529 | 1120.80 |
| | Xk - mín | - | - | -2278.00 | 207.60 | -3000.00 | -1473.00 | 0.0911 | -2900.80 |

Na combinação 3.7.1, foram observadas diferenças semelhantes aos outros grupos entre os parâmetros calculados, onde a maior diferença ficou entre os valores mínimos de Xk , de mais de 13%. Nota-se que a estaca mais carregada muda tanto para os esforços máximos quanto para os mínimos. As Fig. 4.48 e 4.49 trazem as distribuições do probabilidade dos esforços nas estacas mais carregadas.

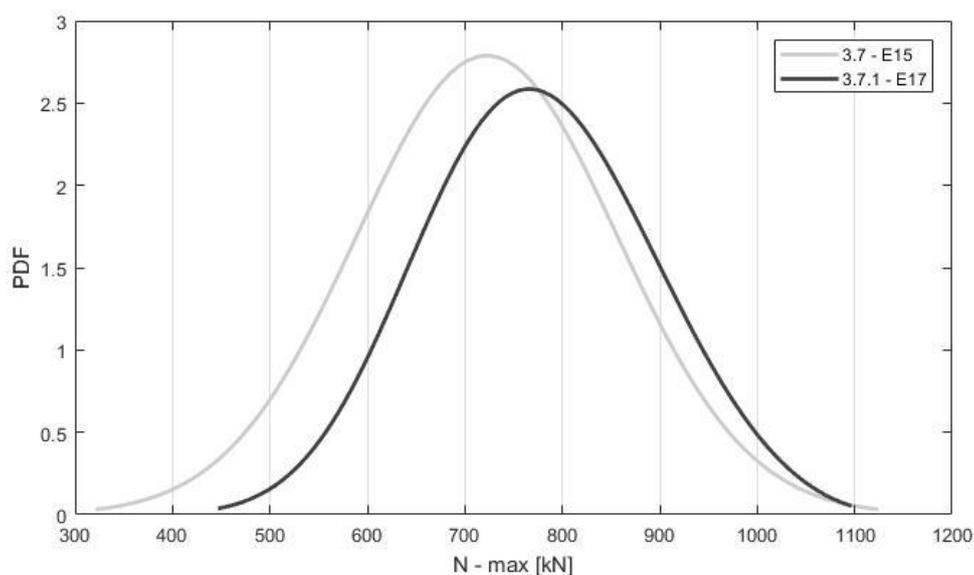


Figura 4.48 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo.

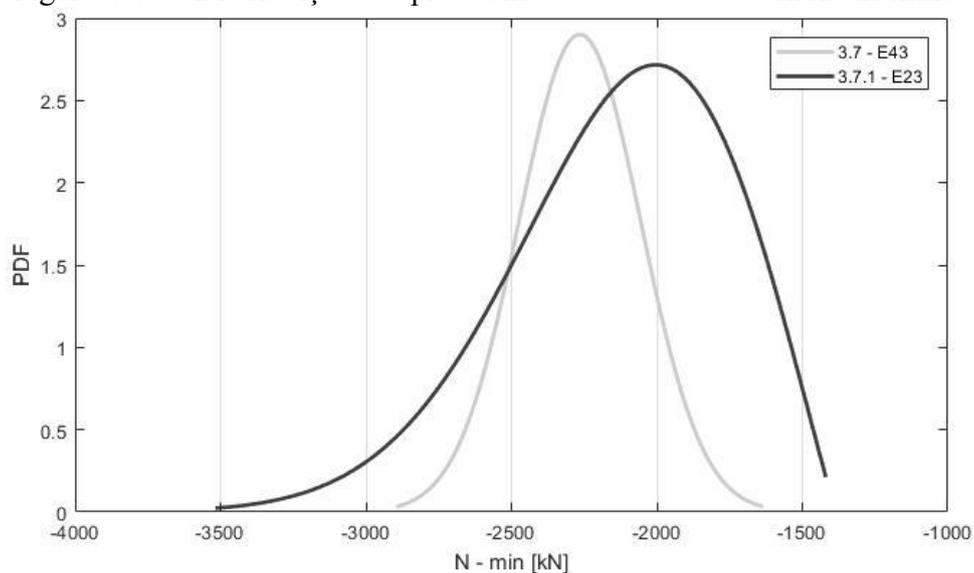


Figura 4.49 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo.

Nesta combinação, apenas a estaca E23 (Fig. 4.51), que apresenta os maiores esforços de compressão, não apresenta uma distribuição normal para os esforços axiais. Analisando estas distribuições no *software* EasyFit com base no teste de Kolmogorov-Smirnov, para um nível de significância de 5% a aproximação a uma curva normal é rejeitada, sendo mais ajustadas a uma distribuição de Valores Extremos Generalizada.

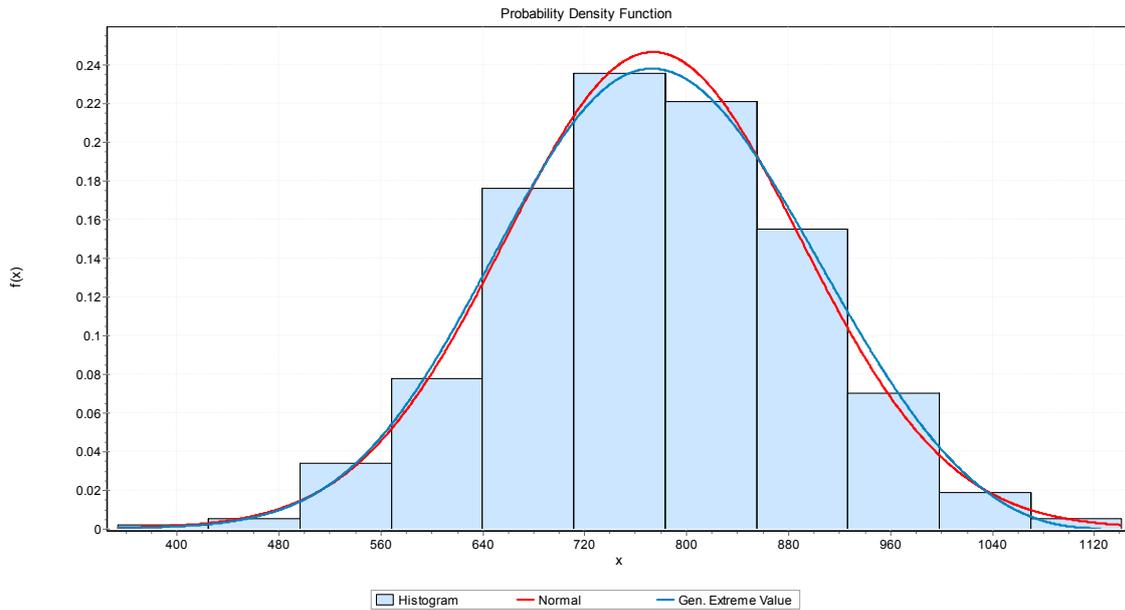


Figura 4.50 – Ajuste de curvas: 3.7.1 – E17.

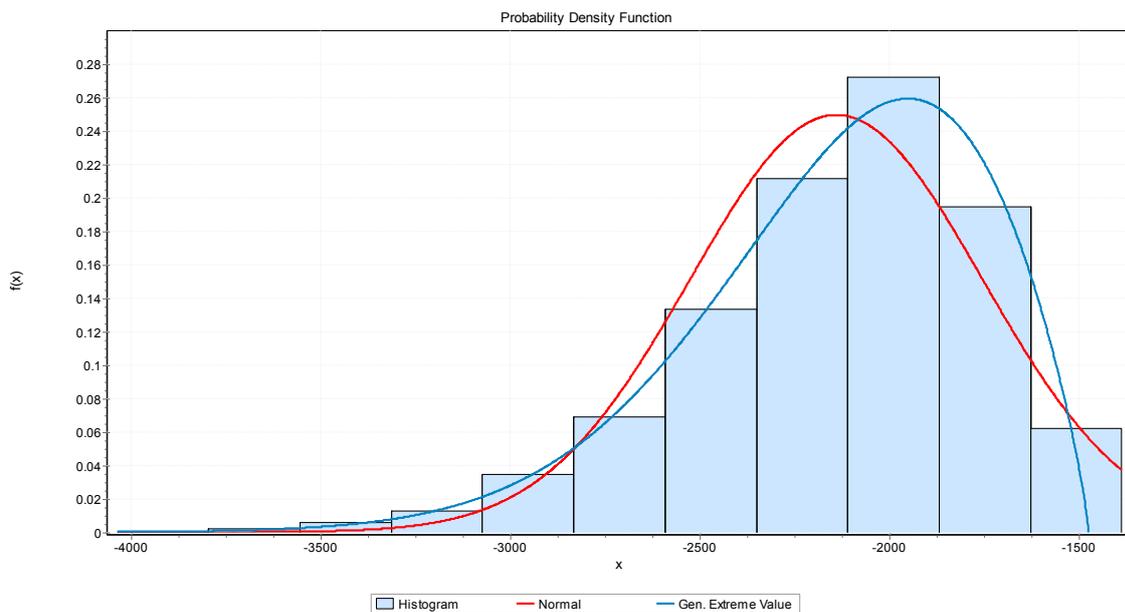


Figura 4.51 – Ajuste de curvas: 3.7.1 – E23.

4.2.4. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 4

Dentro do Grupo 4, foram modificadas as combinações 4.2 e 4.7. As Tab. 4.44 e 4.45 trazem os valores extremos – máximos e mínimos – para cada um dos parâmetros estatísticos analisados (média, desvio padrão, coef. de variação e Xk) das combinações, comparando estes valores com os obtidos no modelo inalterado e com os apresentados por Ramos (2016) nas mesmas combinações.

Tabela 4.44 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 4.2.1 (beta).

| | | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] |
|--------------------------|----------------|---|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|
| Comb. 4.2.1 (beta) | μ - máx | \ | E29 | 234.10 | 225.40 | -698.60 | 833.90 | 0.9628 | 910.30 |
| | μ - mín | | E53 | -2509.00 | 241.50 | -3811.00 | -1985.00 | 0.0963 | -3233.50 |
| | σ - máx | | E21 | -2165.00 | 379.60 | -4230.00 | -1424.00 | 0.1753 | -3303.80 |
| | σ - mín | | E13 | -883.00 | 148.80 | -1655.00 | -574.40 | 0.1685 | -1329.40 |
| | δ - máx | \ | E17 | 127.60 | 202.40 | -719.90 | 713.90 | 1.5862 | 734.80 |
| | δ - mín | | E53 | -2509.00 | 241.50 | -3811.00 | -1985.00 | 0.0963 | -3233.50 |
| | Xk - máx | \ | E29 | 234.10 | 225.40 | -698.60 | 833.90 | 0.9628 | 910.30 |
| | Xk - mín | | E23 | -2166.00 | 379.50 | -4231.00 | -1424.00 | 0.1752 | -3304.50 |
| Comb. 4.2 | Xk - máx | \ | E29 | 316.30 | 197.60 | -497.40 | 935.60 | 0.6247 | 909.10 |
| | Xk - mín | | E53 | -2400.00 | 195.30 | -3087.00 | -1728.00 | 0.0814 | -2985.90 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 336.60 | 195.10 | -334.60 | 990.20 | 0.5796 | 921.90 |
| | Xk - mín | - | - | -2418.00 | 191.50 | -3087.00 | -1851.00 | 0.0792 | -2992.50 |

Conforme observado também nos outros grupos, os valores de mínimos tornaram-se mais intensos enquanto que os valores máximos diminuíram. Para a combinação 4.2.1, os valores mínimos do parâmetro Xk são 10,67% maiores que na combinação 3.2 e 10,43% maiores que os apresentados por Ramos (2016). Em contrapartida, os valores das médias máximas observadas diminuíram 25,99% em relação à combinação 3.2 e 30,45% em relação à Ramos (2016), porém sem grandes reduções em relação aos parâmetros Xk máximos, onde os valores são no máximo 1,36% menores que os obtidos anteriormente. Novamente, houve uma alteração apenas na estaca mais exigida para os esforços de compressão, enquanto que a estaca mais tracionada permanece a mesma. As Fig. 4.52 e 4.53 trazem as distribuições do probabilidade dos esforços nas estacas mais carregadas.

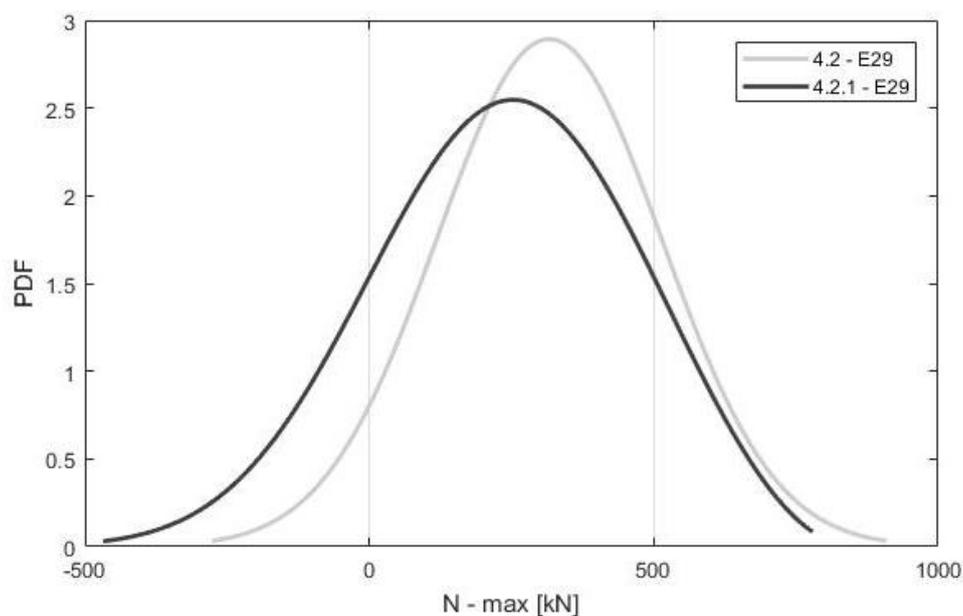


Figura 4.52 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo.

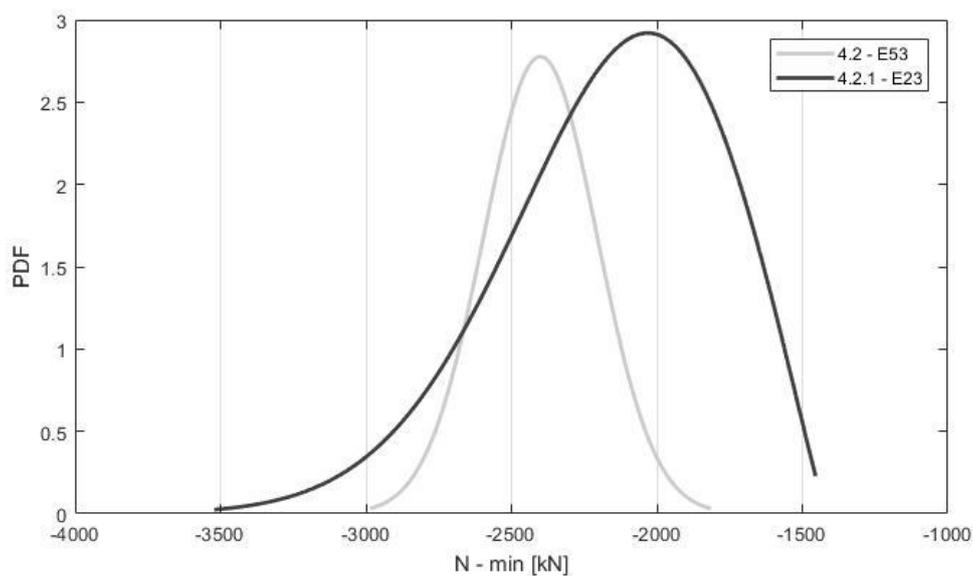


Figura 4.53 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo.

Com base nos gráficos acima, pode-se perceber uma mudança na distribuição de probabilidade para as combinações modificadas. Analisando estas distribuições no *software* EasyFit com base no teste de Kolmogorov-Smirnov, para um nível de significância de 5%, nenhuma das distribuições ajustou-se à distribuição Normal, seguindo uma distribuição de Valores Extremos Generalizada (Fig. 4.54 e 4.55).

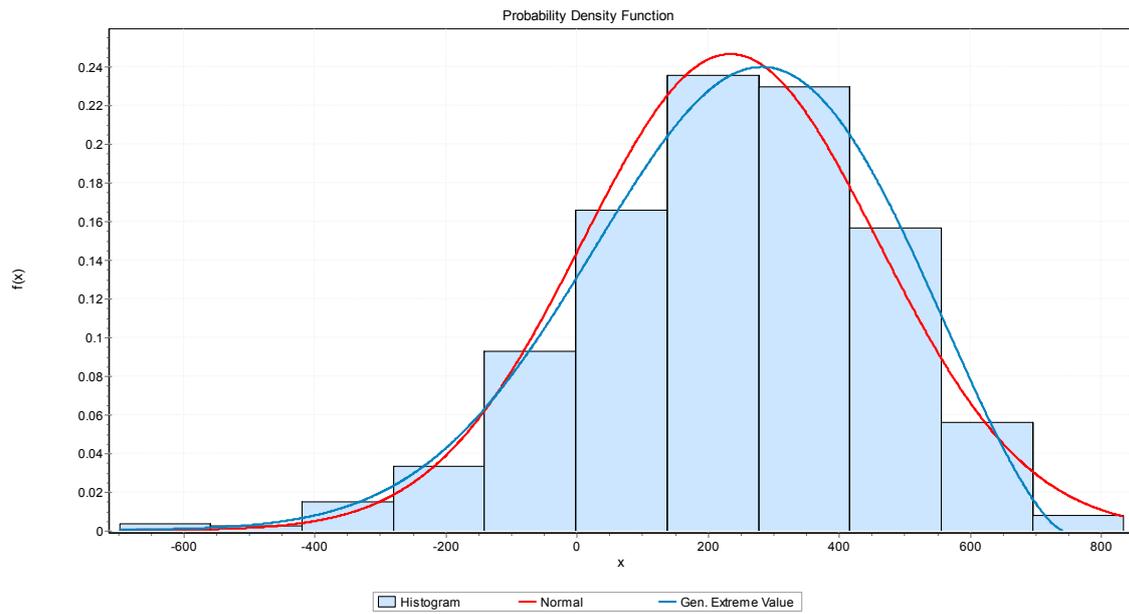


Figura 4.54 – Ajuste de curvas: 4.2.1 – E29.

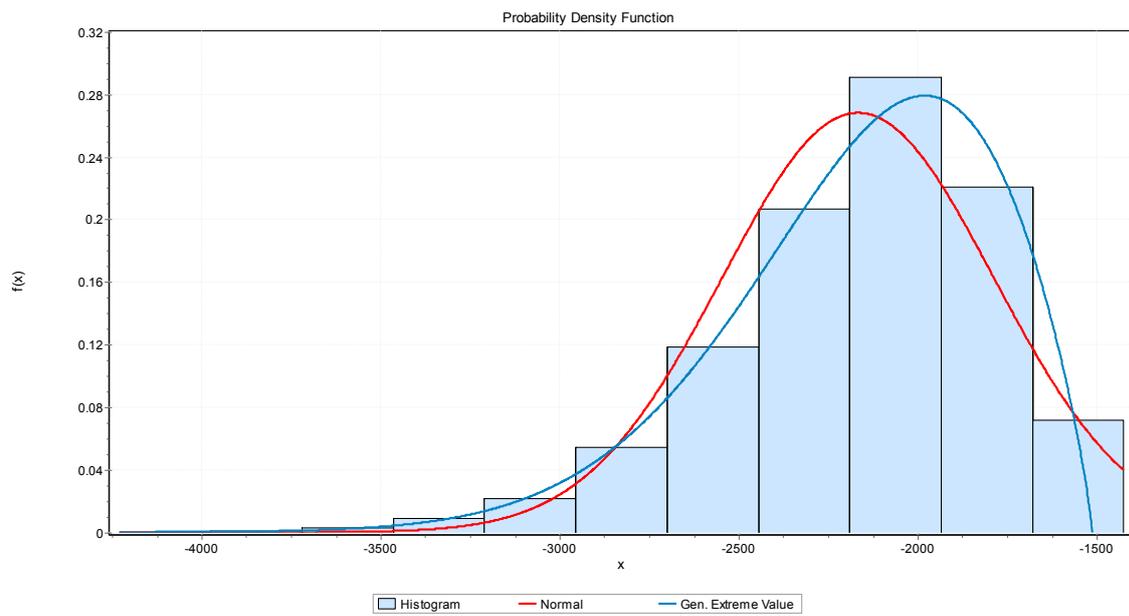
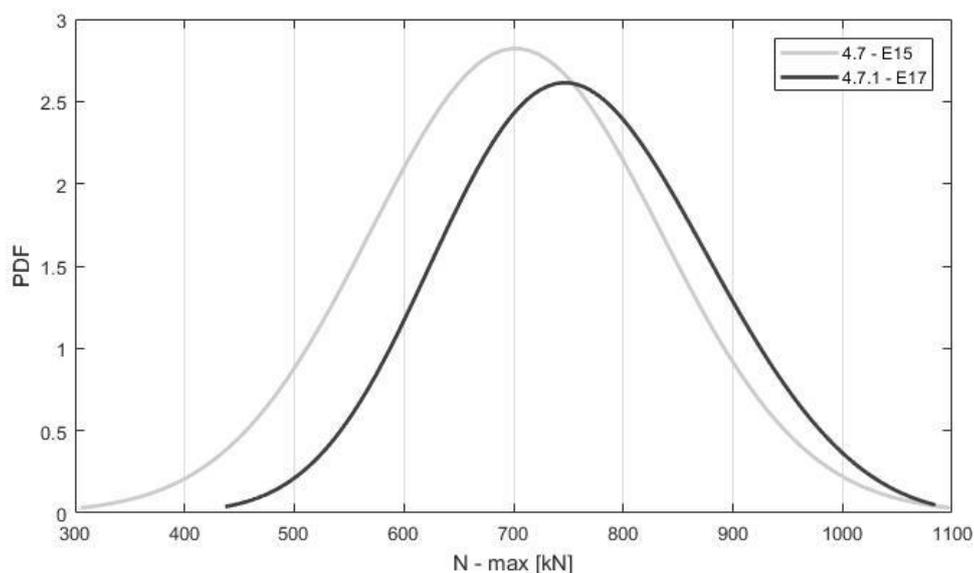


Figura 4.55 – Ajuste de curvas: 4.2.1 – E23.

Tabela 4.45 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 4.7.1 (beta).

| | | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] |
|--------------------------|----------------|---|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|
| Comb. 4.7.1 (beta) | μ - máx | \ | E17 | 757.00 | 114.70 | 346.70 | 1135.00 | 0.1515 | 1101.10 |
| | μ - mín | \ | E43 | -2358.00 | 245.70 | -3509.00 | -1663.00 | 0.1042 | -3095.10 |
| | σ - máx | | E23 | -2141.00 | 385.20 | -4038.00 | -1389.00 | 0.1799 | -3296.60 |
| | σ - mín | | E49 | -760.20 | 44.98 | -914.50 | -609.60 | 0.0592 | -895.14 |
| | δ - máx | \ | E27 | 106.60 | 218.40 | -799.10 | 683.60 | 2.0488 | 761.80 |
| | δ - mín | | E37 | -1193.00 | 54.25 | -1374.00 | -960.90 | 0.0455 | -1355.75 |
| | Xk - máx | \ | E17 | 757.00 | 114.70 | 346.70 | 1135.00 | 0.1515 | 1101.10 |
| | Xk - mín | | E23 | -2141.00 | 385.20 | -4038.00 | -1389.00 | 0.1799 | -3296.60 |
| Comb. 4.7 | Xk - máx | \ | E15 | 701.80 | 132.20 | 214.40 | 1149.00 | 0.1884 | 1098.4 |
| | Xk - mín | | E23 | -1964.00 | 308.90 | -2992.00 | -945.70 | 0.1573 | -2890.7 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 750.90 | 115.90 | 341.50 | 1149.00 | 0.1543 | 1098.60 |
| | Xk - mín | - | - | -2274.00 | 207.80 | -2999.00 | -1472.00 | 0.0914 | -2897.40 |

Na combinação 4.7.1, os esforços mínimos do parâmetro Xk foram 14% maiores em comparação à combinação 4.7 e 13,78% maiores em relação a Ramos (2016). Além disso, esta combinação resultou em um acréscimo nos tanto para os esforços máximos quanto para os mínimos. As Fig. 4.56 e 4.57 trazem as distribuições de probabilidade dos esforços nas estacas mais carregadas.

Figura 4.56 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo.

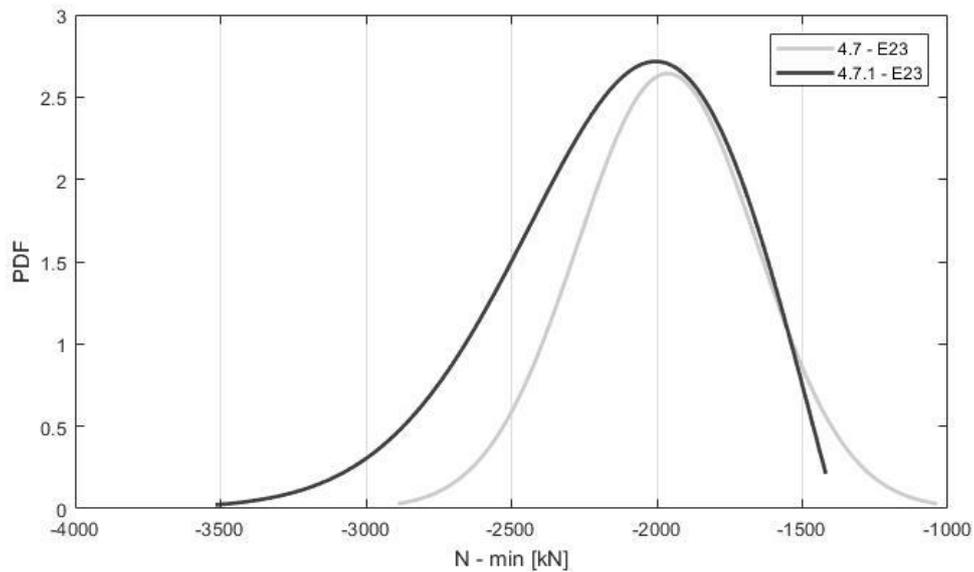


Figura 4.57 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo.

Nesta combinação, apenas a estaca E23, que apresenta os maiores esforços de compressão, não apresenta uma distribuição normal para os esforços axiais. Analisando estas distribuições no *software* EasyFit com base no teste de Kolmogorov-Smirnov, para um nível de significância de 5% a aproximação a uma curva normal é rejeitada, sendo mais ajustada a uma distribuição de Valores Extremos Generalizada. As Fig. 4.58 e 4.59 trazem o ajuste de curvas para estas distribuições:

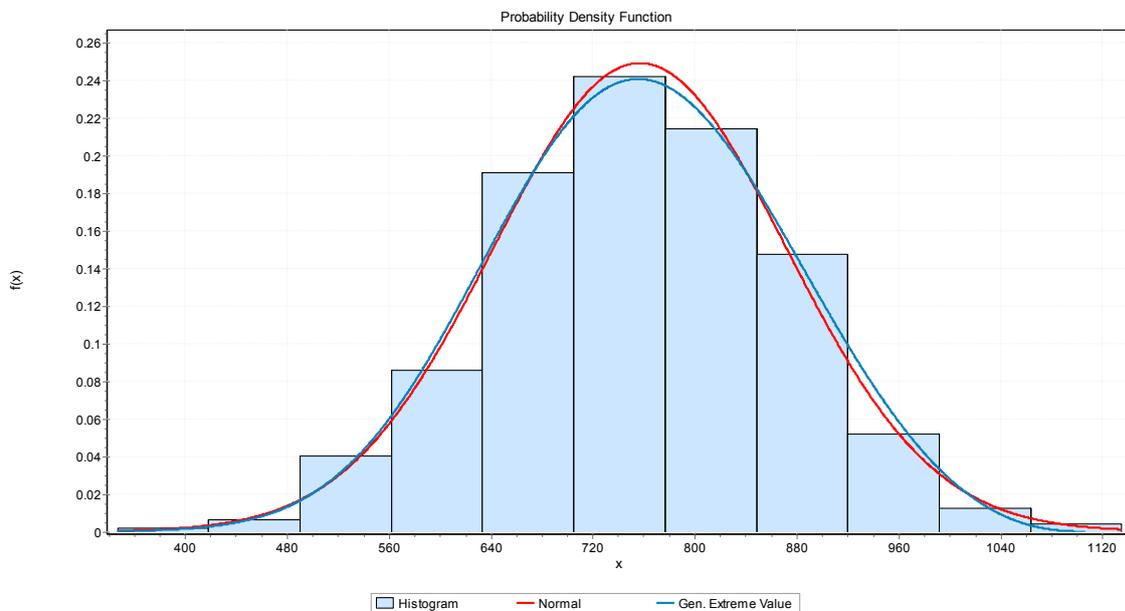


Figura 4.58 – Ajuste de curvas: 4.7.1 – E17.

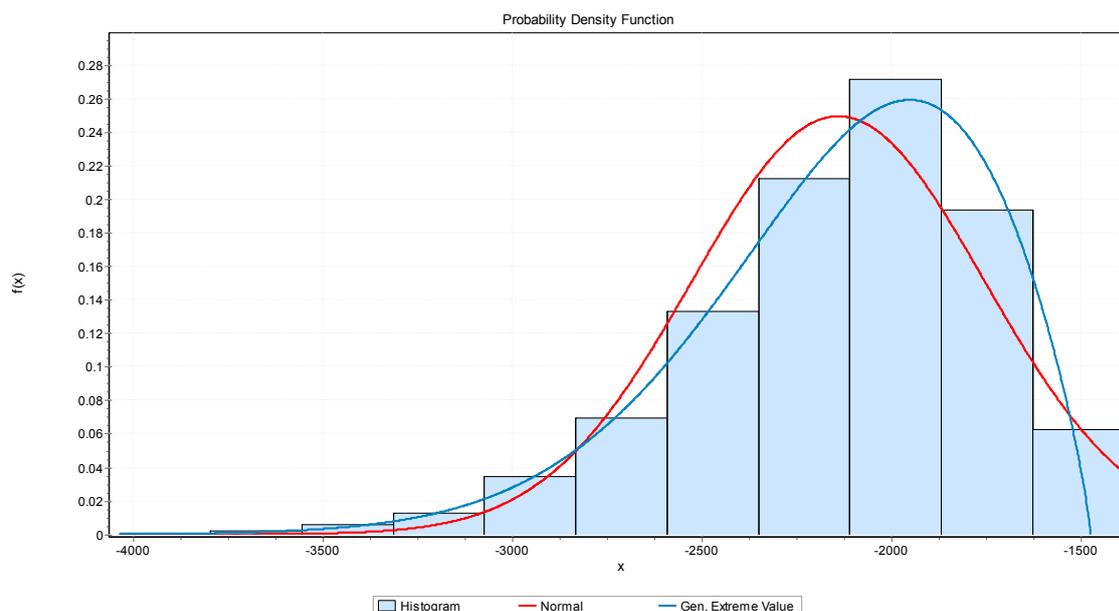


Figura 4.59 – Ajuste de curvas: 4.7.1 – E23.

4.2.5. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 5

As combinações 5.4 e 5.6 foram modificadas dentro do Grupo 5. As Tab. 4.46 e 4.47 trazem os valores extremos – máximos e mínimos – para cada um dos parâmetros estatísticos analisados (média, desvio padrão, coef. de variação e Xk) das combinações, comparando estes valores com os obtidos no modelo inalterado e com os apresentados por Ramos (2016) nas mesmas combinações.

Tabela 4.46 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 5.4.1 (beta).

| | | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] |
|--------------------------|----------------|---|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|
| Comb. 5.4.1 (beta) | μ - máx | \ | E29 | 201.80 | 227.10 | -721.30 | 931.50 | 1.1254 | 883.10 |
| | μ - mín | \ | E26 | -2403.00 | 241.10 | -3473.00 | -1748.00 | 0.1003 | -3126.30 |
| | σ - máx | | E21 | -2168.00 | 378.60 | -4033.00 | -1429.00 | 0.1746 | -3303.80 |
| | σ - mín | | E13 | -1734.00 | 148.50 | -2435.00 | -1435.00 | 0.0856 | -2179.50 |
| | δ - máx | \ | E15 | 155.20 | 226.90 | -781.50 | 779.00 | 1.4620 | 835.90 |
| | δ - mín | | E13 | -1734.00 | 148.50 | -2435.00 | -1435.00 | 0.0856 | -2179.50 |
| | Xk - máx | \ | E29 | 201.80 | 227.10 | -721.30 | 931.50 | 1.1254 | 883.10 |
| | Xk - mín | \ | E21 | -2168.00 | 378.60 | -4033.00 | -1429.00 | 0.1746 | -3303.80 |
| Comb. 5.4 | Xk - máx | \ | E29 | 283.90 | 200.00 | -398.50 | 1034.00 | 0.7045 | 883.9 |
| | Xk - mín | \ | E26 | -2310.00 | 208.50 | -3010.00 | -1566.00 | 0.0903 | -2935.5 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 315.20 | 196.10 | -346.60 | 1061.00 | 0.6221 | 903.50 |
| | Xk - mín | - | - | -2363.00 | 194.50 | -3024.00 | -1770.00 | 0.0823 | -2946.50 |

Novamente, vemos que os valores dos esforços mínimos sofreram um acréscimo enquanto que os esforços máximos diminuíram de intensidade. Para a combinação 5.4.1, os valores mínimos do parâmetro Xk são 12,55% maiores que na combinação 3.2 e 12,13% maiores que os apresentados por Ramos (2016). Em contrapartida, o valor da maior média observada diminuiu 28,92% em relação à combinação 4.2 e 36% em relação à Ramos (2016), porém sem grandes reduções em relação aos parâmetros Xk máximos, onde os valores são no máximo 2,26% menores que os obtidos anteriormente em Ramos (2016). Novamente, houve uma alteração apenas na estaca mais exigida para os esforços de compressão, enquanto que a estaca mais tracionada permanece a mesma. As Fig. 4.60 e 4.61 trazem as distribuições de probabilidade dos esforços nas estacas mais carregadas.

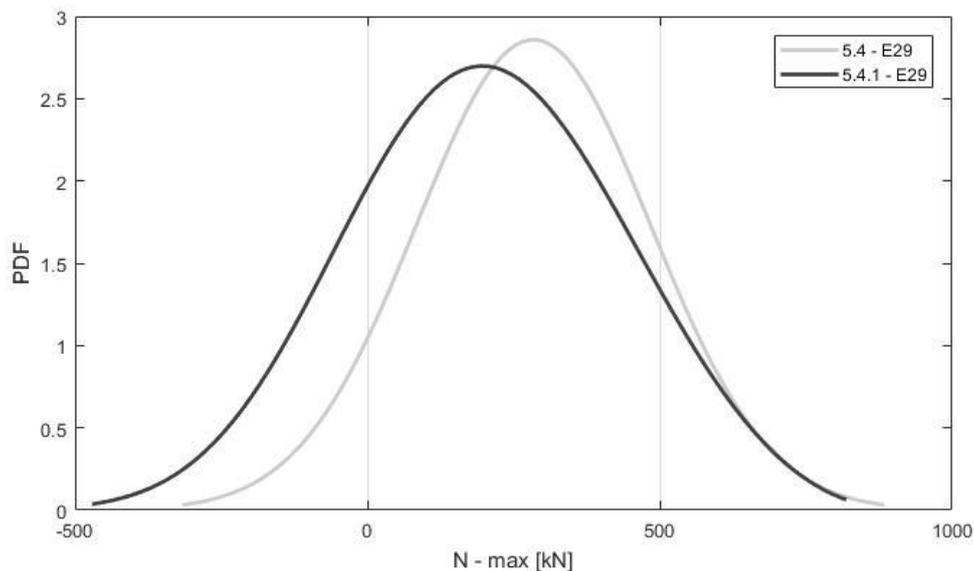


Figura 4.60 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo.

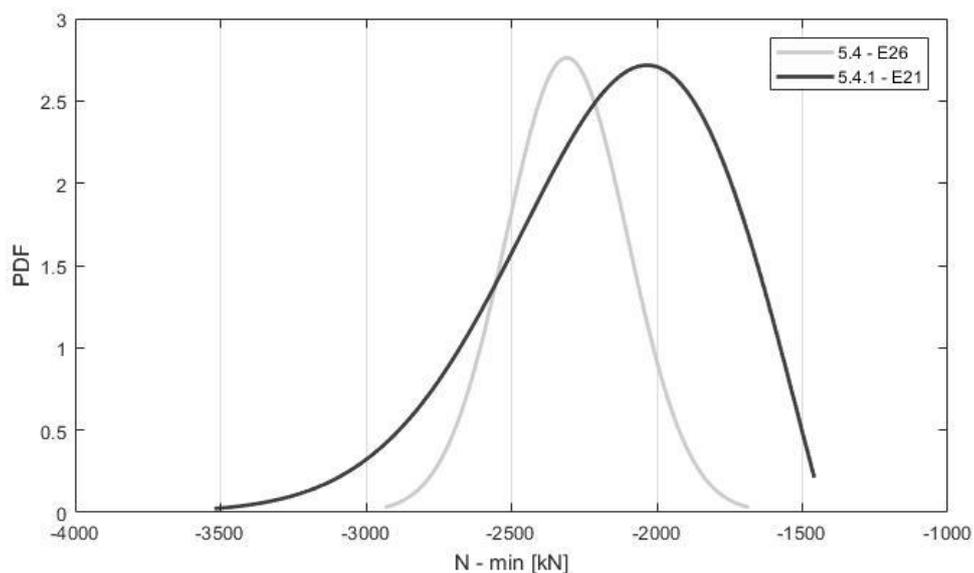


Figura 4.61 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo.

Com base nos gráficos acima, pode-se perceber uma mudança na distribuição de probabilidade para as combinações modificadas. Analisando estas distribuições no *software* EasyFit com base no teste de Kolmogorov-Smirnov, para um nível de significância de 5%, nenhuma das distribuições ajustou-se à distribuição Normal, seguindo uma distribuição de Valores Extremos Generalizada (Fig. 4.54 e 4.55).

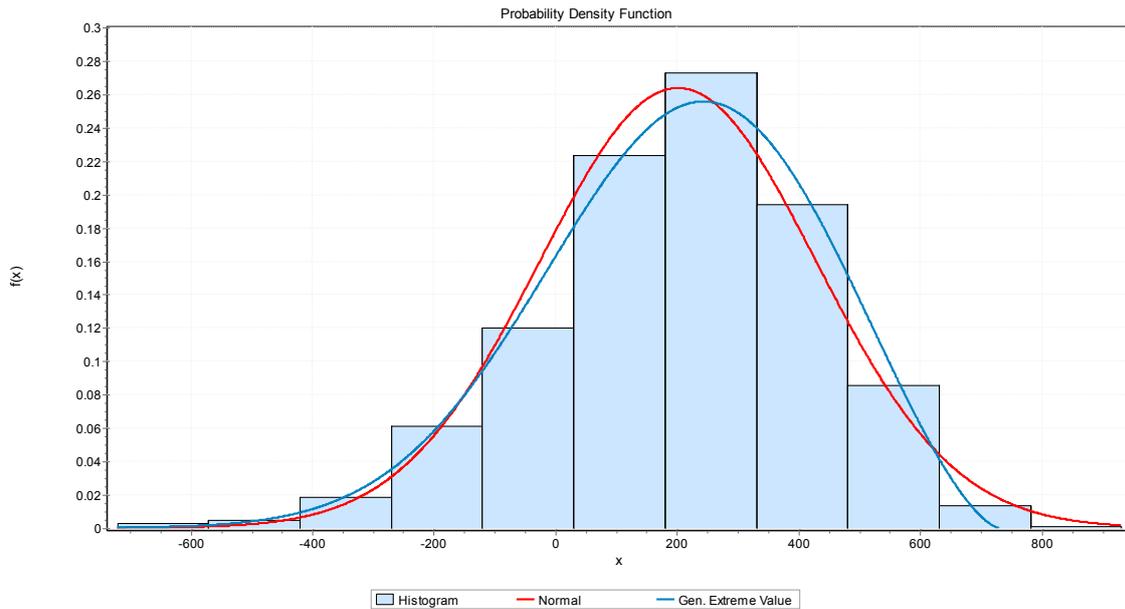


Figura 4.62 – Ajuste de curvas: 5.4.1 – E29.

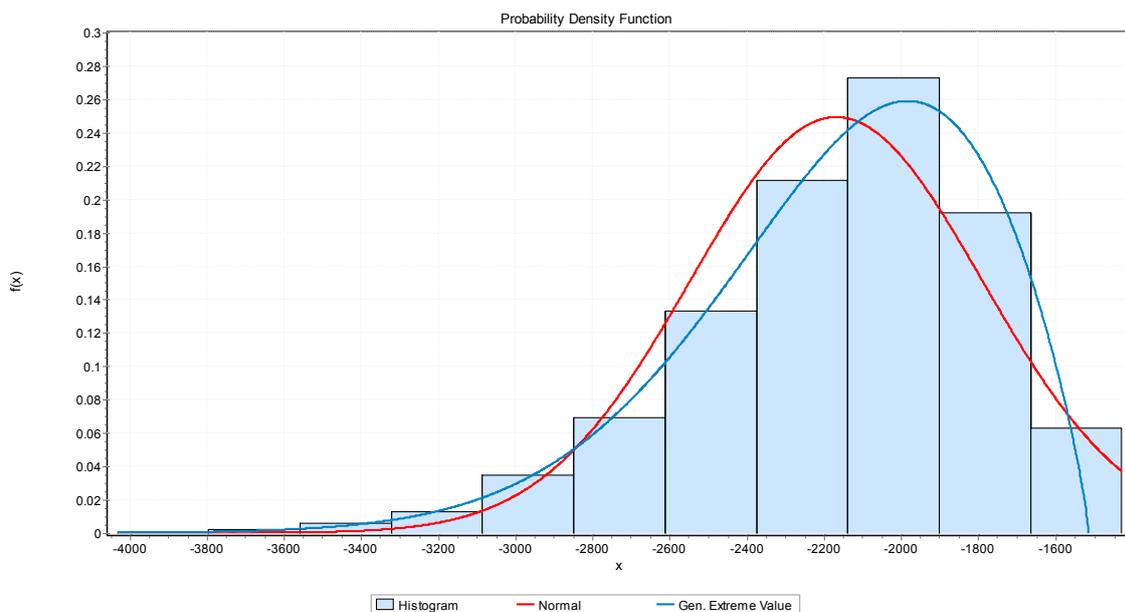
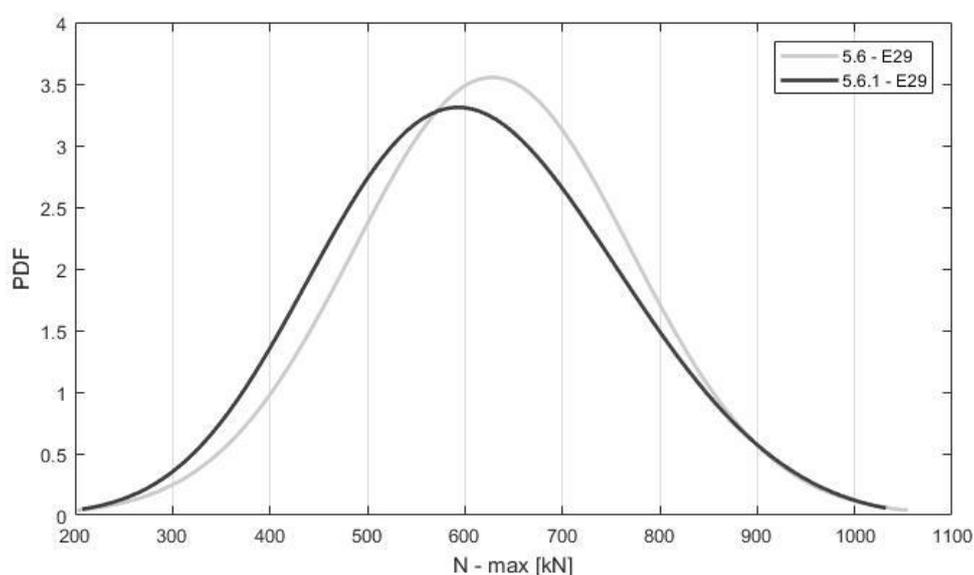


Figura 4.63 – Ajuste de curvas: 5.4.1 – E21.

Tabela 4.47 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 5.6.1 (beta).

| | | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] |
|--------------------------|----------------|---|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|
| Comb. 5.6.1 (beta) | μ - máx | \ | E27 | 645.20 | 118.60 | 19.64 | 1039.00 | 0.1838 | 1001.00 |
| | μ - mín | \ | E35 | -1736.00 | 135.00 | -2255.00 | -1177.00 | 0.0778 | -2141.00 |
| | σ - máx | \ | E29 | 608.30 | 144.50 | -133.90 | 1129.00 | 0.2375 | 1041.80 |
| | σ - mín | | E41 | -1002.00 | 49.72 | -1176.00 | -833.00 | 0.0496 | -1151.16 |
| | δ - máx | \ | E46 | 484.90 | 139.60 | -95.41 | 958.50 | 0.2879 | 903.70 |
| | δ - mín | | E37 | -1010.00 | 49.82 | -1183.00 | -842.50 | 0.0493 | -1159.46 |
| | Xk - máx | \ | E29 | 608.30 | 144.50 | -133.90 | 1129.00 | 0.2375 | 1041.80 |
| | Xk - mín | \ | E35 | -1736.00 | 135.00 | -2255.00 | -1177.00 | 0.0778 | -2141.00 |
| Comb. 5.6 | Xk - máx | \ | E29 | 628.10 | 142.10 | -112.10 | 1153.00 | 0.2262 | 1054.4 |
| | Xk - mín | \ | E35 | -1743.00 | 134.60 | -2261.00 | -1184.00 | 0.0772 | -2146.8 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 663.00 | 125.60 | 42.56 | 1153.00 | 0.1894 | 1039.80 |
| | Xk - mín | - | - | -1762.00 | 128.40 | -2261.00 | -1365.00 | 0.0729 | -2147.20 |

Na combinação 5.4.1, as diferenças entre os parâmetros calculados foram baixas, além de ter resultado em valores menos intensos tanto para os esforços máximos quanto para os mínimos. As Fig. 4.64 e 4.65 trazem as distribuições de probabilidade dos esforços nas estacas mais carregadas.

Figura 4.64 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo.

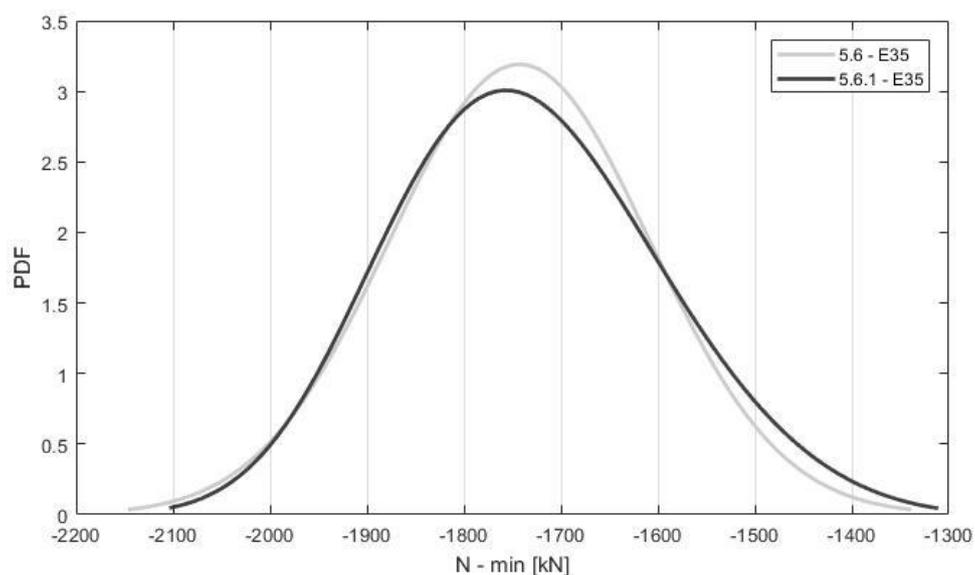


Figura 4.65 – Distribuições de probabilidade das estacas com X_k mínimo.

Para a combinação 5.6, observou-se que a distribuição de probabilidade das duas estacas analisadas ajustou-se a uma distribuição normal com base no teste de Kolmogorov-Smirnov, para um nível de significância de 5%. As Fig. 4.66 e 4.67 trazem o ajuste de curvas para estas distribuições:

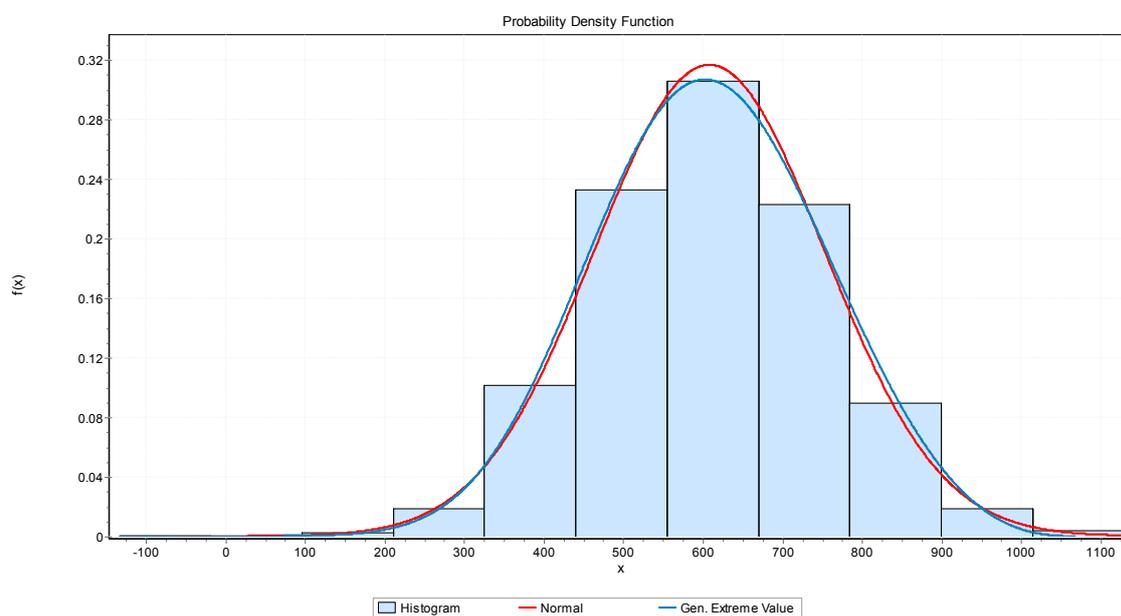


Figura 4.66 – Ajuste de curvas: 5.6.1 – E29.

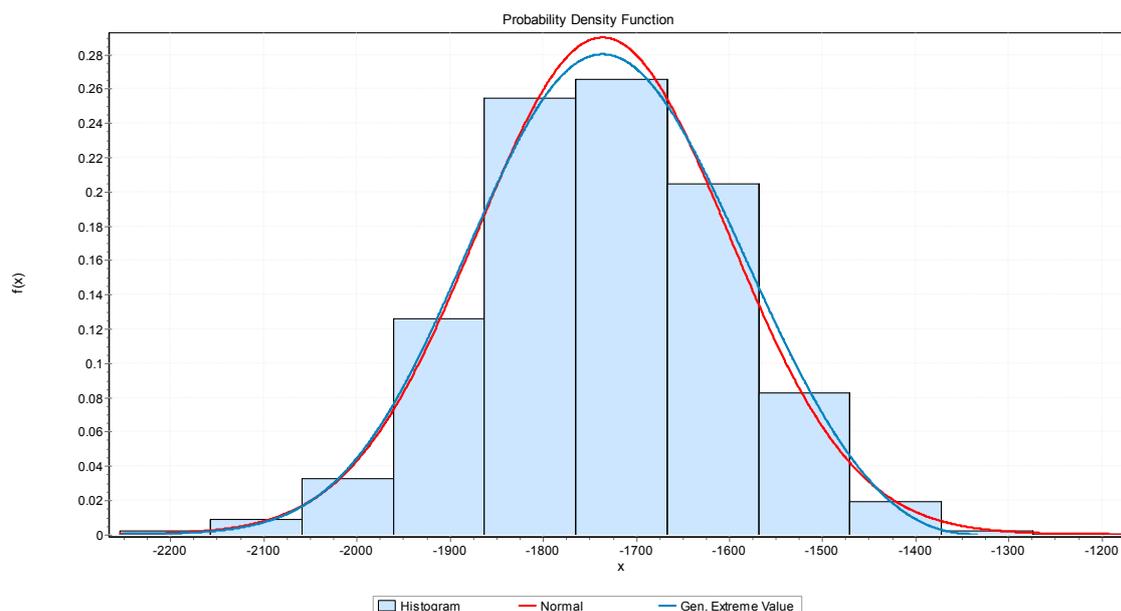


Figura 4.67 – Ajuste de curvas: 5.6.1 – E35.

4.2.6. Parâmetros Estatísticos e Distribuições de Probabilidade – Grupo 6

No Grupo 6, que apresentou as piores situações tanto de tração quanto de compressão, as combinações alteradas foram as de número 6.2 e 6.4. As Tab. 4.48 e 4.49 trazem os valores extremos – máximos e mínimos – para cada um dos parâmetros estatísticos (média, desvio padrão, coef. de variação e Xk) das combinações analisadas, comparando estes valores com os obtidos no modelo inalterado e com os apresentados por Ramos (2016) nas mesmas combinações.

Tabela 4.48 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 6.2.1 (beta).

| | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] | |
|--------------------------|----------------|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|----------|
| Comb. 6.2.1 (beta) | μ - máx | \ | E29 | 382.90 | 284.20 | -720.50 | 1525.00 | 0.7422 | 1235.50 |
| | μ - mín | \ | E26 | -2549.00 | 295.70 | -3636.00 | -1718.00 | 0.1160 | -3436.10 |
| | σ - máx | | E21 | -2181.00 | 378.50 | -4048.00 | -1438.00 | 0.1735 | -3316.50 |
| | σ - mín | | E13 | -874.00 | 152.50 | -1611.00 | -509.50 | 0.1745 | -1331.50 |
| | δ - máx | \ | E36 | -67.52 | 290.70 | -1281.00 | 1000.00 | 4.31 | -939.62 |
| | δ - mín | | E6 | -2323.00 | 224.70 | -3403.00 | -1891.00 | 0.0967 | -2997.10 |
| | Xk - máx | \ | E29 | 382.90 | 284.20 | -720.50 | 1525.00 | 0.7422 | 1235.50 |
| | Xk - mín | \ | E26 | -2549.00 | 295.70 | -3636.00 | -1718.00 | 0.1160 | -3436.10 |
| Comb. 6.2 | Xk - máx | \ | E29 | 465.00 | 263.10 | -370.10 | 1573.00 | 0.5658 | 1254.3 |
| | Xk - mín | \ | E26 | -2455.00 | 269.80 | -3493.00 | -1655.00 | 0.1099 | -3264.4 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 577.40 | 234.00 | -152.20 | 1573.00 | 0.4053 | 1279.40 |
| | Xk - mín | - | - | -2562.00 | 240.70 | -3493.00 | -1873.00 | 0.0940 | -3284.10 |

Em relação à combinação 6.2 – que foi a combinação que gerou os maiores esforços de compressão no modelo inalterado – destaca-se que houve um acréscimo de 5,26% para o parâmetro Xk . Além de um acréscimo de 4,63% deste mesmo parâmetro com relação a Ramos (2016), valores menores que os observados nos outros grupos. Os valores máximos apresentaram comportamento semelhante às demais combinações, com uma grande diminuição dos valores médios porém sem alterar significativamente o parâmetro Xk . Não houve alteração das estacas mais solicitadas. As Fig. 4.68 e 4.69 trazem as distribuições do probabilidade dos esforços nas estacas mais carregadas.

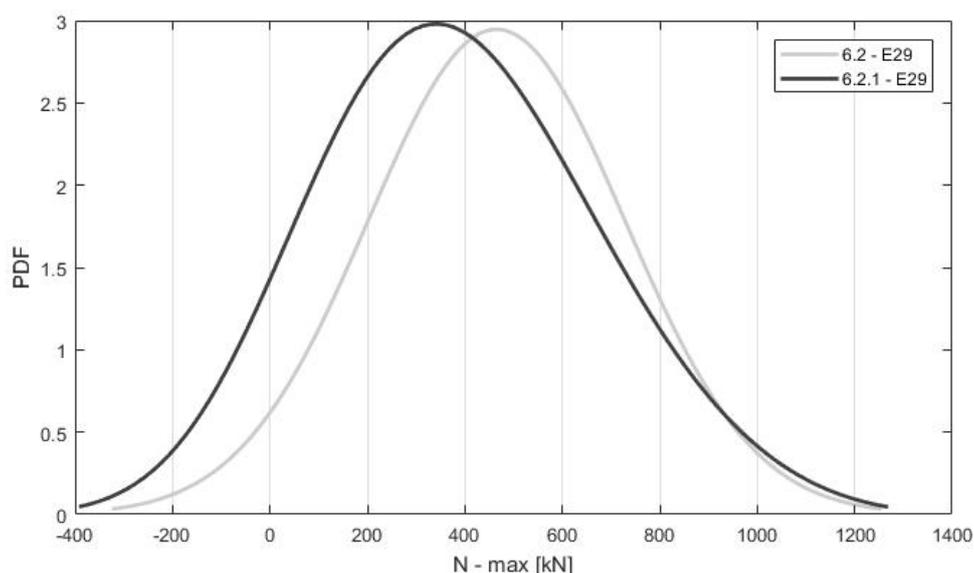


Figura 4.68 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo.

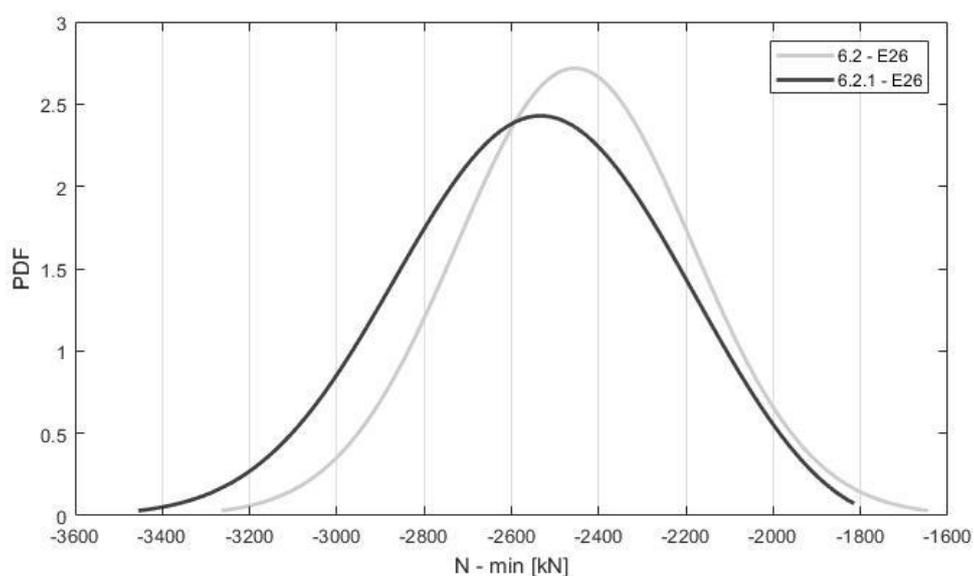


Figura 4.69 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk mínimo.

Analisando estas distribuições no *software* EasyFit com base no teste de Kolmogorov-Smirnov, para um nível de significância de 5%, apenas a distribuição dos esforços na estaca E29 ajustou-se a uma distribuição Normal, de modo que a distribuição da estaca E26 ajusta-se a uma distribuição de Valores Extremos Generalizada (Fig. 4.70 e 4.71).

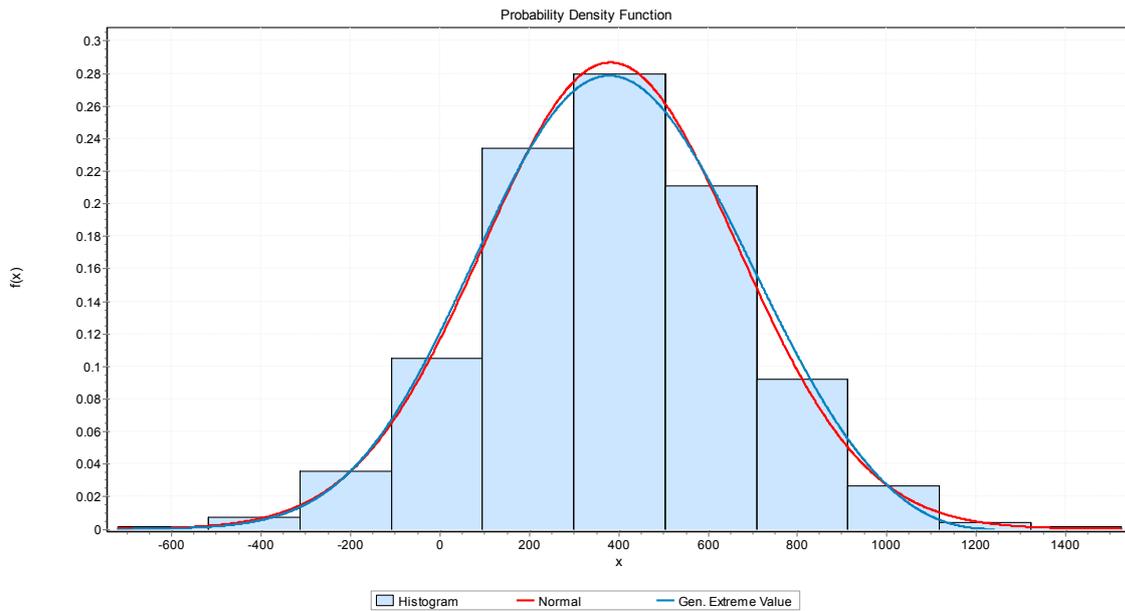


Figura 4.70 – Ajuste de curvas: 6.2.1 – E29.

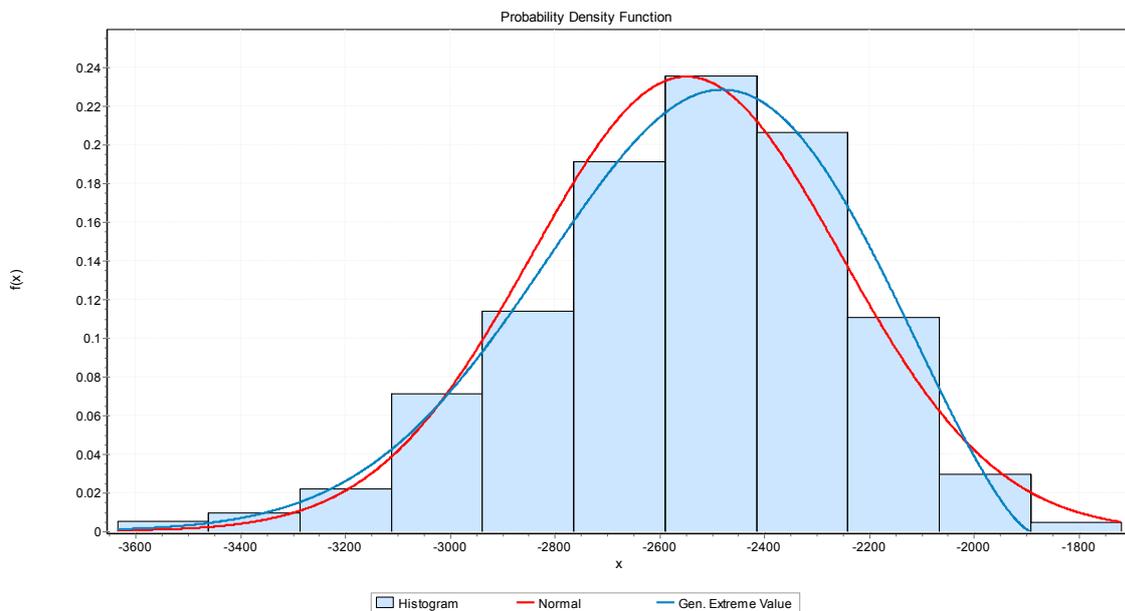
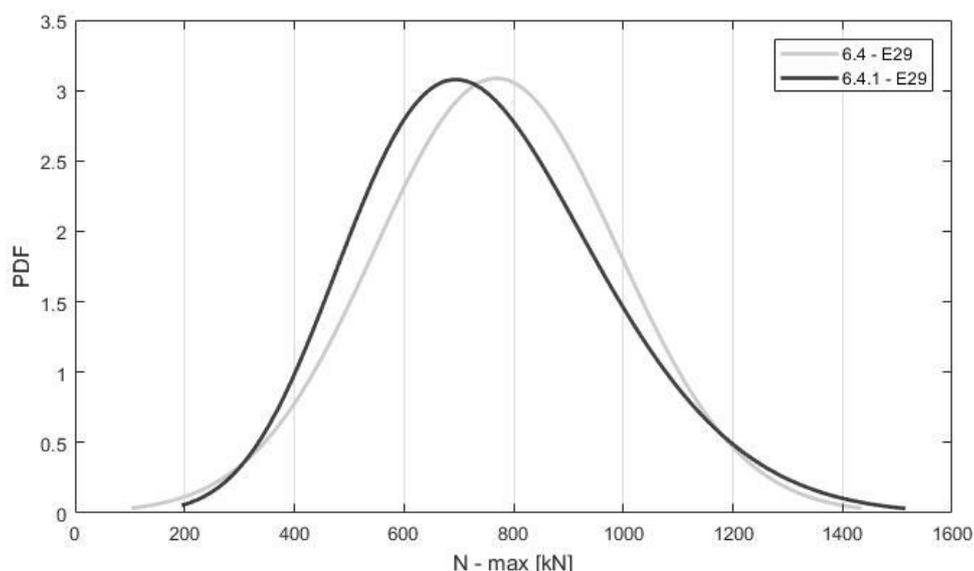


Figura 4.71 – Ajuste de curvas: 6.2.1 – E26.

Tabela 4.49 – Parâmetros estatísticos dos esforços axiais no topo das estacas – Comb. 6.4.1 (beta).

| | | I | Estaca | μ [kN] | σ [kN] | Min [kN] | Máx [kN] | δ | Xk [kN] |
|--------------------------|----------------|---|--------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|--------------|
| Comb. 6.4.1 (beta) | μ - máx | \ | E34 | 787.00 | 167.10 | 329.30 | 1540.00 | 0.2123 | 1288.30 |
| | μ - mín | \ | E26 | -1846.00 | 221.00 | -2974.00 | -1243.00 | 0.1197 | -2509.00 |
| | σ - máx | \ | E29 | 749.00 | 223.50 | 75.42 | 1810.00 | 0.2984 | 1419.50 |
| | σ - mín | | E49 | -763.50 | 46.38 | -927.10 | -599.70 | 0.0607 | -902.64 |
| | δ - máx | \ | E15 | 703.90 | 217.10 | 2.95 | 1388.00 | 0.3084 | 1355.20 |
| | δ - mín | | E24 | -1032.00 | 53.62 | -1217.00 | -868.50 | 0.0520 | -1192.86 |
| | Xk - máx | \ | E29 | 749.00 | 223.50 | 75.42 | 1810.00 | 0.2984 | 1419.50 |
| | Xk - mín | \ | E26 | -1846.00 | 221.00 | -2974.00 | -1243.00 | 0.1197 | -2509.00 |
| Comb. 6.4 | Xk - máx | \ | E29 | 768.80 | 221.90 | 105.40 | 1822.00 | 0.2886 | 1434.5 |
| | Xk - mín | \ | E26 | -1852.00 | 220.80 | -2978.00 | -1247.00 | 0.1192 | -2514.4 |
| Ramos (2016) | Xk - máx | - | - | 896.20 | 175.70 | 352.00 | 1822.00 | 0.1960 | 1423.30 |
| | Xk - mín | - | - | -1955.00 | 188.50 | -2978.00 | -1432.00 | 0.0964 | -2520.50 |

Na combinação 6.4.1, praticamente não houve diferenças entre os parâmetros Xk mínimos calculados. Já para os esforços máximos, os valores calculados foram mais baixos, conforme o esperado. As Fig. 4.72 e 4.73 trazem as distribuições do probabilidade dos esforços nas estacas mais carregadas.

Figura 4.72 – Distribuições de probabilidade das estacas com Xk máximo.

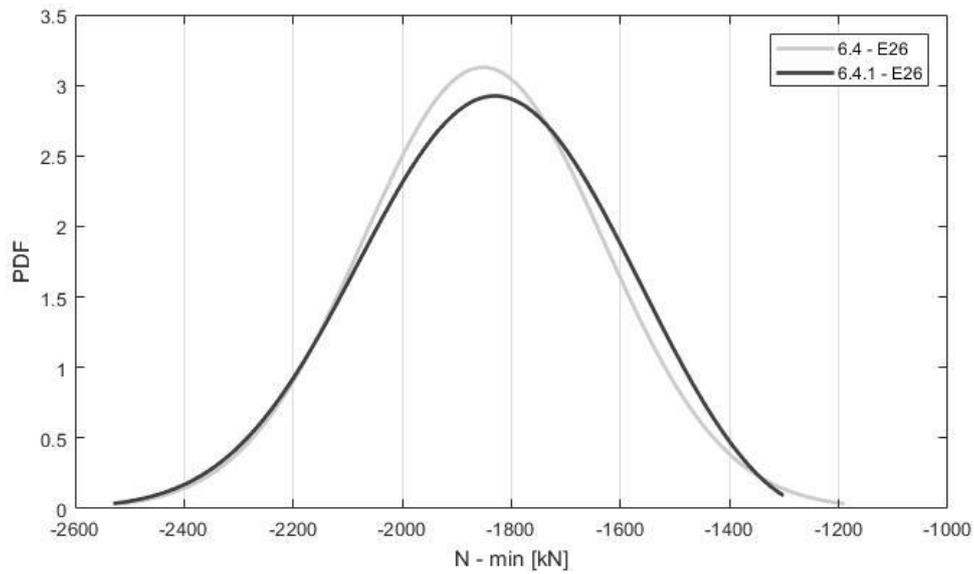


Figura 4.73 – Distribuições de probabilidade das estacas com X_k mínimo.

Para a combinação 6.4, observou-se apenas a distribuição de probabilidade da estaca E29 ajustou-se a uma distribuição Normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, para um nível de significância de 5%. As Fig. 4.66 e 4.67 trazem o ajuste de curvas para estas distribuições:

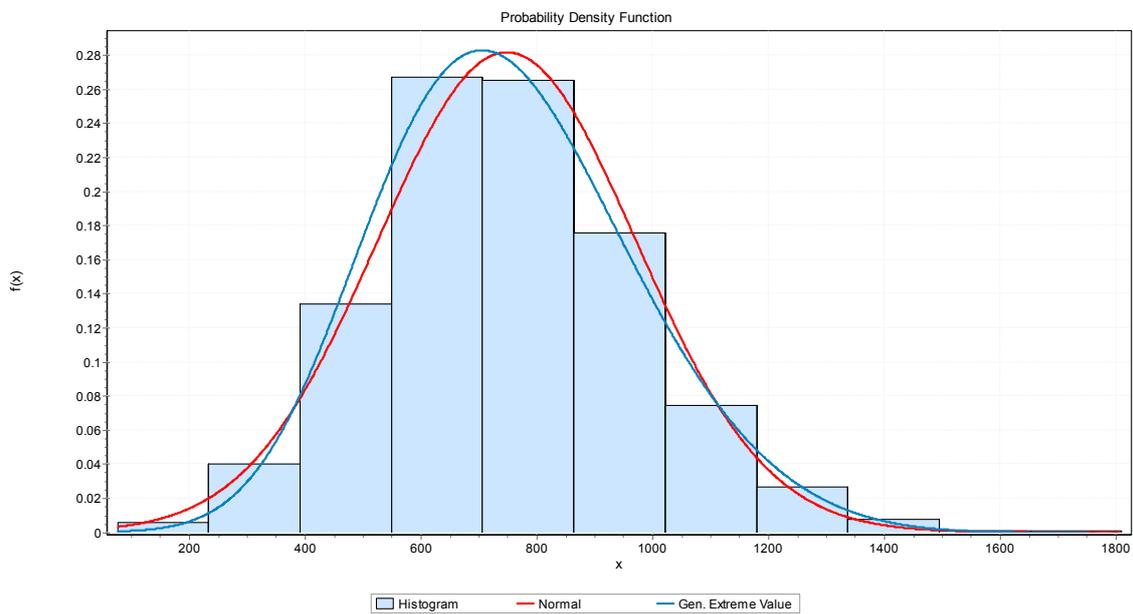


Figura 4.74 – Ajuste de curvas: 6.4.1 – E29.

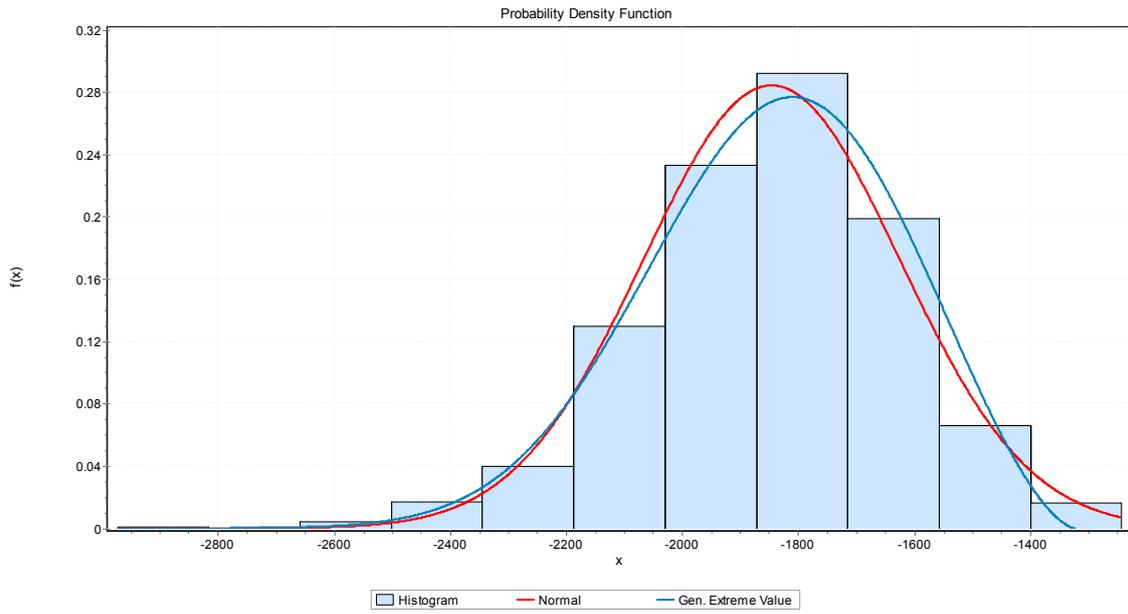


Figura 4.75 – Ajuste de curvas: 6.4.1 – E26.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho constitui na realização de uma análise probabilística do modelo computacional de um módulo do cais do TECON, implementado e solucionado através do método dos elementos finitos com o auxílio do *software* ANSYS a fim de se obter os parâmetros estatísticos e as distribuições de probabilidade dos esforços normais no topo de cada uma das estacas de fundação deste módulo e comparar estes resultados com os resultados apresentados em Ramos (2016). Em um segundo momento, propôs-se alterações no modelo inicial e estes resultados foram também comparados com os obtidos anteriormente.

A análise probabilística foi realizada com base no método de Monte Carlo a cinquenta e duas combinações diferentes de carregamentos possíveis, divididas em seis grupos, cobrindo diversas configurações diferentes para a disposição de equipamentos, navios e direção do vento, principalmente.

Dentre as variáveis de entrada utilizadas no modelo, temos o peso próprio da estrutura, ações de sobrecarga, vento, temperatura e correntes marítimas, além do porte dos navios e peso dos contêineres. As variáveis de saída buscadas são os esforços axiais máximos e mínimos calculados no topo de cada uma das sessenta estacas de fundação do cais.

A metodologia aplicada tem como base o trabalho desenvolvido por Ramos (2016), que consiste em um modelo capaz de simular satisfatoriamente o comportamento da estrutura de acordo com os objetivos propostos, de modo que foi possível obter todos os esforços e parâmetros estatísticos necessários, destacando as piores situações para cada combinação e, posteriormente, as piores combinações de todo o conjunto.

Os esforços axiais máximos observados em cada grupo sempre foram de tração e sempre foram observados os valores mais intensos nas combinações com a ausência da sobrecarga no modelo. A situação que apresentou os maiores valores de tração nas estacas foi a combinação 6.0, que consiste em dois navios amarrados à estrutura em uma situação de ventos extremos, sem sobrecarga. A estaca E29 foi a mais solicitada neste caso, onde o parâmetro $Xk = \mu + 3*\sigma$ atingiu 1654,9 kN. Considerando os esforços máximos, a estaca E29 foi a mais solicitada em 65% das cinquenta e duas combinações.

Com relação aos esforços axiais mínimos, a pior situação também ocorreu com a presença de dois navios amarrados ao cais com a presença de ventos extremos, onde, na combinação 6.2, que conta ainda com um portêiner posicionado no centro da estrutura, o parâmetro $Xk = \mu + 3*\sigma$ chega a -3264,4 kN na estaca E26. Esta estaca é a mais solicitada para os esforços axiais mínimos em 52% das cinquenta e duas combinações.

Ao modificar-se a distribuição de probabilidade da ação de sobrecarga, a análise probabilística foi novamente realizada para os casos onde se observou os maiores valores máximos e mínimos para o parâmetro Xk com a presença da sobrecarga. Observou-se um aumento nos esforços axiais mínimos em todas as situações analisadas e uma diminuição nos esforços axiais máximos em quase todas as combinações. No entanto, em função da presença da sobrecarga, os valores máximos de tração não são maiores que os obtidos no modelo inalterado, nas combinações com ausência da sobrecarga.

Assim, tem-se que o mínimo valor obtido com o modelo alterado foi de -3436,10 kN, valor 5,26% maior que o obtido para a mesma combinação do modelo inalterado e 4,63% maior que o obtido por Ramos (2016).

Ao alterar a distribuição de probabilidade da sobrecarga, observou-se que o Teorema do Limite Central não se verifica principalmente nas estacas mais comprimidas, devido à grande influência da sobrecarga sobre os esforços de compressão, evidenciando a importância desta ação sobre a estrutura, uma vez que este resultado foi contrário ao que foi verificado após a análise dos resultados do modelo inalterado.

Conclui-se, portanto, que o presente trabalho atingiu os seus objetivos, mostrando que ao analisarmos os resultados de cada uma das estacas separadamente, pode-se encontrar resultados mais desfavoráveis em função dos parâmetros estatísticos dos esforços normais de cada uma das mesmas. Observou-se também uma tendência de que as estacas que apresentam os valores médios máximos e mínimos também apresentem os parâmetros Xk mais intensos, tendo ocorrido em 67,3% das combinações para os esforços máximos e em 69,2% das combinações para os esforços mínimos. Além disso, com exceção do Grupo 1, esta reincidência ocorreu em todos os piores casos.

Com relação às alterações propostas à aplicação da sobrecarga, conclui-se que a distribuição adotada reflete melhor o comportamento real do carregamento e que os reflexos desta alteração nos resultados obtidos são significativos. Ainda assim, os valores obtidos aqui condizem com os valores característicos utilizados no dimensionamento destas estacas através do método semiprobabilístico, evidenciando a aplicabilidade desta metodologia a objetivos práticos.

Também conclui-se que os a metodologia e os resultados deste trabalho servem de referência para futuros estudos na área de confiabilidade, que é uma das finalidades da análise probabilística.

Não obstante, entende-se que esta metodologia, proposta primeiramente em Ramos (2016) e melhorada neste trabalho, ainda pode evoluir em vários aspectos. Destaca-se principalmente um melhor entendimento a respeito dos parâmetros estatísticos das variáveis de entrada mais relevantes para os resultados, e.g. sobrecarga e velocidade do vento. Além disso, outras sugestões para trabalhos futuros incluem um maior detalhamento da configuração dos cabos de amarração; a ação do vento

sobre os equipamentos de grande porte; a consideração de outras possibilidades de combinações de carregamento, inclusive considerando a influência de outros módulos adjacentes, bem como a desconsideração de combinações não relevantes e a análise mais detalhada dos outros esforços presentes nas estacas e não abordados neste trabalho, como os momentos fletores, torsores e os esforços cortantes de cada estaca.

REFERÊNCIAS

- ALFREDINI, P. ARASAKI, E. **Engenharia Portuária**. 2ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.
- AMENDOLA, G. G. **Análise do Estaqueamento de um Píer**. Projeto de Graduação em Engenharia Civil. Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2010.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). **ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 129: Mooring of Ships to Piers and Wharves**. ASCE, 2014.
- ANSYS. **Version 16 – User’s Manual**. Houston: Swanson Analysis System Inc., 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ). **Relatório de atividades 2014**. Brasília, 2015.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. 4ed. Rio Grande: Editora Dunas, 2014.
- ARNOLD, T. B.; EMERSON, J. W. **Nonparametric Goodness-of-Fit Tests for Discrete Null Distributions**. The R Journal. v.3/2, p. 34–39, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6120: Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações**. Rio de Janeiro, 1980 (VERSÃO CORRIGIDA: 2000).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6123: Forças Devidas ao Vento em Edificações**. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9782: Ações em Estruturas Portuárias, Marítimas ou Fluviais – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1987. (NORMA CANCELADA EM 04/05/2015).
- BAZOVSKY, I. **Reliability Theory and Practice**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1961.
- BECK, A. T., CORRÊA, M. R. S. **New Design Chart for Basic Wind Speeds in Brazil**. Latin American Journal of Solids and Structures. v. 10, p. 707 – 723, 2013.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTE (BSI). **BS 6349: Maritime Structures**. London, 2000.
- BROLSMA, J. U., HIRS, J. A., LANGEVELD, J. M. On Fender Design and Berthing Velocities. **24th International Navigation Congress**. PIANC, Leningrad, s. II-4, p. 87 – 100, 1977.
- CH2MHILL. **Anchorage Port Modernization Project – 15 Percent Concept Plans**. Anchorage, 2014.

- CHANDRASEKARAN S. **Advanced Marine Structures**. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- CIVIL ENGINEERING OFFICE. **Port Works Design Manual – Part 2: Guide to Design of Piers and Dolphins**. Hong Kong, 2004.
- COMIN, C., 2015. **Estruturas Portuárias – Distribuição de Esforços na Infraestrutura Devidos à Amarração e Atracação de Embarcações**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará.
- COMMITTEE FOR WATERFRONT STRUCTURES HARBOURS AND WATERWAYS (EAU). **Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways**. 8ed. Berlin: Ernst & Sohn, 2004.
- COSTA, F. V. **The Berthing Ship, the Effect of Impact on the Design on Fenders and Other Structures**. The Dock and Harbor Authority, 1964.
- DAVISSON, M. T., ROBINSON, K. E. **Bending and Buckling of Partially Embedded Piles**. Proceedings of the 6th International conference in Soil Mechanics and Foundation Engineering. v. 2, p. 243 – 246, 1965.
- FANTI, F. D., 2007. **Concepção, Métodos construtivos e Dimensionamento de Terminais para Contêineres**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).
- FENDER TEAM. **Manual para Projeto de Defesa**. Fenderteam, 2014. Disponível em <www.fenderteam.com>
- FENTEK MARINE FENDERING SYSTEMS. **Super Cone Fenders Catalogue**. Fentek, 2016. Disponível em <www.rigmarine.com>
- GAYTHWAITE, J. W. **Design of Marine Facilities for the Berthing, Mooring and Repair of Vessels**. Reston, Virginia, ASCE Press, 2014.
- GRINSTEAD, C. M., SNELL, J. L. **Introduction to Probability**. American Mathematical Society, 2006.
- JÚNIOR, W. J. A., 2006. **Projeto de Pier de um Terminal de Contêineres – Estudo de Caso**. Projeto de Graduação em Engenharia Civil. Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).
- KAVITHA, P. E., NARAYANAN, K. P., SUDHEER, C. B. Software Development for the Analysis and Design of Ship Berthing Structures. **Proceedings of International Conference on Advances in Civil Engineering, 2010**. P. 17 – 22, 2010.
- MARTHA, L. F. **Análise de Estruturas: Conceitos e Métodos Básicos**. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2010.
- MASON, J. **Obras Portuárias**. Rio de Janeiro: Campus, 1982.

- MEISEL, F. **Seaside Operations Planning in Container Terminals**. Halle: Physica-Verlag, 2009.
- MULLER, G., ALBERTINI, G. **A Probabilistic Approach to Design Civil Engineering Structures**. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne – EPFL, 2015.
- NOWAK, A. S., COLLINS, K.R. **Reliability of structures**. USA: The McGraw-Hill Companies, 2000.
- OIL COMPANIES INTERNATIONAL MARINE FORUM (OCIMF). **Estimating The Environmental Loads On Anchoring Systems**. 2000.
- OIL COMPANIES INTERNATIONAL MARINE FORUM (OCIMF). **Mooring Equipment Guidelines**. 2ed, 1997.
- PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF NAVIGATION CONGRESSES (PIANC). **Guidelines for the Design of Fenders**. 2002.
- PINHEIRO, L. C. L., 2013. **Análise Probabilística de Estruturas Portuárias Reforçadas com Compósitos de Fibras de Carbono**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande.
- PORT OF LONG BEACH (POLB). **Port of Long Beach Wharf Design Criteria**. Long Beach, 2012.
- PUERTOS DEL ESTADO. **Recomendaciones para Obras Maritimas (ROM) 0.2 – 90, Actions in the Design of Maritime and Harbour Works**. Madrid, 1994.
- Ramos, A. P., 2016. **Análise Probabilística dos Esforços nas Fundações de um Cais de Contêineres**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande.
- RANKINE, B. **Berthing Velocities and Brotsma's Curves**. 2ed. London, 2010.
- RAYCHAUDHURI, S. Introduction to Monte Carlo Simulation. **Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference**. P. 91 – 100, 2008.
- REDDY, M. J. K., 2015. **Reliability Based Analysis of Berthing Structure Subjected to Variable Crane Load**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Estrutural e Gerenciamento de Desastres Naturais, GITAM Institute of Technology, GITAM University.
- RIBEIRO, B. Z., Ramos, A. P., LIMA, J. P. S. REAL, M. V., Estudo Comparativo dos Esforços Semiprobabilísticos e Probabilísticos das Reações nas Estacas de Dolfins de Amarração e Atracação. **Anais do VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**. P. 322 – 331, 2016.
- SECRETARIA DE ENERGIA, MINAS E COMUNICAÇÕES DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (SEMC/RS). **Atlas eólico: Rio Grande do Sul** / elaborado por Odilon A. Camargo. Porto Alegre: SEMC, 2002.

- SHIBATAFENDERTEAM. **Design Manual**. 2015. Disponível em <<http://shibata-fender.team/en/>>
- SØRENSEN, J. D. **Structural Reliability Theory and Risk Analysis**. Institute of Building Technology and Structural Engineering. Aalborg, 2004.
- THORESEN, C. A. **Port's Design Handbook**. 3ed. London: ICE Publishing, 2014.
- TERMINAL DE CONTÊINERES DO PORTO DO RIO GRANDE (TECON Rio Grande). **Memorial de Cálculo e Projeto da Obra de Ampliação do Terminal**
- TOMLINSON, J. **History and Impact of the Intermodal Container**. Pratt Institute, 2009.
- TSINKER, G. P. **Port Engineering – Planning, Construction, Maintenance and Security**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- UEDA, S. Study in Berthing Ship. **The Dock and Harbor Authority**. v. 45, nos. 523, 524 e 525. 1964
- VERSTEEGT, G., 2013. **Berthing Loads in Structural Design**. Validation of Partial Factors. Dissertação de Mestrado, Delft University Technology.
- 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, Universidade Federal do Rio Grande.
- WALPOLE, R. E., MYERS, R. H., MYERS, S. L., YE, K. **Probability & Statistics for Engineers & Scientists**. 8ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2007.
- ZIENKIEWICZ, O. C., TAYLOR, R. L. **The Finite Element Method**. 5ed. England: McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, 2000.

APÊNDICE A – DETALHAMENTO DAS COMBINAÇÕES DE CARREGAMENTO.

Três pranchas em anexo.