

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**OCEÂNICA**

**ANÁLISE DOS ESFORÇOS EM ESTACAS DE UM CAIS DE**  
**CONTÊINERES DE PARAMENTO ABERTO**

**CARLOS HENRIQUE HERNANDORENA VIEGAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real

Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Marcos de Lima Alves

Rio Grande, Agosto de 2015.



Dedico este trabalho a meus pais e irmãos,  
pelo incentivo e apoio incondicional na minha  
formação profissional.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente, a instituição Universidade Federal do Rio Grande, pela participação direta na minha formação profissional, onde tenho a honra de ter sido graduando, mestrando e docente. Da mesma forma, agradeço a CAPES, pela bolsa concedida, que possibilitou a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real, pela orientação, pela amizade e compreensão, e por acreditar no potencial do trabalho desenvolvido. E também ao colega Prof. Me. Márcio Wrague Moura, pela amizade e compartilhamento de seus conhecimentos do tema, de grande contribuição na realização da dissertação.

Ao grande amigo Eng. Ricardo Zimmermann da Cunha, pelo incentivo e aconselhamento técnico-profissional, mas principalmente pela amizade e confiança depositada em mim no cumprimento desta etapa da minha vida.

Ao grande amigo e primo Rogério di Aquino Vargas, que ao longo da minha vida tem sido um irmão para todos os momentos.

Aos meus irmãos, Hermes Eduardo Hernandorena Viegas e Ana Karen Hernandorena Viegas, pelo incentivo, compreensão e por serem grandes amigos na caminhada de nossas vidas. E também as minhas afilhadas Bethânia Viegas Gonçalves e Sophia Harrison Viegas, por terem sido a alegria da minha vida desde que chegaram ao mundo.

A minha namorada e companheira Melissa Petterle Rocha, pela paciência nos dias e noites de trabalho, em que foi fundamental parceira e incentivadora na realização desta jornada, e por estar a me dar o maior presente da minha vida, meu filho Otávio Rocha Viegas, que está para nascer.

E finalmente, agrago principalmente a meus pais. A meu pai Eng. Prof. Dr. João Soares Viegas filho, pessoa fundamental no meu desenvolvimento como ser-humano e profissional. Por ser meu maior exemplo de respeito pelas pessoas, honestidade, dedicação ao trabalho e responsabilidade na vida, e também por ser um grande amigo. E a minha mãe, Maria Ambrozina Hernandorena Viegas, por ser minha maior incentivadora, ser um exemplo de mãe, e principalmente de vó, ensinando de forma exemplar a forma amorosa de amizade e de como cuidar das pessoas que precisam.



## RESUMO

O transporte marítimo e fluvial e seus portos sempre desempenharam e continuam a desempenhar um papel fundamental na relação entre os povos e no desenvolvimento da economia mundial. O Brasil, com 8,5 mil km de costas, tem 95% do seu comércio exterior utilizando o transporte marítimo, com uma movimentação de 700 milhões de toneladas de mercadorias por ano.. E, isso, com uma importante parte com o uso dos contêineres, que trabalham dentro de um sistema unitizado e otimizado de cargas. Desta forma, navios e portos têm sido adaptados em suas estruturas físicas e mecânicas para tornar cada vez mais eficiente o uso desse sistema. Assim, as estruturas de acostagem dos portos necessitam cada vez mais de instrumentos de análise que permitam, não apenas realizar o dimensionamento de suas estruturas, mas, principalmente, compreender o comportamento dos esforços a que estão submetidas. O objetivo deste trabalho foi, portanto, determinar o comportamento das fundações em estacas em um cais de contêineres de paramento aberto constituído por uma laje apoiada sobre estacas, levando em conta diferentes combinações de ações, destacando aquelas que conduzem às situações mais desfavoráveis. Para tanto, foi utilizado o método dos elementos finitos e o software ANSYS. Para o estudo de caso foi adotado um modelo extraído e adaptado a partir de um dos módulos da ampliação do cais do TECON-RS, localizado no porto de Rio Grande. Para as ações foram consideradas, além das triviais, tais como peso próprio e sobrecargas de serviço, aquelas devidas aos equipamentos específicos utilizados nesse cais e aquelas decorrentes de fatores ambientais, tais como vento e correntes. Destas ações resultaram 227 combinações de esforços dentre as quais foram selecionadas as 12 mais importantes consideradas principais. Os resultados obtidos permitiram determinar a variação dos esforços nas estacas em função das diferentes combinações, demonstrando a importância das estacas inclinadas na absorção dos esforços transversais decorrentes das ações do vento e das correntes, bem como do movimentos dos navios, quer através das amarras como também das defensas. Outro aspecto considerado importante foi a constatação da desatualização das normas brasileiras sobre o assunto e, mesmo, a pouca literatura técnico-científica sobre o tema.

Palavras chaves – Estrutura Portuária, Método dos Elementos Finitos, ANSYS, Cais de Contêineres, Esforços em Estacas.

## **ABSTRACT**

The sea and fluvial waterway and its ports have always played and continue to play a key role in the relationship between people and the development of the world economy. Brazil, with 8500 km of coasts, has 95% of its foreign trade using maritime transport, with a turnover of 700 million tons of goods a year .. And so, with a large part with the use of containers, working within a unitized and optimized system loads. Thus, ships and ports have been adapted to its physical and mechanical structures to make increasingly efficient use of this system. Thus, the docking port structures increasingly need analysis tools that allow not only carry out the design of its structures, but mainly to understand the behavior of the internal forces and moments to which they are subjected. The objective of this study was therefore determine the behavior of foundations in pile of a quay open berth structures that consists of a slab supported on piles, taking into account different combinations of actions, highlighting those that lead to the most unfavorable situations. For this, we used the finite element method and ANSYS software. For the case study it adopted a model extracted and adapted from one of the modules of the expansion of TECON-RS wharf, located in the port of Rio Grande. For the actions and loads were considered, apart from the trivial, such as own weight and service overloads, those due to specific equipment used on that pier and those resulting from environmental factors such as wind and currents. These actions resulted in 227 combinations of efforts among them 12 most important considered key selected. The results obtained allowed to determine the variation of efforts in piles depending on the different combinations, demonstrating the importance of raking piles absorption of transversal forces arising from wind actions and currents as well as the movements of ships, either through bonds as well fenders. Another aspect considered important was the finding of the outdated content of the Brazilian standards on the subject and even a little technical and scientific literature on the subject.

Key-words: Port structure, Finite Element Method, ANSYS, Container terminal, Efforts in Stakes

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	24
1.1	A ESCOLHA DO TEMA.....	24
1.2	OBJETIVOS.....	25
1.2.1	Objetivo Geral .....	25
1.2.2	Objetivos Específicos.....	25
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	26
2	PORTOS, CARGAS E NAVIOS.....	27
2.1	O PORTO E SEUS CONCEITOS.....	27
2.1.1	As Obras de Acostagem .....	27
2.1.2	Terminais e Cais de Containers.....	28
2.1.3	O Contêiner .....	30
2.1.4	Navios Porta Contêineres .....	32
2.1.5	Equipamentos de Movimentação de Cargas .....	34
2.2	ESTRUTURAS DE CAIS .....	39
2.2.1	Tipos de Estruturas de Cais.....	39
3	AÇÕES EM ESTRUTURAS DE CAIS E SUAS COMBINAÇÕES.....	41
3.1	PESO PRÓPRIO.....	42
3.2	PAVIMENTAÇÃO .....	42
3.3	EMPUXO DE TERRA DECORRENTE DO USO DE PAREDE VERTICAL .....	42
3.4	SOBRECARGA .....	44
3.5	AÇÕES DECORRENTES DE EQUIPAMENTOS .....	45
3.6	AMARRAÇÃO .....	48
3.6.1	Arranjo de Amarração:.....	50
3.6.2	Forças Devidas ao Vento e às Correntes.....	51
3.6.3	Forças Devidas ao Vento.....	52

3.6.4	Velocidade Característica do Vento .....	53
3.6.5	Forças Devidas as Correntes .....	54
3.7	ATRACAÇÃO .....	56
3.7.1	Defensas .....	56
3.7.2	Diagrama Reação x Deformação.....	58
3.7.3	Energia de Atracação .....	59
3.7.4	Energia de Atracação pela NBR 9782 (1987) .....	69
3.7.5	Combinações de Ações em Cais de Containers .....	73
3.8	COMBINAÇÕES .....	73
3.8.1	Coefficientes de Ponderação .....	74
4	METODOLOGIA E VERIFICAÇÃO do modelo .....	76
4.1	METODOLOGIA DE MODELAGEM .....	76
4.2	VERIFICAÇÃO DO MODELO .....	77
4.2.1	O Método dos Elementos Finitos e o ANSYS .....	77
4.3	MODELO TRIDIMENSIONAL UTILIZANDO MEF(ANSYS) .....	78
4.3.1	Comprimento de Engastamento .....	79
4.4	DESENVOLVIMENTO DA VERIFICAÇÃO DO MODELO .....	82
4.4.1	Pórtico Plano Carregado Sobre Área de influência.....	82
4.4.2	Método de Nökkenteved .....	84
4.4.3	Modelo Tridimensional Utilizando o Método de Grelhas e Pórticos(TQS) .....	87
4.4.4	Malhas e Convergência .....	88
4.4.5	Resultados da Verificação .....	88
4.4.5.4	Modelo Tridimensional Utilizando o Método de Grelha e Pórtico(TQS) .....	92
4.5	CONCLUSÕES DA VERIFICAÇÃO .....	96
4.6	OBSERVAÇÃO SOBRE O MODELO .....	97
5	ESTUDO DE CASO – O TECON DE RIO GRANDE – RS .....	99
5.1	O TECON-RS.....	99

5.2	AÇÕES CONSIDERADAS NA ESTRUTURAS DO CAIS.....	102
5.2.1	Peso próprio: .....	102
5.2.2	Pavimentação: .....	102
5.2.3	Sobrecarga:.....	103
5.2.4	Equipamentos .....	103
5.2.5	Portêiner .....	104
5.2.6	Mobile Harbour Crane .....	106
5.2.7	Amarração: .....	111
5.2.8	Atracação.....	117
5.3	VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DA ESTRUTURA .....	122
5.3.1	Coeficientes de Ponderação .....	122
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	124
6.1	OBSERVAÇÕES SOBRE A APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	127
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	157
7.1	CONCLUSÕES .....	157
7.2	RECOMENDAÇÕES.....	158
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	160
	ANEXOS.....	163
	ANEXO A – COMBINAÇÕES DE CARGA.....	163
	ANEXO B – REAÇÕES DAS ESTACAS PARA 12 COMBINAÇÕES .....	168

# LISTA DE SÍMBOLOS

## LETRAS GREGAS

$A$	Ângulo de atracação (linha do centro do navio à linha de atracação)
$\gamma$	Ângulo vetor de velocidade (Manual da Fender Team)
$\gamma$	Peso específico (Mason, 1987)
$\gamma_a$	Peso específico da água
$\gamma_g$	Coeficiente de ponderação das ações permanentes
$\gamma_q$	Coeficiente de ponderação das ações variáveis
$\gamma_\epsilon$	Coeficiente de ponderação das ações de feitos de temperatura
$\eta_h$	Coeficiente de reação horizontal do solo
$P$	Massa específica
$\rho_{sw}$	Massa específica da água do mar
$\psi_0$	Fator de ponderação

## LETRAS MAIÚSCULAS

A	Área exposta do obstáculo, normalmente à direção da força
A <sub>C</sub>	Área exposta do obstáculo, normalmente à direção da corrente
A <sub>L</sub>	Área velica para vento na direção longitudinal
A <sub>T</sub>	Área velica para vento na direção transversal
A <sub>V</sub>	Área exposta do obstáculo, normalmente à direção do vento
B	Boca do navio
C	Folga ao cais
Ca	Coeficiente de amortecimento
C <sub>B</sub>	Coeficiente de bloco do navio
C <sub>C</sub>	Coeficiente de configuração do cais
C <sub>E</sub>	Coeficiente de excentricidade
C <sub>m</sub>	Coeficiente de massa virtual
C <sub>R</sub>	Coeficiente de rigidez
D	Calado do navio
D <sub>L</sub>	Calado do navio
D <sub>mín</sub>	Calado do navio em lastro
E <sub>A</sub>	Energia de atracação
E <sub>C</sub>	Energia característica nominal
E <sub>P</sub>	Módulo de elasticidade do material da estaca
F	Força global exercida por um fluído (vento ou corrente)
F <sub>G</sub>	Valor característico das ações permanentes
F <sub>C</sub>	Força devia a corrente
F <sub>E</sub>	Valores característicos dos efeitos diferidos e da variação de temperatura
F <sub>Q1,K</sub>	Valor característico da ação variáveis considerada como principal
F <sub>Qi,K</sub>	Valores característicos das demais ações variáveis
FS	Fator de segurança
F <sub>V</sub>	Força devida ao vento
F <sub>X</sub>	Força de reação de apoio na direção x
F <sub>Y</sub>	Força de reação de apoio na direção y
F <sub>Z</sub>	Força de reação de apoio na direção z
H	Distância livre sob a calha do navio

H	Força horizontal do cais aplicada no centro elástico
I	Momento de inércia da seção transversal da estaca
K	Raio de giração do navio
K <sub>C</sub>	Folga sob a quilha do navio
L	Comprimento entre perpendiculares do navio
L <sub>BP</sub>	Comprimento entre perpendiculares
L <sub>e</sub>	Comprimento rigidamente engastado da estaca
	Comprimento somado ao livre da estaca, pra determinar o comprimento rigidamente engastado
L <sub>s</sub>	engastado
L <sub>u</sub>	Comprimento livre da estaca
M	Momento produzido pelas forças V e H
M <sub>1</sub>	Massa deslocada pelo navio
M <sub>2</sub>	Massa de água adicional
M <sub>D</sub>	Deslocamento do navio
M <sub>x</sub>	Momento de reação de apoio na direção x
M <sub>y</sub>	Momento de reação de apoio na direção y
M <sub>z</sub>	Momento de reação de apoio na direção z
N <sub>i</sub>	Força normal absorvida pela estaca
P	Altura total do navio
R	Distância do ponto de impacto ao centro de massa do navio
RB	Curva da proa
S	Espaçamento entre defensas
S <sub>1</sub>	Fator topográfico
S <sub>2</sub>	Fator de rugosidade do terreno
S <sub>3</sub>	Fator estatístico
V	Força vertical do cais aplicada no centro elástico
V <sub>0</sub>	Velocidade básica do vento
V <sub>A</sub>	Velocidade de aproximação do navio medida perpendicularmente a linha de atracação
V <sub>k</sub>	Velocidade característica do vento
W	Peso do navio



## LETRAS MINÚSCULAS

g	Aceleração da gravidade
h	Altura da defesa comprimida
k	Coeficiente de forma
k <sub>C</sub>	Coeficiente de forma para força de corrente
k <sub>CL</sub>	Coeficiente de forma para força de corrente no sentido longitudinal
k <sub>CT</sub>	Coeficiente de forma para força de corrente no sentido transversal
k <sub>V</sub>	Coeficiente de forma para força de vento
l	Distância entre o ponto de contato do navio com a defesa e o centro de gravidade do navio, medida paralelamente a linha de atracação
r	raio de giro do navio
v	Velocidade

## LISTA DE ABREVIATURAS

MEF	Método dos Elementos Finitos
MHC	<i>Móbile Harbour Crane</i>
TEU	<i>Twenty-foot Equivalent Unit</i>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características dos contêineres.....	31
Tabela 3.1 – Peso específico dos materiais.....	42
Tabela 3.2 – Tabela com sobrecargas mínimas para projeto de estruturas marítimas ou fluviais.....	45
Tabela 3.3 – Valores aproximados do coeficiente de forma.....	55
Tabela 3.4 – Velocidades de aproximação do navio segundo NBR9782 (1987).....	71
Tabela 3.5 - Coeficientes de atrito com aço.....	72
Tabela 3.6 - Coeficientes de ponderação das ações permanentes ( $\gamma_g$ ).....	74
Tabela 3.7 - Coeficientes de ponderação das de efeitos de recalque de apoio, retração de materiais, variação de temperatura e deformações diferidas ( $\gamma_e$ ).....	75
Tabela 3.8 - Coeficientes de ponderação das ações variáveis ( $\gamma_q$ ).....	75
Tabela 4.1 - Valores para reação horizontal do solo.....	81
Tabela 4.2 – Resultados dos esforços normais nas estacas obtidos do pela equação 1 e pelo método de Nökkenteved.....	91
Tabela 4.3 – Força normal nas estacas pelo método de Nökkenteved.....	91
Tabela 5.1 – Características do Guindaste Portêiner Post-Panamáx.....	106
Tabela 5.2 – Áreas velicas para navio em lastro e carregado, na direção longitudinal e transversal.....	114
Tabela 5.3 - Dados de áreas velicas para navios porta contêineres.....	114
Tabela 5.4 – Determinação da força do vento nas embarcações.....	115
Tabela 5.5 – Determinação das forças das correntes nos navios.....	116
Tabela 5.6 – Forças de amarração no cais.....	117
Tabela 5.7 – Resultados da energia de atracação utilizando o método da PIANC.....	117
Tabela 5.8 – Resultado para afastamento mínimo entre defensas.....	118
Tabela 5.9 – Características geométricas da defesa Super Cone cilíndrica.....	119
Tabela 5.10 – Características mecânicas da defesa Super Cone cilíndrica.....	120
Tabela 5.11 – Resultado da energia de atracação utilizando o método da NBR 9782 (1987).....	122
Tabela 6.1 – Resultados máximos e mínimos para as 12 principais combinações.....	124
Tabela 6.2 – Esforços apresentados nas estacas que apresentam máximos e mínimos do projeto.....	125

Tabela A.1 – Combinações de cargas.....	163
Tabela B.1 – Reações referentes a combinação 53.....	168
Tabela B.2 – Reações referentes a combinação 91.....	169
Tabela B.3 – Reações referentes a combinação 37.....	171
Tabela B.4 – Reações referentes a combinação 84.....	172
Tabela B.5 – Reações referentes a combinação 177.....	174
Tabela B.6 – Reações referentes a combinação 79.....	175
Tabela B.7 – Reações referentes a combinação 16.....	177
Tabela B.8 – Reações referentes a combinação 92.....	178
Tabela B.9 – Reações referentes a combinação 117.....	180
Tabela B.10 – Reações referentes a combinação 82.....	181
Tabela B.11 – Reações referentes a combinação 102.....	183
Tabela B.12 – Reações referentes a combinação 76.....	184

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Terminal de contêineres de Suap, em Pernambuco.....	28
Figura 2.2 – Terminal de contêineres de Rio Grande, no Rio Grande do Sul.....	30
Figura 2.3 – Dimensões dos contêineres.....	31
Figura 2.4 – Pilha de contêineres.....	32
Figura 2.5 – Navio Panamáx atravessando o canal do Panamá.....	33
Figura 2.6 - Evolução dos navios porta-contêineres.....	34
Figura 2.7 – Guindastes Porteiner descarregando navio.....	35
Figura 2.8 – Guindastes MHC patolados no cais.....	36
Figura 2.9 – Organização da pilhagem de contêineres em um navio Post-Panamáx.....	37
Figura 2.10 – Guindaste Transtêiner carregando caminhões.....	37
Figura 2.11 – Guindastes Transtêineres.....	38
Figura 2.12 – Guindaste do tipo Reach Stacker.....	38
Figura 2.13 – Empilhadeira Fork Lift.....	39
Figura 3.1 – Estrutura de cais composta por estaca prancha.....	43
Figura 3.2 – Estrutura de cais composta por estaca prancha.....	44
Figura 3.3 – Estrutura de cais composta por estaca prancha e plataforma de alívio.....	44
Figura 3.4 – Guindaste Porteiner.....	46
Figura 3.5 – Guindaste Porteiner.....	47
Figura 3.6 – Representação do guindaste MHC patolado.....	48
Figura 3.7 – Representação da curva de esforço gerada pela lança do guindaste.....	48
Figura 3.8 – Movimentos do navio.....	50
Figura 3.9 – Arranjo de amarração do navio ao cais.....	51
Figura 3.10 – a) área velica para vento da direção transversal; b) área velica para vento da direção longitudinal c) direção de incidência do vento.....	51
Figura 3.11 – a) área para esforço de corrente da direção transversal; b) área para esforço de corrente da direção longitudinal.....	54
Figura 3.12 – Defensas marítimas.....	56
Figura 3.13 Colisão de navio com cais.....	56
Figura 3.14 Colisão de navio com cais.....	57

Figura 3.15 Gráfico de reação x deformação.....	59
Figura 3.16 Dimensões da embarcação.....	60
Figura 3.17 Especificação das dimensões.....	61
Figura 3.18 Coeficiente de massa virtual.....	62
Figura 3.19 Coeficiente de bloco.....	63
Figura 3.20 Atracação lateral.....	64
Figura 3.21 Atracação lateral.....	65
Figura 3.22 Estrutura com paramento fechado.....	66
Figura 3.23 Estrutura parcialmente fechada.....	66
Figura 3.24 Estrutura de paramento aberto.....	67
Figura 3.25 Curvas de Brosla.....	68
Figura 3.26 Fatores de segurança.....	69
Figura 4.1 Modelo tridimensional desenvolvido no software ANSYS.....	79
Figura 4.2 Perfil do solo onde localiza-se o Tecon-RS.....	80
Figura 4.3 Elemento Beam189.....	81
Figura 4.4 Elemento Shell93.....	82
Figura 4.5. Planta baixa demarcando as faixas de áreas de influência utilizada para construção dos pórticos no software Ftool.....	83
Figura 4.6. Modelo de pórtico no Ftool para uma faixa contendo estacas inclinadas.....	84
Figura 4.7 Modelo de pórtico no Ftool para uma faixa contendo apenas estacas verticais.....	84
Figura 4.8. Plata baixa demarcando a faixa de área de influência utilizada para construção do pórtico no Ftool para o método de Nökkenteved.....	86
Figura 4.9. Modelo de pórtico desenvolvido no Ftool para o método de Nökkenteved	86
Figura 4.10: Modelo tridimensional desenvolvido no software TQS.....	87
Figura 4.11: Modelos tridimensionais, TQS e ANSYS.....	88
Figura 4.12. Gráfico Fz x Estacas que demonstra a convergência das malhas sobre carga vertical.....	89
Figura 4.13. Gráfico reação Fz x Estacas, comparando resultados entre modelo de pórtico plano e tridimensional por MEF para trecho contendo estacas inclinadas.....	89

Figura 4.14 Gráfico reação $F_x$ x Estacas, comparando resultados entre modelo de pórtico plano e tridimensional por MEF para trecho contendo estacas inclinadas.....	90
Figura 4.15. Gráfico reação $F_z$ x Estacas, comparando resultados entre modelo de pórtico plano e tridimensional por MEF para trecho contendo apenas estacas verticais.....	90
Figura 4.16. Gráfico reação $F_z$ x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga vertical.....	92
Figura 4.17. Gráfico reação $F_x$ x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga vertical.....	93
Figura 4.18. Gráfico reação $F_y$ x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga vertical.....	93
Figura 4.19. Gráfico reação $M_x$ x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga vertical.....	94
Figura 4.20. Gráfico reação $M_y$ x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga vertical.....	94
Figura 4.21. Gráfico reação $M_z$ x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga vertical.....	95
Figura 4.22. Gráfico reação $F_z$ x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga horizontal.....	95
Figura 4.23. Gráfico reação $F_x$ x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga horizontal.....	96
Figura 4.24. Gráfico reação $F_y$ x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga horizontal.....	96
Figura 4.25 – Seção transversal da laje executada no Tecon e seção transversal da laje utilizada no modelo do trabalho.....	97
Figura 4.26 – Vigas transversais adicionadas ao modelo tridimensional.....	98
Figura 5.1 – Localização do TECON-RS.....	100
Figura 5.2 Tecon-RS.....	100
Figura 5.3 – Localização do TECON-RS.....	101
Figura 5.4. Foto de um dos berços de ampliação do TECON-RS.....	101

Figura 5.5 – Módulo 5 do Tecon-RS. Fonte: Memória do projeto estrutural do Tecon-RS.....	102
Figura 5.6 – Detalhe com tipo de pavimentação executada no Tecon-RS.....	103
Figura 5.7 – Guindastes Porteiner do cais do Tecon-RS.....	104
Figura 5.8 Carregamento do guindaste porteiner aplicado ao modelo.....	104
Figura 5.9 – Posição dos carregamentos do guindaste Porteiner aplicados ao modelo..	105
Figura 5.10 – Situação de maior carregamento do MHC considerando 4 apoios.....	106
Figura 5.11 – Geometria do Guindaste MHC.....	107
Figura 5.12 – Carregamento gerado pela lança do guindaste.....	108
Figura 5.13 – Situação de maior carregamento do MHC considerando 3 apoios.....	109
Figura 5.14 – A figura demonstra as 12 posições de carga para as patolas do MHC.....	109
Figura 5.15 – Movimentação de navios no cais do Tecon-RS.....	110
Figura 5.16 – Características de um navio porta-contêiner panamáx atracado no cais do Tecon-RS.....	110
Figura 5.17 – Características de um navio porta-contêiner panamáx atracado no cais do Tecon-RS.....	111
Figura 5.18 – Isopletas da velocidade básica do vento.....	112
Figura 5.19 – Estimativa de amarração de um navio do tipo Panamáx no cais do Tecon-RS.....	116
Figura 5.20 – Características geométricas da defesa Super Cone cilíndrica.....	118
Figura 5.21– Gráfico de reação x deformação para a defesa cilíndrica Super Cone.....	121
Figura 6.1 – Sistema coordenadas global do modelo.....	125
Figura 6.2 - Demonstração de que a carga vertical sempre será oposta a carga transversal quando decompostas a posição de esforço cortante das estacas inclinadas.....	126
Figura 6.3 – Cargas utilizadas na combinação 53.....	128
Figura 6.4 - Reações de Fx para combinação 53.....	128
Figura 6.5 – Reações Fx das estacas de 1 a 13 para combinação 53.....	129
Figura 6.6 – Reações Fx para estacas de 14 a 30 para combinação 53.....	129
Figura 6.7 – Reações Fx para estacas de 31 a 47 para combinação 53.....	129
Figura 6.8 – Reações Fx para estacas de 48 a 60 para combinação 53.....	129
Figura 6.9 – Cargas utilizadas na combinação 91.....	130
Figura 6.10 Reações de Fx para combinação 91.....	131



Figura 6.11 – Reações Fx para estacas de 1 a 13 para combinação 91.....	131
Figura 6.12 – Reações Fx para estacas de 14 a 30 para combinação 91.....	131
Figura 6.13 – Reações Fx para estacas de 31 a 47 para combinação 91.....	132
Figura 6.14 – Reações Fx para estacas de 48 a 60 para combinação 91.....	132
Figura 6.15 – Cargas utilizadas na combinação 37.....	133
Figura 6.16 – Reações de Fy para combinação 37.....	133
Figura 6.17 – Reações Fy para estacas de 1 a 13 para combinação 37.....	133
Figura 6.18 – Reações Fy para estacas de 14 a 30 para combinação 37.....	133
Figura 6.19 – Reações Fy para estacas de 31 a 47 para combinação 37.....	134
Figura 6.20 – Reações Fy para estacas de 48 a 60 para combinação 37.....	134
Figura 6.21 – Cargas utilizadas na combinação 84.....	135
Figura 6.22 – Reações de Fy para combinação 84.....	136
Figura 6.23 – Reações Fy para estacas de 1 a 13 para combinação 84.....	136
Figura 6.24 – Reações Fy para estacas de 14 a 30 para combinação 84.....	137
Figura 6.25 – Reações Fy para estacas de 31 a 47 para combinação 84.....	137
Figura 6.26 – Reações Fy para estacas de 48 a 60 para combinação 84.....	137
Figura 6.27 – Cargas utilizadas na combinação 177.....	138
Figura 6.28 – Reações de Fz para combinação 177.....	138
Figura 6.29 – Reações Fz para estacas de 1 a 13 para combinação 177.....	139
Figura 6.30 – Reações Fz para estacas de 14 a 31 para combinação 177.....	139
Figura 6.31 – Reações Fz para estacas de 31 a 47 para combinação 177.....	139
Figura 6.32 – Reações Fz para estacas de 48 a 60 para combinação 177.....	139
Figura 6.33 – Cargas utilizadas na combinação 79.....	140
Figura 6.34 – Reações de Fz para combinação 79.....	141
Figura 6.35 – Reações Fz para estacas de 1 a 13 para combinação 79.....	141
Figura 6.36 – Reações Fz para estacas de 14 a 30 para combinação 79.....	141
Figura 6.37 – Reações Fz para estacas de 32 a 47 para combinação 79.....	142
Figura 6.38 – Reações Fz para estacas de 48 a 60 para combinação 79.....	142
Figura 6.39 – Cargas utilizadas na combinação 16.....	143
Figura 6.40 – Reações de Mx para combinação 16.....	144
Figura 6.41 – Reações Mx para estacas de 1 a 13 para combinação 16.....	144
Figura 6.42 – Reações Mx para estacas de 14 a 30 para combinação 16.....	144
Figura 6.43 – Reações Mx para estacas de 31 a 47 para combinação 16.....	145

Figura 6.44 – Reações Mx para estacas de 48 a 60 para combinação 16.....	145
Figura 6.45 – Cargas utilizadas na combinação 92.....	145
Figura 6.46 – Reações de Mx para combinação 92.....	146
Figura 6.47 – Reações Mx para estacas de 1 a 13 para combinação 92.....	146
Figura 6.48 – Reações Mx para estacas de 14 a 30 para combinação 92.....	146
Figura 6.49 – Reações Mx para estacas de 31 a 47 para combinação 92.....	147
Figura 6.50 – Reações Mx para estacas de 48 a 60 para combinação 92.....	147
Figura 6.51 – Cargas utilizadas na combinação 117.....	147
Figura 6.52 – Reações de My para combinação 117.....	148
Figura 6.53 – Reações My para estacas de 1 a 13 para combinação 117.....	148
Figura 6.54 – Reações Mx para estacas de 14 a 30 para combinação 117.....	148
Figura 6.55 – Reações Mx para estacas de 32 a 47 para combinação 117.....	149
Figura 6.56 – Reações Mx para estacas de 48 a 60 para combinação 117.....	149
Figura 6.57 – Cargas utilizadas na combinação 82.....	149
Figura 6.58 – Reações de My para combinação 82.....	150
Figura 6.59 – Reações My para estacas de 1 a 13 para combinação 82.....	150
Figura 6.60 – Reações My para estacas de 14 a 60 para combinação 30.....	150
Figura 6.61 – Reações My para estacas de 31 a 47 para combinação 82.....	151
Figura 6.62 – Reações My para estacas de 48 a 60 para combinação 82.....	151
Figura 6.63 – Cargas utilizadas na combinação 102.....	151
Figura 6.64 – Reações de Mz para combinação 102.....	152
Figura 6.65 – Reações Mz para estacas de 1 a 13 para combinação 102.....	152
Figura 6.66 – Reações Mz para estacas de 14 a 30 para combinação 102.....	152
Figura 6.67 – Reações Mz para estacas de 31 a 47 para combinação 102.....	153
Figura 6.68 – Reações Mz para estacas de 48 a 60 para combinação 102.....	153
Figura 6.69 – Cargas utilizadas na combinação 76.....	153
Figura 6.70 – Reações de Mz para combinação 76.....	154
Figura 6.71 – Reações Mz para estacas de 1 a 13 para combinação 76.....	154
Figura 6.72 – Reações Mz para estacas de 14 a 30 para combinação 76.....	154
Figura 6.73 – Reações Mz para estacas de 31 a 47 para combinação 76.....	155
Figura 6.74 – Reações Mz para estacas de 48 a 60 para combinação 76.....	155
Figura 6.75 – Gráfico apresentando Esforço Normal x Momento Fletor das estacas de maior esforço das 12 combinações analisadas.....	156

Figura 6.76 – Gráfico apresentando Momento torçor x Esforço cortante das estacas de maior esforço das 12 combinações analisadas.....	156
--	-----

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 A ESCOLHA DO TEMA

O Brasil foi colonizado e tornado independente através do Oceano Atlântico que abrange os 7.408 km da costa leste brasileira. Considerando os recortes litorâneos são mais 8.500 km de linha costeira. Ainda existe o rio Amazonas com o registro de maior do mundo em vazão de água com 6.678 km de extensão e profundidade mínima maior de 5 m. É um rio importante já que navios oceânicos de considerável porte podem navegar e acessar portos internos do Peru. A maior laguna do mundo também é brasileira, sendo esta a Lagoa dos Patos situada no extremo sul do país com 265 km de comprimento e 10.000 km<sup>2</sup> de área de superfície interligando as cidades de Rio Grande e Porto Alegre. Também no extremo sul, situa-se a Lagoa Mirim que se estende do Brasil ao Uruguai com em uma dimensão de 4.000 km<sup>2</sup> (REDE GLOBO, 2007; REDE GLOBO, 2011; AZAMBUJA, 2005; ACHE TUDO NA REGIÃO, 2012).

Já do ponto de vista econômico, a abertura dos portos brasileiros para o comércio internacional deu-se em 1808 e hoje, 95% do comércio exterior brasileiro vem do transporte marítimo, e também, 80% do petróleo extraído usa o mesmo meio. No Brasil, são 700 milhões de toneladas de mercadorias transportadas por ano. De acordo com a SEP (Secretaria de Portos do Paraná), hoje o país dispõe de 34 portos públicos, 42 terminais privados e 3 complexos portuários que operam sob concessão à iniciativa privada. (SEP/PR, 2012; MEC, 2005).

Os contêineres começaram a ser utilizados de forma generalizada pelos portos brasileiros em 1975 e, com isso, surgiu a necessidade da ampliação dos cais de portos brasileiros. Com o avanço da tecnologia os navios também cresceram. O agora utilizado, pós-panamax, tem capacidade para mais de 6.000 TEU's. O TEU é a sigla para "*Twenty Foot Equivalent*", referente ao comprimento do contêiner em pés.

A região sul do estado do Rio Grande do Sul, principalmente a cidade de Rio Grande, obteve um substancial desenvolvimento através da área naval. O investimento é notável com oito cascos de navios-plataformas da Petrobrás construídos próximo à costa da cidade, destinados à exploração de petróleo com capacidade para transporte de gás e óleo. Desta forma, entende-se que a navegação é de suma importância para a economia brasileira e de Rio Grande.

Geralmente, o que se apresenta em termos de carga de um projeto estrutural, portuário ou não, são as cargas máximas e mínimas calculadas pelo projetista, determinadas em diversas combinações de esforços e modelos matemáticos. Porém, essas cargas não elucidam como se dá a distribuição de esforços através da estrutura para um conjunto de carregamentos. Além do mais, a grande maioria das informações teóricas sobre o tema são estrangeiras. A própria norma de ações em estruturas portuárias, marítimas ou fluviais, NBR9782 é datada de 1987 e tanto as estruturas portuárias como os navios vêm evoluindo de forma constante, o que faz com que a norma fique defasada, obrigando os projetistas a se embasarem e se apoiarem em bibliografias de fora do país. Estes problemas criaram a motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral do trabalho foi determinar o comportamento das fundações em estacas em um cais de contêineres de paramento aberto constituído por uma laje apoiada sobre estacas, levando em conta diferentes combinações de ações, destacando aquelas que conduzem às situações mais desfavoráveis.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- a) Estudar os tipos de estruturas de acostagem usuais, seus equipamentos e dinâmica de operação com o propósito de determinar as ações por eles introduzidas na estrutura;
- b) Estudar os diferentes tipos de fatores ambientais resultantes do vento e das correntes marítimas e/ou fluviais, determinando as ações introduzidas por eles na estrutura.
- c) Estudar os diferentes tipos de navios porta-contêineres, com suas características geométricas, de navegação, atracação, amarração, e suas interações com os fatores ambientais capazes de introduzir esforços nas estruturas de acostagem;
- d) Desenvolver um modelo representativo de um cais de contêineres, de paramento aberto, constituído de uma laje plana apoiada sobre estacas verticais e inclinadas, tendo por base um

dos módulos do TECON-RS, submetido a diferentes ações e combinações, utilizando o método dos elementos finitos e o software ANSYS;

e) Analisar os resultados obtidos com o uso do modelo, identificando as principais combinações e a distribuição de esforços resultantes nas estacas.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

O texto está organizado em oito capítulos e dois anexos dentre os quais se encontra este como introdução dividindo-se na justificativa da escolha do tema, nos objetivos gerais e específicos do trabalho e nesta descrição da organização visando facilitar ao leitor a compreensão do desenrolar do mesmo.

Os capítulos dois e três constituem a revisão bibliográfica na qual o trabalho está fundamentado. O primeiro deles, o capítulo dois, trata do conceito de porto, das obras de acostagem, dos contêineres e dos terminais, navios e equipamentos destinados ao seu manuseio. Além disso, apresenta os tipos de estruturas de cais. O capítulo três, por sua vez, aborda as ações em estruturas de cais e suas combinações, com um destaque para aquelas aplicadas a cais de contêineres.

A metodologia aplicada à pesquisa e o estudo de caso são objeto dos capítulos quatro e cinco. No capítulo quatro, além da metodologia de modelagem e do modelo utilizado, baseado no Método dos Elementos Finitos com utilização do ANSYS, é apresentada uma verificação utilizada com o propósito de examinar a consistência da estratégia de modelagem adotada. O capítulo cinco trata do estudo de caso, baseado em uma adaptação de um dos módulos do cais do TECON-RS, envolvendo as ações pertinentes ao mesmo, do navio tipo considerado e da verificação e segurança da estrutura.

Os capítulos seis e sete discorrem sobre os resultados e discussão dos mesmos e sobre as conclusões e recomendações decorrentes do trabalho com um todo. Finalmente, o capítulo oito apresenta a lista referências bibliográficas nas quais o estudo se alicerçou.

Seguem-se dois anexos: o Anexo A apresentando as combinações de carga consideradas e o Anexo B as reações das estacas para as doze combinações estudadas.

## **2 PORTOS, CARGAS E NAVIOS**

### **2.1 O PORTO E SEUS CONCEITOS**

Segundo Alfredini e Arasaki (2014), um porto deve atender aos requisitos de abrigo, profundidade e acessibilidade, área de retroporto e fator de impacto ambiental. O abrigo tem como a finalidade deixar o porto protegido dos fatores ambientais como ventos, ondas e correntes de forma que os navios possam atracar e fazer a movimentação de carga com o mínimo de esforço, evitando riscos à obra, navios e pessoas. A profundidade e acessibilidade são função da maior embarcação projetada para entrar no canal, chamada de embarcação-tipo, que deve ter espaço suficiente para entrar e manobrar dentro do canal de acesso, bacias portuárias e bacia de acostagem. A área de retroporto é destinada à movimentação e armazenagem de carregamentos. Os acessos terrestres, aquaviários e aeroviários, desde transporte ferroviário e rodoviário por terra até hidroviários por mares, rios e lagoas, como também aeroviários, são importantes para dar eficiência logística ao sistema portuário. Sobre o fator de impacto ambiental, já que toda a ação da construção de um porto gera um desequilíbrio ambiental, atualmente é obrigatório o estudo preliminar do impacto ambiental para que se disponha a licença da construção. Deve-se estudar detalhadamente estes fatores para que se justifique a implantação de um porto.

Os portos ainda podem ser divididos em naturais ou artificiais, sendo os naturais os portos que as próprias condições de localização não exigem substanciais obras de melhoramento para que o porto se mantenha em funcionamento, enquanto os artificiais são o oposto, em que as obras de acostagem são constituídas de obras de melhoramento de abrigo e acesso das embarcações.

#### **2.1.1 As Obras de Acostagem**

As obras são conhecidas por serem de estruturas maciças, para resistirem aos elevados esforços estruturais do tipo:

- a) Cargas horizontais decorrentes do impacto das embarcações e amarrações de navios;

- b) Cargas verticais decorrentes da existência de equipamentos de movimentação de cargas;
- c) Efeitos de empuxo de terra.

Por estas razões, deve-se ter um estudo detalhado do local a ser implantada a obra como características topobatimétricas, condições do solo, empuxos de terra, capacidade de carga na fundação, análise de possíveis recalques, métodos e custos de dragagem, o que é fundamental para que o porto permaneça em constante funcionamento, escavações e estaqueamento, níveis do mar e agitação ondulatória, condições climáticas, entre outras (ALFREDINI E ARASAKI, 2014).

### 2.1.2 Terminais e Cais de Containers

Um terminal de contêiner é formado geralmente de cais e retroárea, específico para movimentação de uma carga um tipo de carga, o contêiner, onde:

Retroárea ou pátio de contêineres: é o local onde destina-se a estocagem de contêineres em preparação para carga e descarga (Figura 2.1);

Cais: remete-se a plataforma em que se recebe os navios e faz-se a carga e descarga das mercadorias (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Terminal de contêineres de Suap, em Pernambuco. Fonte:

<http://exame.abril.com.br/blogs/primeiro-lugar/2014/08/29/usina-salgado-coloca-terrenos-a-venda/>



Em alguns casos, cais e retroárea podem estar diretamente interligados, os dois em terra, ou os dois em mar. No caso do TECON-RS, por exemplo, o pátio de contêineres localiza-se em terra e o cais em mar (Figura 2.2). Em outras situações, o cais pode ser localizado em alto mar, visando muitas vezes ter a capacidade de receber navios de maior calado, ou seja, que precisam de canais com grandes profundidades para navegar.

O conceito de um terminal é mais complexo do que parece, vai desde o conhecimento ambiental marítimo da costa, como a instalação terrestre, incluindo todo o transporte do cais para o mar, como do cais para terra. Vários outros aspectos são importantes para um terminal, como a localização do porto, que deve ser em uma área com recursos disponíveis para satisfazer o nível exigido de produtividade de forma a alcançar o equilíbrio das operações portuárias.

O terminal de contêineres é destinado a carga e descarga específica do contêiner, portanto estabelece situações bem definidas na hora de definir as importâncias da implantação de uma estrutura como esta.

Para localização, o porto deve ter um planejamento que abranja aproveitamento de recursos locais, de forma a gerar mais produção com menor custo. Deve possuir área para porto suficiente, bacia de evolução e profundidade da água, de forma a ter os principais navios porta-contêineres atracando e desatracando eficientemente no porto, além de possibilidade de expansão do cais. Thoresen (2014) salienta que portos antigos estão localizados próximos de zonas urbanas, o que dificulta a expansão da área de armazenamento de cargas. Também estabelece que um terminal de contêineres deve ter possibilidade de funcionamento 24 h por dia, 7 dias por semana. Para este trabalho, usou-se um dos módulos do TECON-RS como base de análise e uma descrição melhor sobre a importância do porto está apresentado no estudo de caso.



Figura 2.2 – Terminal de contêineres de Rio Grande, no Rio Grande do Sul. Fonte: [http://www.guiamaritimo.com/gm\\_wp/noticias/tecon-rio-grande-tem-crescimento-de-61-nas-movimentacoes-em-2014/](http://www.guiamaritimo.com/gm_wp/noticias/tecon-rio-grande-tem-crescimento-de-61-nas-movimentacoes-em-2014/)

### 2.1.3 O Contêiner

Para melhor entender o que é um terminal e cais de contêineres, se torna essencial descrever o conceito de contêiner. Portanto, o contêiner é uma caixa de aço, alumínio ou fibra destinado ao transporte de mercadorias. Os contêineres têm seus tamanhos padronizados e as unidades de medida são no sistema inglês *feet e inches*, ou pés e polegadas. A forma usual e unitária desta quantidade de medida é o TEU, ou *Twenty Foot Equivalent Unit*, como já descrito anteriormente, tratando a caixa transportadora como unidade de transporte. Ou seja, quando o contêiner tiver 20 pés, terá 1 TEU, quando tiver 40 pés, 2 TEUs e assim por diante. (AMPLA CONTAINERS, 2015).

Essa medida refere-se ao seu comprimento e equivale a 6,10 m. Todas as medidas estabelecidas são referentes às partes externas das caixas em que tanto a altura como o comprimento podem ser variáveis, porém a largura, é a mesma para qualquer tipo como demonstram a Figura 2.3 e a Tabela 2.1. Atualmente existem diversos tipos de contêineres,

inclusive específicos para determinados tipos de cargas como as que necessitam ser transportadas com controle de temperatura (ALFREDINI E ARASAKI, 2014).

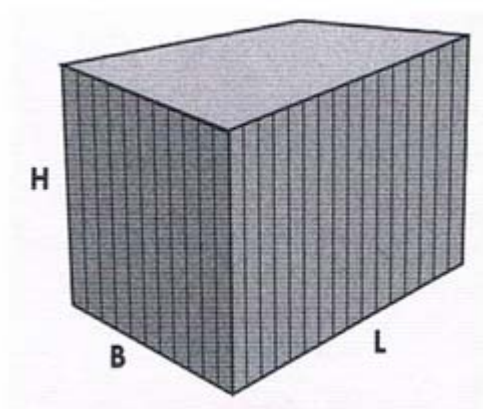


Figura 2.3 – Dimensões dos contêineres. Fonte: Alfredini e Arasaki, 2014.

Tabela 2.1 – Características dos contêineres. Fonte: Aldredini e Arasaki, 2014.

<b>Comprimento (pés)</b>	<b>Material</b>	<b>L (m)</b>	<b>B (m)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Peso do contêiner (t)</b>	<b>Peso de carga máxima (t)</b>	<b>Peso total máximo (t)</b>	<b>Volume interno (m<sup>3</sup>)</b>
40	Alumínio	12,19	2,44	2,44	2,8	27,7	30,5	63,3
40	Alumínio	12,19	2,44	2,59	3,4	27,1	30,5	67,0
40	Alumínio	12,19	2,44	2,89	3,9	26,6	30,5	75,0
40	Aço	12,19	2,44	2,44	3,4	27,1	30,5	63,0
40	Aço	12,19	2,44	2,59	3,6	26,9	30,5	33,0
20	Alumínio	6,06	2,44	2,59	1,9	18,4	20,3	31,0
20	Aço	6,06	2,44	2,44	2,0	18,3	20,3	33,0
20	Aço	6,06	2,44	2,59	2,2	18,1	20,3	33,0

O contêiner é um dos mais significativos desenvolvimentos dos últimos 40 anos, segundo Tsinker (2004). A quantidade de mercadorias embarcadas em contêineres aumentou cerca de 7% ao ano no mundo. Esse número se remete ao dobro do crescimento da economia mundial se tratando de comércio global.

A unitização dos contêineres racionaliza a movimentação de cargas nos dias atuais. Uma vez que padronizadas as dimensões e locais de armazenamentos, ganha-se com a movimentação mecânica (Figura 2.4).



Figura 2.4 – Pilha de contêineres. Fonte: Thoresen (2004)

#### 2.1.4 Navios Porta Contêineres

A maior parte dos navios que transportam contêineres são capazes de cruzar o canal do Panamá. O primeiro navio porta-contêineres foi desenvolvido em 1956 pela *Sea-Land Service*. Desde essa época até os dias de hoje os navios vem mudando totalmente e ainda estão em transformação. O navio Panamáx (Figura 2.5), que é o navio porta-contêineres de maior dimensão a poder atravessar o canal do Panamá, atualmente tem 32,3 m de largura, comprimento de 294,10 m de comprimento e calado de 12,00 m. O que faz com que a maioria dos portos dos EUA tenham calado de aproximadamente 12,50 m, porém, em 2015 o canal passará por modificações, e as novas dimensões de navio que poderão atravessar o canal serão de 50 m de largura, 385 m de comprimento e 15,3 m de calado. A Figura 2.6 é retirada do livro *Port Designers Handbook* (THORESEN, 2014) e mostra a evolução dos navios ao longo do tempo. Thoresen especifica os navios da seguinte forma:

### **Navios Panamáx**

- (A) Primeira geração, com uma capacidade aproximada de 1.000 TEU;
- (B) Segunda geração, com capacidade de aproximadamente 1.600 TEU;
- (C) Terceira geração, com capacidade de até cerca de 3.000 TEU;

### **Navios Pós-Panamáx**

- (A) Quarta geração, com capacidade de até cerca de 4.250 TEU
- (B) Quinta geração, com capacidade de até cerca de 5.000 TEU
- (C) Sexta geração, com capacidade de até cerca de 6.000 TEU

### **Navios Pós-Panamáx (PPP)**

- (A) Sétima geração, com uma capacidade de mais de 7.000 TEU.

### **New Panamáx, Post New Panamáx e Triple E (navios porta contêineres ultra-grandes)**

- (A) Esses navios possuem uma capacidade a partir de 12.500 TEU e dimensões mínimas de 360 m de comprimento, 50 m de boca e 14,5 m de calado.



Figura 2.5 – Navio Panamáx atravessando o canal do Panamá. Fonte: <http://maritime-connector.com/wiki/panamax/>

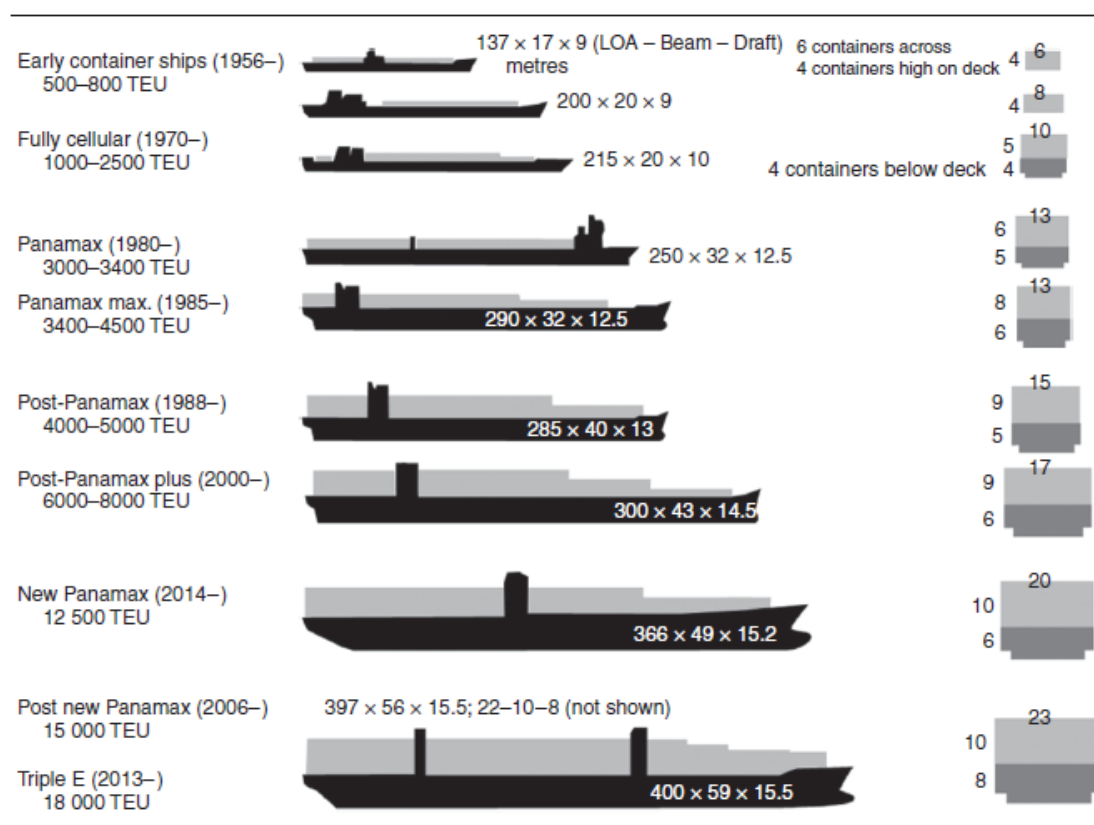


Figura 2.6 Evolução dos navios porta-contêineres. Fonte: Thoresen, 2014

### 2.1.5 Equipamentos de Movimentação de Cargas

Os equipamentos de movimentação de contêineres dividem-se entre os que movimentam carga navio-cais e os que movimentam cais-retroárea. O fato de o contêiner ser utilizado de forma unitizada e com dimensões padronizadas, faz com que se possa automatizar grande parte da movimentação neste tipo de cais. Este fator minimiza os custos e aumenta a produtividade do sistema.

Diversos tipos de equipamentos são usados atualmente para a movimentação de contêineres dos navios para o cais ou vice-versa. Geralmente a carga e descarga é feita através de guindastes com lança, como o Portâiner (Figura 2.7) ou o MHC (*Mobile Harbour Crane*) (Figura 2.8). Já a transferência da carga para a retroárea pode ser feita por grandes empilhadeiras, guindastes sobre trilhos ou com ponta de lança sobre pneus (THORESEN, 2014).



Os principais tipos de equipamentos de manuseios de contêineres são:

**a) Portêiner**

O Portêiner é um guindaste de grande porte, movimentado sobre trilhos, com o objetivo de carregar ou descarregar os navios com os contêineres. O guindaste é apresentado de diversos modelos, dependendo do tipo de navio a ser descarregado. Segundo o catálogo da empresa suíça Liebherr (2012), este guindaste pode ter de 15 m a 35 m de distância de vão entre seus apoios extremos com sua lança podendo variar de 30 m a 70 m de balanço na direção do navio dependendo do tipo de guindaste.



Figura 2.7 – Guindastes Portêiner descarregando navio. Fonte: Liebherr (2012)

**b) MHC (*Mobile Harbour Crane*)**

O MHC é um guindaste também de grande porte como o Portêiner, porém com mais mobilidade, uma vez que se locomove pelo cais sobre pneus. Este modelo de equipamento quando em serviço de carga ou descarga é patolado sobre o cais, gerando elevadas pressões na região da patola. Este fator deve ser analisado com cuidado uma vez que a patola corre o risco

de ser apoiada em uma posição onde o tabuleiro do cais não está dimensionado de acordo com a carga a ser absorvida.

A Figura 2.9 demonstra que como as caixas de contêineres são padronizadas. A pilhagem de contêineres garante uma automatização do sistema carga e descarga.



Figura 2.8 – Guindastes MHC patolados no cais. Fonte: Liebherr (2012)



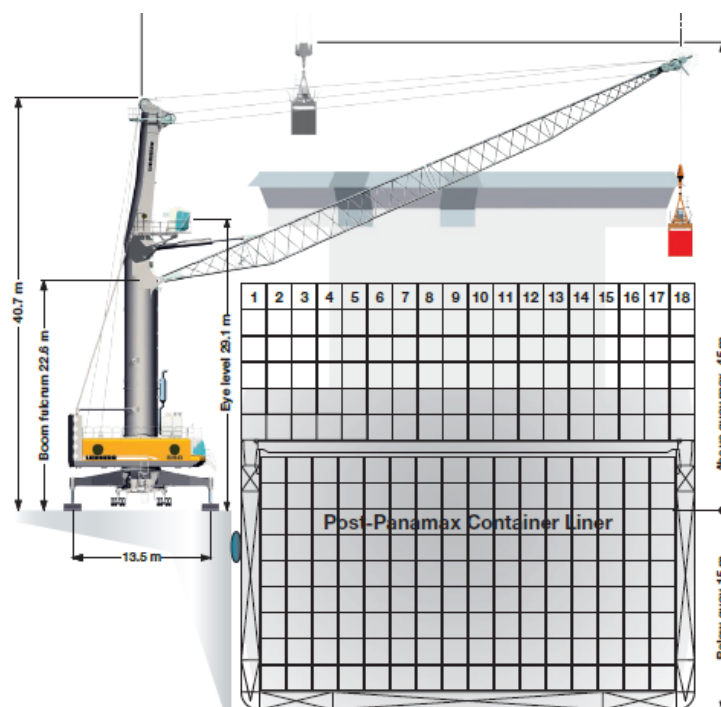


Figura 2.9 – Organização da pilha de contêineres em um navio Post-Panamáx. Fonte: Liebherr (2012).

### c) Transtêiner

Transtêiner é um guindaste do tipo empilhadeira automatizada que pode se mover sobre pneus ou trilhos e serve para movimentação e organização das pilhas de contêineres no pátio de armazenagem de cargas (Figuras 2.10 e 2.11). Este tipo de equipamento poder organizar até 12 pilhas de contêineres sendo de suma importância a sua existência no pátio de contêineres.



Figura 2.10 – Guindaste Transtêiner carregando caminhões. Fonte: Teréx (2010)



Figura 2.11 – Guinsdastes Transtêineres. Fonte: Teréx (2010)

***d) Reach Stacker***

Da mesma forma que o Transteiner, o *Reach Stacker* (Figura 2.12) também é um guindaste do tipo empilhadeira responsável por organizar as pilhagens de contêineres além de movimentar as cargas entre cais e retroárea. Porém, o Reach Stacker necessita de operação humana, ou seja, não é um guindaste robô como o Transtêiner. O equipamento pode organizar até 6 pilhas de contêineres e segundo os catálogos da empresa Terex (2010), tem entre suas vantagens a excelente mobilidade e velocidade de deslocamento, além de ser fácil de operar.



Figura 2.12 – Guindaste do tipo Reach Stacker Fonte: Teréx (2010)

### ***e) Fork Lift***

A empilhadeira de garfos *Fork Lift* (Figura 2.13) é utilizada de forma a dar mais mobilidade no movimento de cargas do pátio de contêineres. Entre as vantagens deste equipamento, destaca-se grande capacidade de carga, alto desempenho de movimentação, fácil operação e movimentação segura (TERÉX, 2010).



Figura 2.13 – Empilhadeira Fork Lift. Fonte: Teréx (2010)

## **2.2 ESTRUTURAS DE CAIS**

### **2.2.1 Tipos de Estruturas de Cais**

Uma das subdivisões de classificação quanto ao tipo de estrutura de cais, pode ser basicamente diferenciada pela existência ou não de uma cortina vertical de proteção na frente do cais. A existência ou não deste elemento de proteção subdivide as obras de acostagem em estruturas de paramento aberto ou fechado.

Segundo Fanti (2007), a ausência de uma parede vertical na frente do cais é o que determina o paramento aberto. Logicamente, a existência desta parede vertical é chamada de paramento fechado.

Geralmente as estruturas de paramento aberto são caracterizadas por serem executadas de placa apoiadas sobre estacas, já as de paramento fechado são conhecidas por serem estruturas de gravidade ou protegidas por uma cortina de estacas prancha. Esta diferença não é simplesmente estética, uma vez que com a presença de um paramento em um cais, as cargas de

atracação elevam-se sobre a defesa do porto e a reflexão desta energia também é aumentada sobre o casco do navio.

#### **a) Cais de Gravidade**

Os cais de gravidade caracterizam-se pela absorção dos esforços através do seu maciço, como uma muralha de blocos, caixões de concreto ou elementos celulares. Porém, são considerados antieconômicos apesar de serem caracterizados de longa duração e fácil execução. O solo também deve ter boa resistência em função do peso.

#### **b) Cais em Cortina de Estacas-Prancha**

São caracterizados por cais de paramento fechado e constituído de estruturas leves, geralmente utilizados quando na presença de um solo de pouca resistência. Segundo Alfredini e Arasaki (2014), uma das vantagens deste tipo de estrutura é o fato de ela ser flexível e ter capacidade de absorver esforços gerados por eventuais acomodações da estrutura

#### **c) Cais de Paramento Aberto**

Este tipo de cais é amplamente utilizado e o princípio estático é a presença de estacas verticais e inclinadas. As estacas verticais são responsáveis por absorver as cargas verticais enquanto as inclinadas são responsáveis por absorver as cargas horizontais.

### **3 AÇÕES EM ESTRUTURAS DE CAIS E SUAS COMBINAÇÕES**

Os elevados esforços atuantes sobre uma estrutura de acostagem, fazem com que essas obras sejam maciças, de forma a resistirem a essas ações (ALFREDINI E ARASAKI, 2014). Segundo Mason (1983), este tipo de obra difere das demais, pelo fato de que são submetidas a elevados esforços horizontais concentrados, como os esforços de amarração e atracação dos navios, assim como grandes esforços concentrados verticais devido aos equipamentos e guindastes. O tipo de ações que devem ser considerados na análise de um cais são:

#### **a) Permanentes:**

- peso próprio;
- pavimentação;
- empuxo de terra.

#### **b) Variáveis:**

- sobrecarga;
- equipamentos;
- amarração;
- atracação;
- temperatura.

Esses esforços não atuam todos em sua maior intensidade e de maneira conjunta sobre a estrutura, de forma a ser necessário analisar para o projeto as diversas combinações de carga, para que cada solicitação seja posta em uma posição capaz de produzir os efeitos mais desfavoráveis para os elementos da estrutura, sem superdimensionar os elementos.

### 3.1 PESO PRÓPRIO

O peso próprio é o peso de toda a estrutura, desde sua fundação até a cobertura. Para o peso específico, a Tabela 3.1, retirada da NBR 9782 (1987) sugere que na falta de determinação experimental, utilizar:

Tabela 3.1. Peso específico dos materiais. Fonte: NBR 9782 (1987)

<b>Materiais</b>	<b><math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>
a) Concreto Simples	24
b) Concreto Armado	25
c) Concreto Ciclópico	22
d) Cantaria	26

### 3.2 PAVIMENTAÇÃO

A carga de pavimentação é o peso de todo piso colocado acima da laje de cobertura do cais, considerando enchimentos e revestimentos.

### 3.3 EMPUXO DE TERRA DECORRENTE DO USO DE PAREDE VERTICAL

É muito usual em estruturas portuárias, a utilização de paredes de contenção, que levam a tratar com empuxo de terras. Para a determinação das ações. Duas das teorias utilizadas são as de Rankine e Brinch Hansen (MASON, 1987).

Como mencionado anteriormente, existem cais com características de paramento fechado, em que uma parede vertical, muitas vezes constituída por uma cortina de estacas, recebe a pressão lateral do solo confinado por trás da estrutura.

Segundo a NBR9782 (1987), o empuxo é a ação proveniente do terrapleno confinado na retaguarda da estrutura portuária. A norma sugere que os terraplenos sejam estudados de acordo com os princípios da Mecânica dos Solos, que os parâmetros do solo para efeitos de

cálculo sejam determinados por ensaios de campo e de laboratório, e que a escolha do método de cálculo deve ficar por atribuição do projetista.

Alfredini e Arasaki (2014) apresentam os esforços básicos transmitidos para este tipo de estrutura nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3, onde  $P$  é a por aspectos operacionais, como movimentações de carga ou pessoas, equipamentos de movimentação de cargas e edificações portuárias,  $I$  é as velocidades de aproximação das embarcações atracando e desatracando,  $B$  os efeitos de ventos, ondas e correntes nas movimentações das atracações,  $G$  o peso atuante,  $E$  as considerações geotécnicas, como os empuxos de terra ativo ( $E_a$ ) e passivo ( $E_p$ ),  $W$  o empuxo hidrostático resultante,  $A$  é a força de ancoragem em tirante e  $P_i$  é a reação do solo na estaca.

Para as Figura 3.1 e 3.2, o esquema representa uma estrutura composta de cortina de estaca prancha e para a Figura 3.3 apresenta uma cortina de estaca prancha com a inserção de uma plataforma de alívio.

Para este trabalho, não foram considerados esforços ocasionados por empuxos de terra, portanto, não serão apresentados de forma detalhada as teorias existentes para a análise dos esforços.

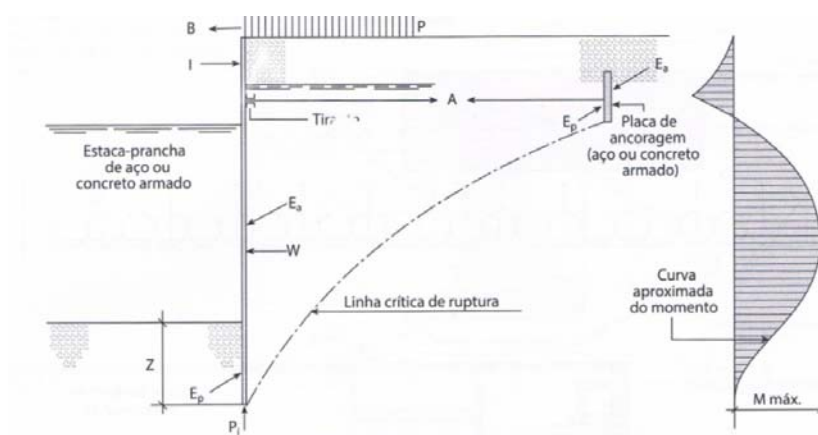


Figura 3.1 – Estrutura de cais composta por estaca prancha Fonte: Alfredini e Arasaki (2014).





determinar os valores desta sobrecarga, deve-se verificar a tipologia de material e utilização da obra, estes valores podem ser determinados pelo cliente ou com base na utilização operacional do porto. Porém, não devem ser inferiores aos valores da Tabela 3.2

Tabela 3.2 – Tabela com sobrecargas mínimas para projeto de estruturas marítimas ou fluviais.

Fonte: NBR 9782 (1987)

<b>Tipo de obra</b>	<b>Sobrecarga (kN/m<sup>2</sup>)</b>
Cais ou pier para carga geral (classe especial)	50
Cais ou pier para carga geral (classe G 32)	40
Cais ou pier para carga geral (classe G 12)	30
Cais ou pier para carga geral (classe G 6)	20
Cais ou pier para containeres ou Ro-Ro	40
Cais ou pier para granéis sólidos	30
Cais ou pier para granéis líquidos	20
Cais ou pier para produtos siderúrgicos	100
Pontes de acesso	10
Passarela	5
Plataformas fixas ou flutuantes sem sobrecarga definida	10
Áreas de estoque de granéis de uso geral	100
Cais ou pier pesqueiro	10
Cais ou pier para passageiros	10
Cais para rebocadores	10

### 3.5 AÇÕES DECORRENTES DE EQUIPAMENTOS

Os equipamentos portuários a serem utilizados devem ser determinados em projeto e diferem em função da utilização do porto. Estes devem ter versatilidade de operação e, por esse motivo, geralmente se opta por diversos tipos de equipamentos. Dentre os equipamentos portuários mais comuns são os guindastes de pórticos, guindastes sobre trilhos e guindastes sobre pneus como já especificados no item 2.1.5 deste trabalho.

As ações decorrentes destes equipamentos são fornecidas pelos fabricantes ou por normas, e se apresentam em forma de truque de algumas rodas e sobrecargas em área. Segundo o Thoresen (2014), não há hoje em dia no mercado, um espectro de tipo de marcas e modelos

de equipamentos que sugiram uma carga específica por tipo de equipamento, podendo ter eixos apresentando 1200 kN de carga. Por este motivo, reforça que devem ser analisados caso a caso.

A NBR 9782 (1987) especifica que se utilize, pelo menos, carregamentos de dois tipos de distintos guindastes na análise estrutural, dispostos na situação a gerar os esforços mais críticos. Deve-se também considerar, se preciso, a possibilidade de futuras ampliações da estrutura.

#### a) Portêiner

A norma britânica *British Standard 6349:2000 Marine Structures*, apresenta dimensões e cargas de alguns equipamentos portuários como o Portêiner (Figuras 3.4 e 3.5). A norma inglesa descreve que a solicitação máxima, em situação normal de uso, estará na situação de lança carregada com a carga voltada para a direção do navio, nas duas pernas localizadas próximas ao mar. Já em situação de tempestade, a carga máxima se apresentará nas rodas de canto. Ainda sugere que esta carga fique entre 4.000 kN e 6.000 kN, dependendo da situação de uso e dimensões e, já que o guindaste pode apresentar truques de 4 e 8 rodas, para um guindaste com capacidade de elevação de 53 toneladas, deve-se utilizar de 500 kN a 750 kN por roda. Agora, analisando pela norma brasileira NBR9782 (1987), a mesma indica que cargas de guindastes específicos para movimentar contêineres, devem ser fornecidas pelos fabricantes. Em uma terceira opinião, Thoresen (2014), sugere que na falta de informação, utilizar pelo menos 700 kN para 1 m<sup>2</sup>.

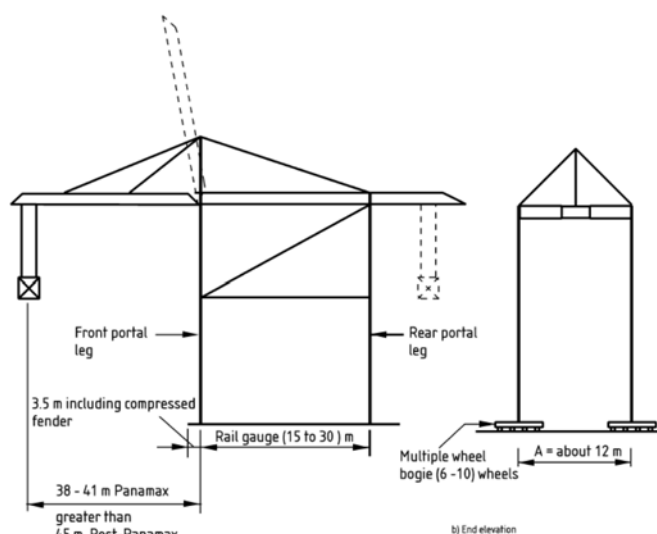


Figura 3.4 – Guindaste Porteiner – Fonte: *British Standard 6349:2000 Marine Structures*

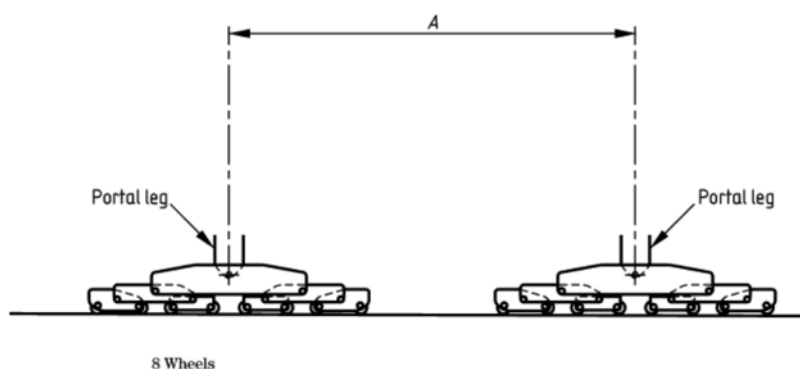


Figura 3.5 – Guindaste Porteiner – Fonte: *British Standard 6349:2000 Marine Structures*

#### ***b) Mobile Harbour Crane***

Apesar do guindaste MHC se deslocar sobre rodas, a pior situação de carga é quando ele encontra-se patolado sobre o cais em serviço e quando sob a ação de cargas ambientais como é o caso do vento, pode transmitir ainda mais esforço para a estrutura (Figura 3.6). Para verificar a carga a ser aplicada ao cais necessita-se consultar o fabricante de forma a saber os momentos e forças gerados pelo guindaste quando colocado em serviço. Os catálogos apresentam curvas (Figura 3.7) cruzando a carga transmitida pelo raio de comprimento utilizado pela lança. Juntando ao peso próprio do equipamento pode-se chegar à carga distribuída na área de cada patola.

A pior situação será com a lança situada a  $45^\circ$ , nesta posição, apenas 2 patolas ficariam responsáveis pela absorção dos momentos gerados pela lança e carga. Ou seja, é na situação de tombamento que se retira a carga máxima.

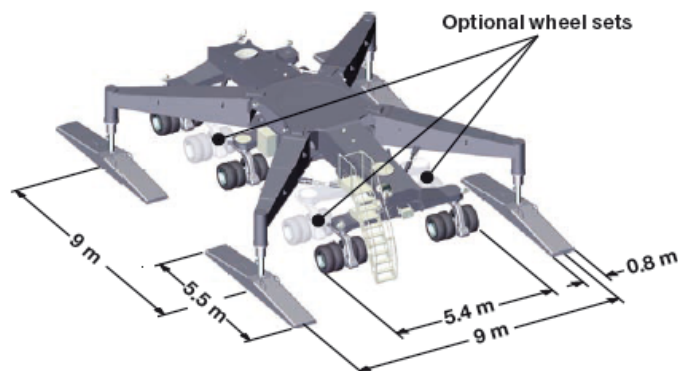


Figura 3.6 – Representação do guindaste MHC patolado. Fonte: Liebherr (2012)

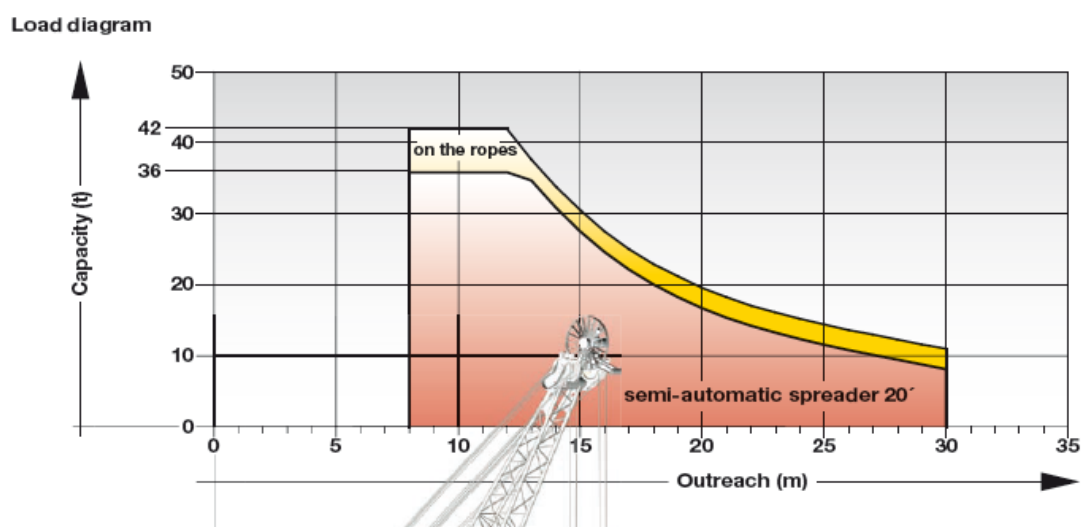


Figura 3.7 – Representação da curva de esforço gerada pela lança do guindaste. Fonte: Liebherr (2012)

### 3.6 AMARRAÇÃO

Segundo a NBR 9782 (1987), as ações decorrentes dos esforços exercidos pelos cabos de amarração das embarcações nos cabeços do cais são exercidas pelas ações dos ventos e das correntes.

Para entender os esforços provenientes da amarração dos navios nos cabeços de amarração do cais (Figura 3.8), primeiramente é necessário conhecer os movimentos gerados pelo navio que são denominados:

**a) Translações:**

- deslocamento ou *surge*

É o movimento do navio em translação segundo eixo x, disposto ao longo do navio;

- abatimento ou *sway*

É o movimento do navio transversal ao eixo x segundo um plano horizontal;

- arfagem ou *heave*

É o movimento do navio segundo o eixo z, vertical.

**b) Rotações:**

- balanço ou *roll*

É o movimento de rotação em torno do eixo x;

- caturro ou *pitch*

É o movimento de rotação em torno do eixo y;

- cabeceio ou *yaw*

É o movimento de rotação em torno do eixo z;

Para Alfredini e Arasaki (2014), os efeitos que conseguem ser efetivamente restringidos pelas amarrações dos navios são o deslocamento, o abatimento e o cabeceio, que acontecem segundo um plano horizontal e o efeito de restrição das linhas de amarração é mais efetivo. Os movimentos representam os seis graus de liberdade do navio.

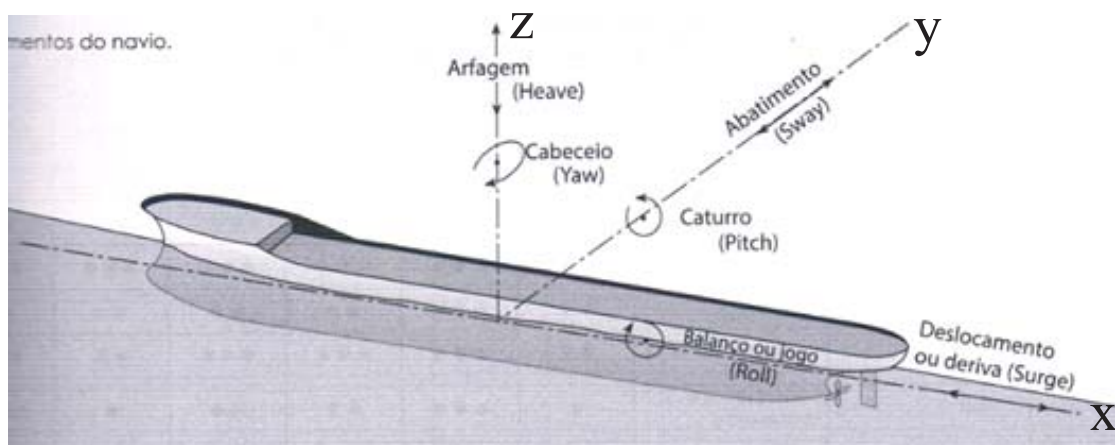


Figura 3.8 – Movimentos do navio. Fonte: Alfradini e Arasaki, (2014)

### 3.6.1 Arranjo de Amarração:

Segundo Mason (1987), os cabos, que tem por finalidade limitar os movimentos do navio junto ao cais, devem ser, por facilidade de análise, estudados em um plano horizontal (Figura 3.9).

Os cabos do tipo 1 são denominados cabos lançantes e tem por objetivo principal resistir aos esforços das correntes. Os do tipo 2, denominados cabos transversais, tem por finalidade resistir às forças transversais de vento. E os do tipo 3, chamados de linhas *spring*, complementam resistindo forças longitudinais e transversais.

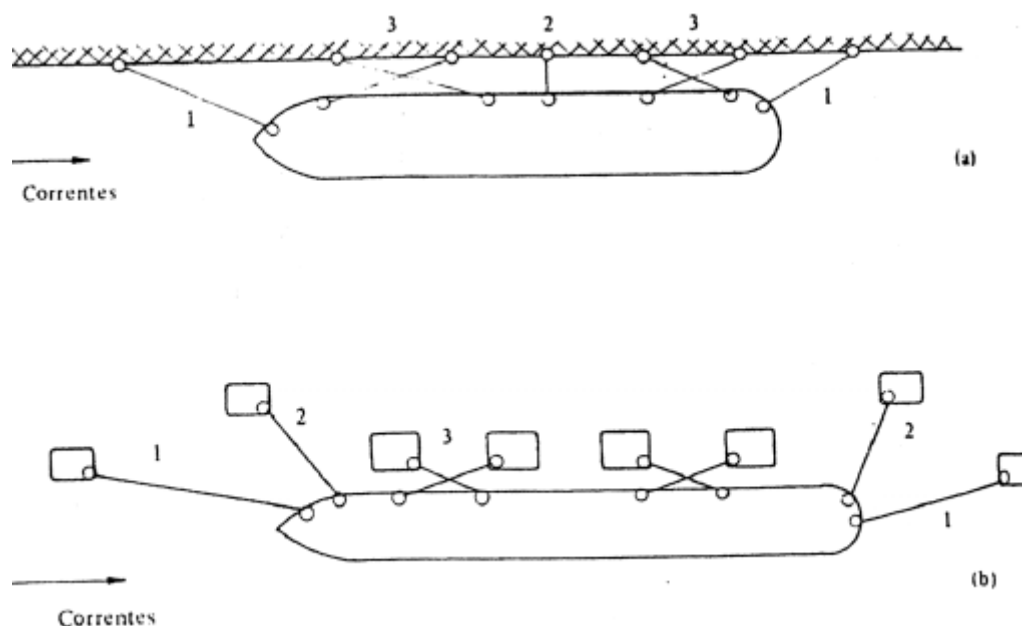


Figura 3.9 – Arranjo de amarração do navio ao cais. Fonte: Mason (1987)

Planejando previamente um sistema de amarração ao navio-tipo utilizado para o cais, basta decompor as forças resultantes dos ventos e das correntes segundo angulação de pior hipótese.

### 3.6.2 Forças Devidas ao Vento e às Correntes

Mason (1987) descreve como obter uma estimativa das forças exercidas pelo vento e correntes sobre os navios atracados. O autor se baseia em conceitos da hidrodinâmica clássica e as equações baseiam-se em critérios estáticos.

A força global exercida por um fluido em movimento sobre um obstáculo é dada pela equação:

$$F = k \frac{1}{2} \rho v^2 A \quad (3.1)$$

onde:

$\rho$  = massa específica;

$v$  = velocidade de escoamento do fluido;

$A$  = área exposta do obstáculo, normal à direção do escoamento;

$k$  = coeficiente de forma.

### 3.6.3 Forças Devidas ao Vento

Para o vento toma-se  $\rho$  pela massa específica do ar e equacionando, teremos:

Massa específica do ar a 15°

$$\rho = 1,225 \frac{kg}{m^3},$$

Desta forma, a força exercida pelo vento nas embarcações resulta em:

$$F_V = \frac{k_V 1,225 v^2 A_V}{2} \quad (3.2)$$

$$F_V = \frac{k_V v^2 A_V}{1,63} \quad (3.3)$$

Sendo  $v$  em m/s e  $A_V$  em  $m^2$ ,  $F_V$  sairia em N, como queremos o resultado em kN,

$$F_V = \frac{k_V v^2 A_V}{1630} \quad (3.4)$$

Simplificando para equação em que a NBR 9782 apresenta,

$$F_V = \frac{k_V v^2 A_V}{1600} \quad (3.5)$$

Mason (1987) especifica que o coeficiente de forma do navio pode ser adotado por 1,2 e que a área a ser utilizada na expressão 3.5 é a área de exposição do navio acima do nível da água. A norma brasileira descreve que o coeficiente de forma pode variar de 0,6 a 1,3, mas que na falta de informações mais detalhadas, pode-se adotar em média o valor de 1,2 concordando com o descrito por Mason.

As verificações devem ser feitas com o navio na completa posição longitudinal, assim como na completa posição transversal, como mostra a Figura 3.10.



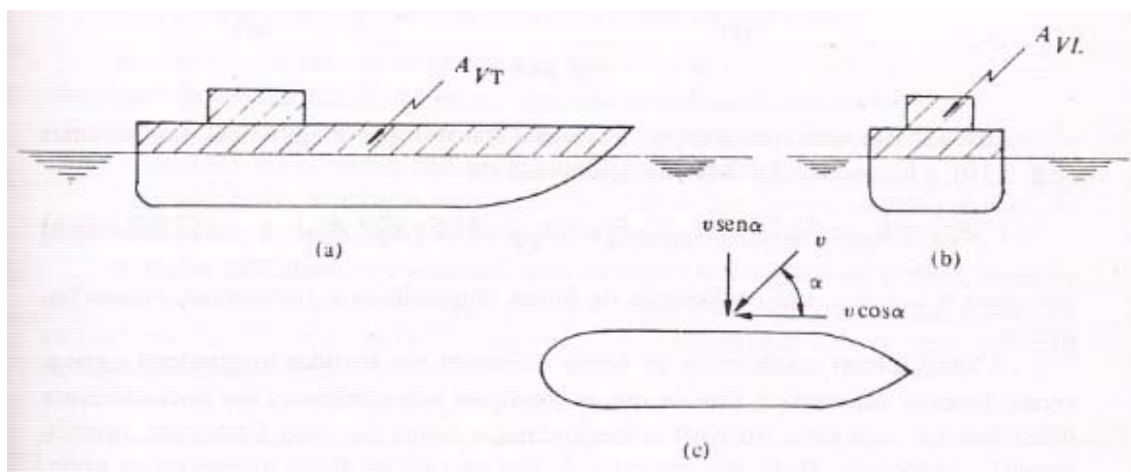


Figura 3.10 – a) área velica para vento da direção transversal; b) área velica para vento da direção longitudinal c) direção de incidência do vento. Fonte: Mason (1987)

Segundo a NBR 9782 (1987), não devem ser utilizadas velocidades de vento que provoquem pressões superiores a  $1 \text{ kN/m}^2$  sobre as embarcações.

### 3.6.4 Velocidade Característica do Vento

Determina-se a velocidade característica do vento pela norma NBR 6123 (1988), pela expressão:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (3.6)$$

Onde:

$V_0$  = Velocidade básica do vento da região;

$S_1$  = Fator topográfico;

$S_2$  = Fator de rugosidade do terreno;

$S_3$  = Fator estatístico.

### 3.6.5 Forças Devidas as Correntes

Análogo as forças de vento, as forças de corrente também serão deduzidas da mesma maneira, porém considerando o peso específico da água do mar e considerando a área de influência submersa pelo navio:

Massa específica da água do mar

$$\rho = 1025 \frac{kg}{m^3}$$

Desta forma, a força exercida pelas correntes nas embarcações resulta em:

$$F_C = k_C 512,5 v^2 A_C \quad (3.7)$$

Sendo  $v$  em m/s e  $A_v$  em  $m^2$ ,  $F_v$  sairia em N, como queremos o resultado em kN,

$$F_C = k_C 0,512 v^2 A_C \quad (3.8)$$

Da mesma maneira que para a força de vento, para as forças devido às correntes também deve-se determinar os esforços para direção longitudinal e transversal conforme Figura 3.11.

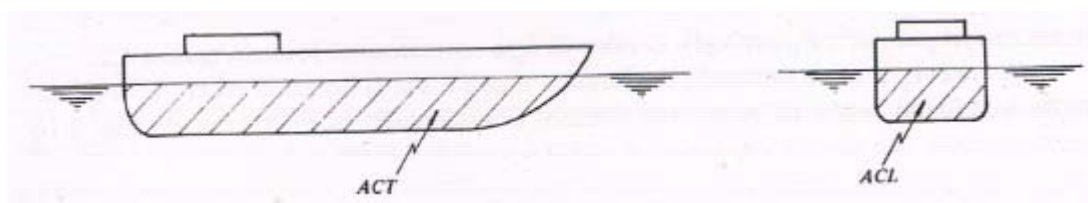


Figura 3.11 – a) área para esforço de corrente da direção transversal; b) área para esforço de corrente da direção longitudinal. Fonte: Mason (1987)

Para os coeficientes de forma, Mason (1987) salienta ser importante utilizar diferentes valores para cada situação (transversal e longitudinal), uma vez que as condições hidrodinâmicas não são as mesmas. As equações para o cálculo do coeficiente de forma são:

$$K_{CL} = 1 + \frac{D}{H}; \quad (3.9)$$

$$K_{CT} = 1 + \left(1 + \frac{D}{H}\right)^3 \quad (3.10)$$

Onde D é o calado do navio e H a distância livre sob a calha do navio.

Já a NBR 9782 (1987) apresenta valores para o coeficiente de forma de acordo com a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Valores aproximados do coeficiente de forma. Fonte: NBR 9782 (1987)

Valores aproximados do coeficiente de forma - (k)						
$\theta(A) / (h/D)$	0°	20°	40°	60°	80°	90°
<b>1,10</b>	0,00	1,20	3,10	4,10	4,60	4,70
<b>1,50</b>	0,00	0,50	1,30	2,00	2,30	2,30
<b>7,00</b>	0,00	0,20	0,60	0,80	0,90	0,90
(A) Ângulo formado pela direção da corrente com o eixo longitudinal do navio.						
Nota: Valores intermediários podem ser interpolados linearmente.						

A análise deve ser feita considerando o navio em lastro e carregado, já que a variação de força e corrente depende do quanto o navio está submerso na água. Ao final, basta somar as forças de corrente e vento e decompor segundo um arranjo de cordas previamente estabelecido em projeto. A norma brasileira estabelece em critério de dimensionamento, que um único cabo deve ser capaz de absorver e transmitir todo o esforço longitudinal considerando uma angulação de no mínimo 20° com o cais.

### 3.7 ATRACAÇÃO

O esforço de atracação é o efeito decorrente do impacto das embarcações com o cais. O uso de defensas é fundamental tanto para a segurança do cais como também da embarcação,

#### 3.7.1 Defensas

As defensas (Figura 3.12) são estruturas responsáveis por absorver a energia cinética gerada pelas movimentações das embarcações tanto nas operações de atracação e desatracação, como quando atracadas, além de não deixar acontecer o contato direto do navio com o cais, evitando assim danos às estruturas (Figuras 3.13 e 3.14). Desta forma, estes elementos servem para dar segurança, tanto aos navios, como as estruturas portuárias (LEAL, 2011).



Figura 3.12 – Defensas marítimas Fonte: Pulsar Marine (2015)



Figura 3.13 Colisão de navio com cais, Fonte:

<https://portalo.wordpress.com/2011/05/14/ponta-do-sol-colide-com-cais-do-porto-da-horta/>



Figura 3.14 Colisão de navio com cais. Fonte:

[http://naviosemmriogrande.blogspot.com.br/2013\\_05\\_01\\_archive.html](http://naviosemmriogrande.blogspot.com.br/2013_05_01_archive.html)

Existem diferentes formas de atracação de navios, dependendo do berço existente no cais e o tipo de manobra a ser executada. Portanto, também existem diferentes tipos de defensas e cada uma delas serve para absorver o esforço predominante da situação de carga a que vai ser submetida, ou seja, cada uma terá um dimensionamento específico, dependendo do caso. Dentre os principais tipos estão:

- a) Defensas de madeira;
- b) Defensas de gravidade;
- c) Defensas hidráulicas;
- d) Defensas de borracha (mais utilizadas).

As defensas de borracha são do tipo elástica e são as mais utilizadas no mercado. Elas conseguem absorver grande parte da energia solicitada ao cais frente a atracação dos navios através da sua deformação,

Estes elementos são empregados de borracha pela boa capacidade de absorver esforços de forma elásticas além de resistirem às ações causadas pela água do mar.

Dentre as mais simples, é possível citar os pneus, usado para cais em que não são submetidos a esforços de grandes navios. Já as mais empregadas são as chamadas defensas celulares, que são confeccionadas em diferentes tipos, sendo mais rígidas quanto ao esforço for

axial e com capacidade de flambar quando o esforço superar certos limites, este fator dá uma capacidade de maior absorção de energia pela defesa.

Os principais tipos de defensas celulares são:

- a) Cilíndrica;
- b) Tipo V;
- c) Tipo PI
- d) Cônica;
- e) Cilíndrica axial.

### **3.7.2 Diagrama Reação x Deformação**

Os fabricantes apresentam em seus catálogos um diagrama do tipo reação x deformação, através da carga aplicada na defesa. A norma NBR 9782 (1987) sugere a análise desse diagrama apresentado pelo fabricante da defesa selecionada para o cais e, que toda a energia de atracação deve ser absorvida por apenas uma defesa, ou seja, toda em um único ponto de impacto. Para a Figura 3.15, Alfredini e Arasaki (2014) apresentam o gráfico reação x deformação de uma defesa do tipo PI.

A principal característica desta defesa é que quanto maior o gradiente de deformação, mais capacidade de absorção de energia a defesa tem, porém também devolverá uma maior pressão de contato para o casco do navio e desta forma usam-se escudos para reduzir a pressão de contato.

Já as defensas com baixo gradiente de reação x deformação, apresentam uma maior deformação para determinada energia absorvida e, portanto, geram menores pressões para os cascos dos navios.

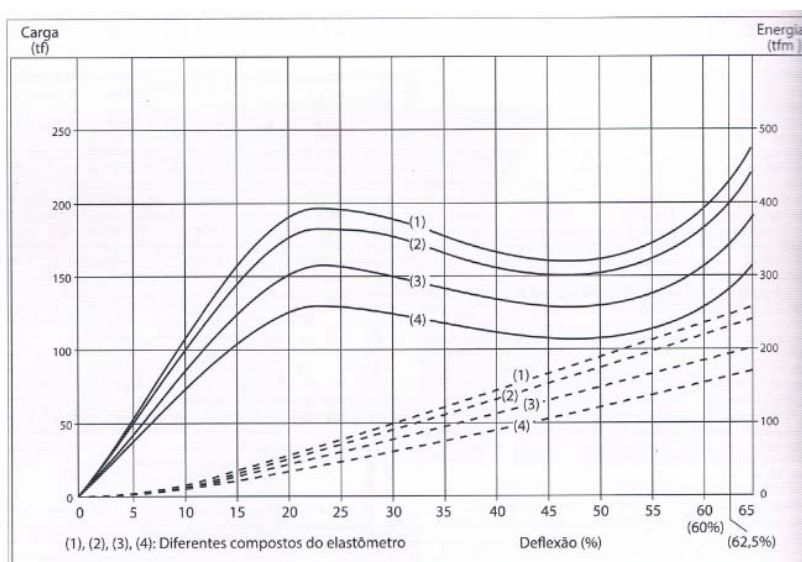


Figura 3.15 Gráfico de reação x deformação. Fonte: Alfredini e Arasaki (2014).

### 3.7.3 Energia de Atracação

A energia de atracação é a energia cinética desprendida pelo navio em direção ao cais no momento da atracação. A norma brasileira NBR 9782 (1987) apresenta uma formulação para se determinar a energia. Porém, a maioria dos autores não utiliza a formulação apresentada pela norma brasileira para determinar esta energia. Neste item vamos demonstrar outro método além da norma brasileira.

O método a ser demonstrado é o apresentado pela PIANC (2002) e amplamente utilizado pelos autores estudados para a produção deste trabalho.

A formulação básica da energia de atracação é dada por:

$$E_A = \frac{1}{2} \frac{W}{g} V_A^2 C_m C_E C_C C_a F_s \quad (3.11)$$

Onde  $E_A$  é a energia de atracação,  $W$  o peso do navio,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $V_A$  representa a velocidade de aproximação do navio medida perpendicularmente a linha de atracação,  $C_E$  é o coeficiente de excentricidade,  $C_m$  é o coeficiente de massa virtual,  $C_C$  é o coeficiente de configuração do cais,  $C_a$  é o Coeficiente de amortecimento e  $F_s$  é o fator de segurança.

O manual da Fender Team (2014) apresenta o método da PIANC (2002) e, desta forma, destaca a verificação de:

- Todos os tipos de navios que utilizaram o berço;
- O deslocamento provável de atracação;
- A frequência de atracação;
- As condições climáticas do local;
- As forças geradas pelas marés e pelas correntes;
- Disponibilidade e potência dos rebocadores.

### 3.7.3.1 Dimensões da embarcação

Para a determinação da máxima energia de atracação, deve-se utilizar a embarcação-tipo, ou seja, o maior navio que irá atracar no cais já que este será o navio que maior energia irá desprender contra o cais. Portanto, a primeira situação a ser verificada são as dimensões deste navio. Segundo o manual de projeto de defensas da Fender Team (2014) as principais dimensões são exibidas nas Figuras 3.16 e 3.17.

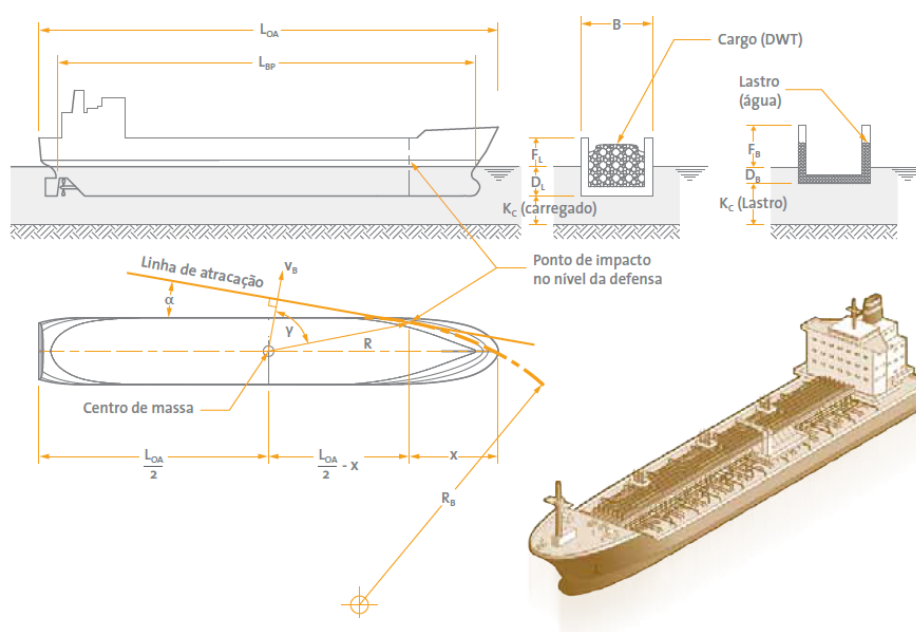


Figura 3.16 Dimensões da embarcação. Fonte: Fender Team (2014).



Extensão geral	$L_{OA}$	"Comprimento máximo do navio que define o tamanho do dique ou dique seco necessário. Às vezes referida como "L".
Extensão entre perpendiculares	$L_{BP}$	Comprimento entre o pivô do leme e a intersecção da proa com a linha d'água. Isto não é o mesmo que comprimento na linha d'água embora os dois sejam frequentemente confundidos.
Lata (ou boca)	$B$	A largura do navio, geralmente no centro do navio. Dimensões da boca de algumas fontes podem incluir as amarrações mas isto não é relevante aos cálculos de energia de atracação.
Calado carregado	$D_L$	O calado carregado é geralmente o calado máximo no vau para boas condições de operação. Navios operarão neste calado ou menos dependendo do total de carga carregada.
Calado em lastro	$D_B$	O calado de navegação mínimo quando o navio não está carregado e navegando em condição de lastro. Geralmente considerado apenas para navios tanques, graneleiros, navios de containers e carga geral. Lastro para navios tanques, graneleiros e navios de containers é estimado em $D_B \approx 2 + 0.02L_{OA}$ .
Calado de escantilhão (não mostrado)	$D_S$	O calado máximo permitido para uma embarcação. Raramente utilizado em projetos de defensas.
Bordo livre carregado	$F_L$	O bordo livre no meio do navio correspondente ao calado carregado ( $D_L$ ).
Bordo livre do lastro	$F_B$	O bordo livre no meio do navio correspondente ao calado em lastro ( $D_B$ ).
Espaço entre a quilha	$K_C$	A profundidade da água abaixo do casco do navio (quilha). O efeito do compartimento em lastro ou carregado,
Curva da proa	$R_B$	"O raio teórico da proa do navio em um plano horizontal aproximadamente coincidente com o nível da defesa. O raio é geralmente tomado como uma constante para projetos de defensas mas na prática pode variar de acordo com o calado do navio.
Distância para impacto da proa	$x$	Geralmente não é bem definido pois pode variar de acordo com o perfil do navio, ângulo de atracação, etc. A distância é comumente referida como quarto ponto ( $x = 0.25L_{OA}$ ), quinto ponto ( $x = 0.2L_{OA}$ ) etc. medidos a partir da proa (ou popa). Consulte 'Coeficiente de excentricidade' para mais detalhes.
Impacto ao centro da massa	$R$	Esta dimensão é usada ao determinar o coeficiente de Excentricidade ( $C_e$ ). Por convenção é assumido como centro da massa o meio do navio ( $L_{OA}/2$ ) mas efetivamente pode ser 5-10% após o meio do navio para navios graneleiro universal em lastro e/ou compassado por popa.

Figura 3.17 Especificação das dimensões. Fonte: Fender Team (2014).

### 3.7.3.2 Coeficiente de massa virtual ( $C_m$ )

Quando o navio está em movimento, arrasta em conjunto uma considerável massa de água. No momento da atracação, quando o navio para, uma parcela dessa massa de água continua o movimento (Figura 3.18). Este fator faz com que aumente a energia sobre o sistema de defesa. Essa parcela de acréscimo de energia é corrigida com o coeficiente de massa virtual. As equações disponibilizadas são as definidas pela PIANC (2002), Shigera Ueda (1981) e Vasco Costa (1964) como demonstrado a seguir.

a) Método da PIANC (2002):

$$\frac{K_C}{D} \leq 0,1, \text{ então } C_m = 1,8 \quad (3.12)$$

$$0,1 \leq \frac{K_C}{D} \leq 0,5, \text{ então } C_m = 1,875 - 0,75\left(\frac{K_C}{D}\right) \quad (3.13)$$

$$\frac{K_C}{D} > 0,5, \text{ então } C_m = 1,5 \quad (3.13)$$

Onde:

$$D_B \leq D \leq C_L \quad (3.14)$$

b) Método de Shigera Ueda (1981):

$$C_m = \frac{\pi D}{2C_b B} \quad (3.15)$$

c) Método de Vasco Costa (1964):

$$C_m = 1 + \frac{2D}{B} \quad (3.16)$$

Onde:

$K_C$  = folga sob a quilha do navio;

$D$  = Calado do navio;

$B$  = Boca do navio;

$C_b$  = Coeficiente de bloco do navio.

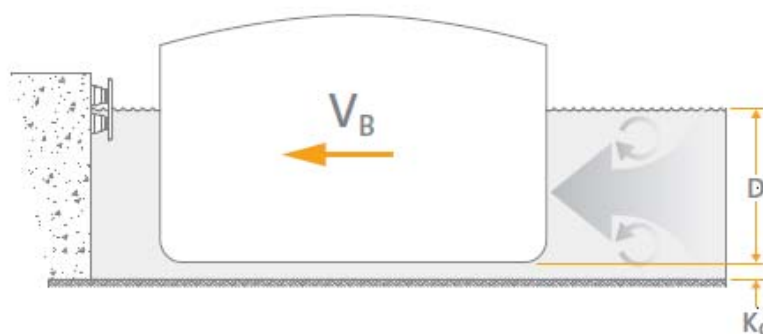


Figura 3.18 Coeficiente de massa virtual. Fonte: Fender Team (2014).

Leal (2011) salienta que a equação de Vasco Costa somente é válida para manobras com velocidades dos navios superiores a 0,08 m/s e para folga sob a quilha superiores a 10% do calado.

### 3.7.3.3 Coeficiente de Bloco ( $C_B$ )

O coeficiente de bloco (Figura 3.19) é determinado pela razão do volume real do navio pelo volume da caixa do casco expresso como:

$$C_B = \frac{M_D}{L_{BP} D_L \rho_{SW}} \quad (3.17)$$

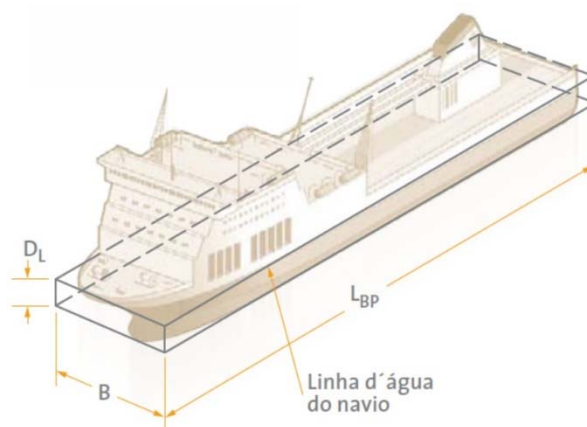


Figura 3.19 Coeficiente de bloco. Fonte: Fender Team (2014)

Pelo fato da norma NBR9782 (1987) sugerir que apenas uma defesa deve absorver toda a energia de atracação, o tipo de manobra de acostagem a ser considerada é a chamada atracação lateral (Figura 3.20). Segundo o a Fender Team (2014), as características deste tipo de atracação são:

- a) O navio está em paralelo ou em pequeno ângulo à linha de atracação;
- b) O vetor velocidade está aproximadamente perpendicular à linha de atracação;
- c) O navio gira sobre o ponto de contato com a defesa que dissipa parte da energia cinética;
- d) O contato é feito tipicamente entre 20% e 35% da proa, dependendo da curvatura da proa e da geometria,
- e) O navio pode atingir uma, duas ou três defensas dependendo de seus tamanhos e da curvatura de proa do navio;
- f) Se a velocidade não for exatamente perpendicular à linha de atracação poderá haver algum cisalhamento nas defensas devido à fricção.

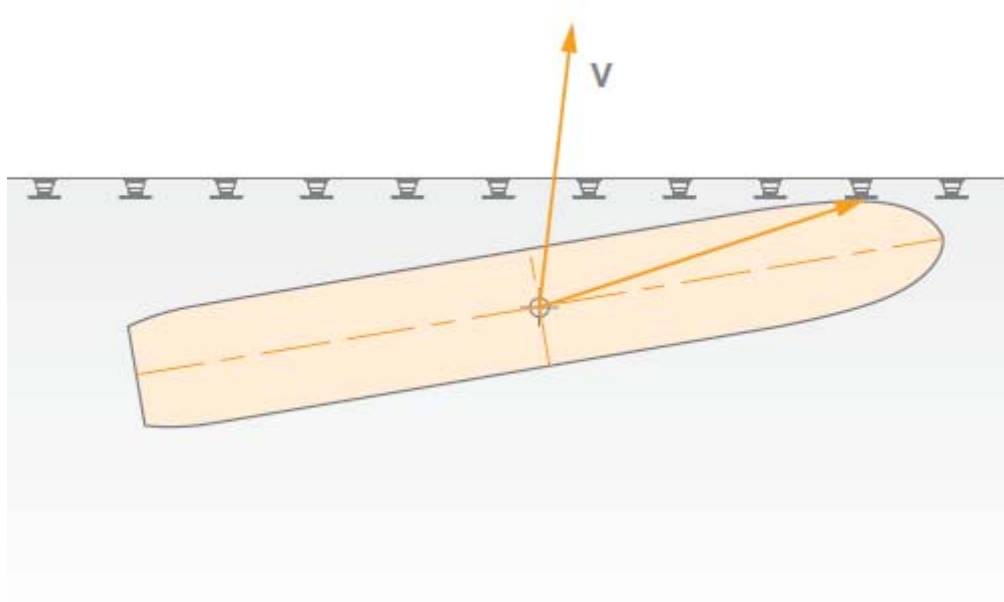


Figura 3.20 Atracação lateral. Fonte: Fender Team (2014).

#### 3.7.3.4 Coeficiente de Excentricidade ( $C_E$ )

No instante em que o navio sofre o impacto com a defesa, o navio não está paralelo ao cais, portanto, uma parte da energia é absorvida pelo movimento de translação, e outra parte é dissipada pelo movimento de rotação do navio (Figura 3.21). O coeficiente de excentricidade corrige este fator e é dado por:

$$C_E = \frac{K^2 + (R^2 \cos^2(\gamma))}{K^2 + R^2} \quad (3.18)$$

$$K = (0,19C_B + 0,11)L_{BP} \quad (3.19)$$

$$R = \sqrt{\left(\frac{L_{BP}}{2} - x\right)^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2} \quad (3.20)$$

$$\gamma = 90 - \alpha - \arcsin\left(\frac{B}{2R}\right) \quad (3.21)$$

Onde K representa o raio de giração do navio,  $L_{BP}$  o comprimento entre perpendiculares do navio, R é a distância entre o centro de gravidade do navio e o ponto de impacto na defesa e  $\gamma$  o ângulo de excentricidade que é diretamente ligado ao ângulo de aproximação  $\alpha$ .

Para o ângulo de aproximação, Mason (1987) sugere que como é um ângulo impreciso, utilizar em torno de  $10^\circ$ .

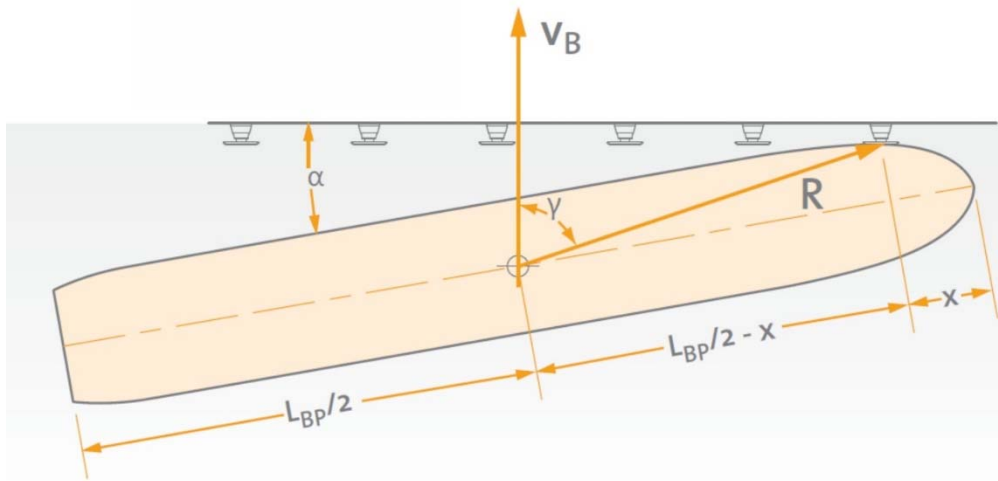


Figura 3.21 Atracação lateral, Fonte: Fender Team (2014)

### 3.7.3.5 Coeficiente de Configuração do Cais ( $C_C$ )

O coeficiente de configuração serve para corrigir a energia de atracação em função da configuração da estrutura do cais (Figuras 3.22 a 3.24). Uma vez que no final da atracação, a água que é jogada em direção ao cais pode fluir através das estacas ou ficar presa entre o casco e uma parede de contenção, O amortecimento deste impacto também depende do espaço abaixo da quilha e ângulo de atracação. Como demonstram as equações a seguir:

**a) Estrutura Sólida**

$$\frac{K_C}{D} \leq 0,5 \rightarrow C_C \cong 0,8 \ (\alpha \leq 5^\circ) \quad (3.22)$$

$$\frac{K_C}{D} > 0,5 \rightarrow C_C \cong 0,9 \ (\alpha \leq 5^\circ) \quad (3.23)$$

$$C_C = 1 \ (\alpha > 5^\circ) \quad (3.24)$$

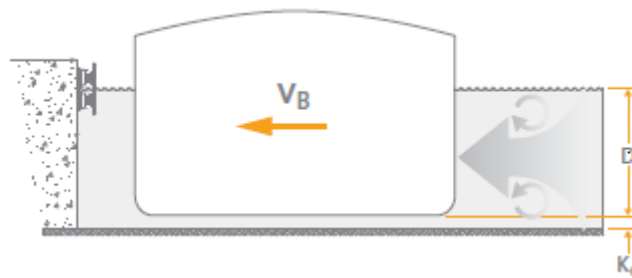


Figura 3.22 Estrutura com paramento fechado. Fonte: Fender Team (2014)

**b) Estrutura Parcialmente Fechada:**

$$\frac{K_C}{D} \leq 0,5 \rightarrow C_C \cong 0,9 \ (\alpha \leq 5^\circ) \quad (3.25)$$

$$\frac{K_C}{D} > 0,5 \rightarrow C_C \cong 1,0 \ (\alpha \leq 5^\circ) \quad (3.26)$$

$$C_C = 1,0 \ (\alpha > 5^\circ) \quad (3.27)$$

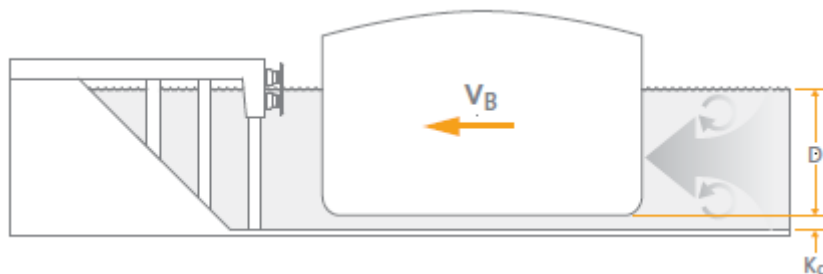


Figura 3.23 Estrutura parcialmente fechada. Fonte: Fender Team (2014)

**c) Estrutura de Estacas Abertas:**

$$C_c = 1,0 \quad (3.28)$$

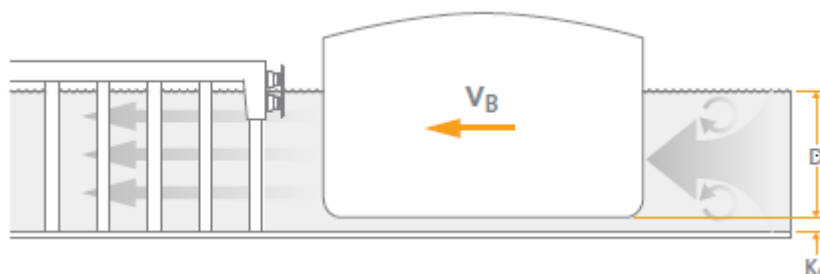


Figura 3.24 Estrutura de paramento aberto. Fonte: Fender Team (2014)

**3.7.3.6 Coeficiente de Amortecimento ( $C_a$ )**

O coeficiente de amortecimento considera que o casco do navio também é de certa forma flexível, o que poderá absorver uma pequena quantidade de energia. Portanto, dependendo da rigidez do sistema de defensas adotado, o coeficiente de amortecimento pode ser tomado por:

$$0,9 \geq C_a \geq 1,0 \quad (3.29)$$

**3.7.3.7 Velocidade de Aproximação ( $V_a$ )**

A velocidade de aproximação é medida perpendicularmente à linha longitudinal do cais e depende de alguns fatores como:

- Se a atracação do navio é auxiliada ou não por rebocadores;
- A dificuldade de aproximação de manobra no berço;
- Se o berço é protegido de ações como vento e corrente;
- O tamanho do navio e se a atracação é totalmente carregada, parcialmente ou em lastro.

A norma britânica BS6349 (2000) e a PIANC (2002) adotam o gráfico de velocidade de Brotsma (Figura 3.25), onde as linhas representam:

- a) Aproximação fácil com zona abrigada;
- b) Aproximação difícil com zona abrigada;
- c) Aproximação fácil com zona exposta;
- d) Aproximação de média dificuldade com zona exposta;
- e) Aproximação difícil com zona exposta.

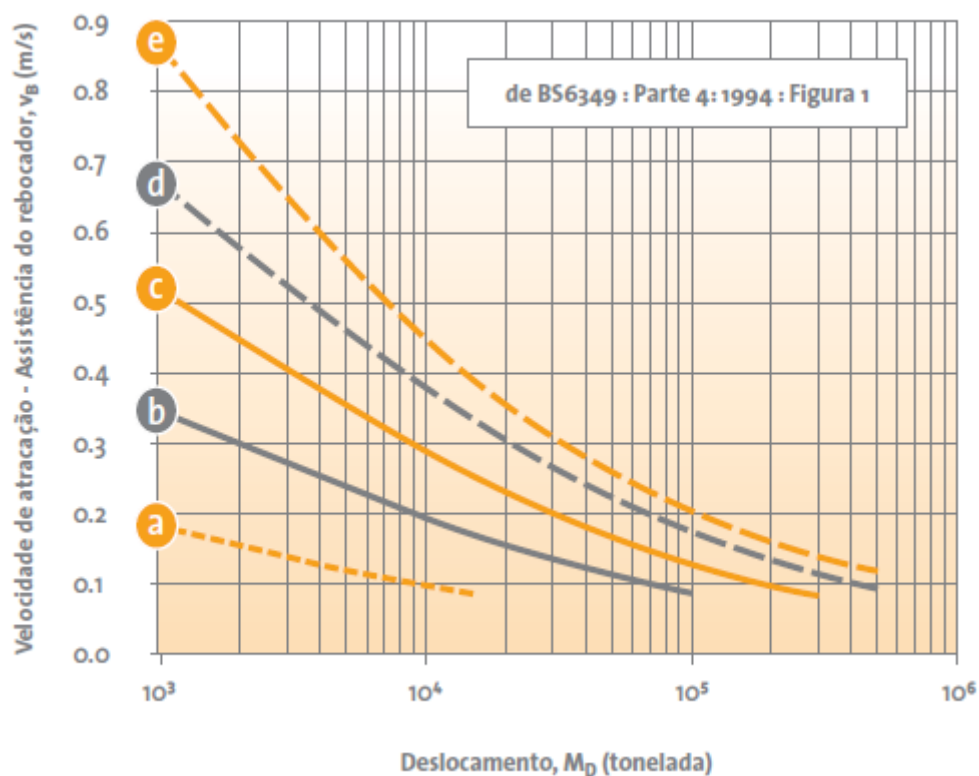


Figura 3.25 Curvas de Brosla. Fonte: Fender Team, (2014)

### 3.7.3.8 Fator de Segurança (FS)

O fator de segurança é utilizado para majorar a energia de atracção. É utilizado para corrigir manobras mal realizadas quando a atracção não pode ser realizada em situação normal, ou seja, com situações climáticas ou ambiente marítimo adversos (LEAL, 2011).

A Fender Team (2014) destaca que é preciso tomar cuidado para não adotar fatores de segurança excessivos que levem ao superdimensionamento da defesa.



Alguns fatores de segurança são sugeridos pela PIANC (2002) e ilustrados na Figura 3.26:

CLASSE DE NAVIO	MAIORES	MENORES	COMENTÁRIOS E INTERPRETAÇÕES
Navios Tanques	1.25 <sup>A</sup>	1.75 <sup>B</sup>	A: Suezmax e acima B: Handymax e menores
Graneleiros	1.25 <sup>A</sup>	1.75 <sup>B</sup>	A: Capesize e acima B: Handymax e menores
Transportadores de gases naturais	1.50–2.00		Nenhum padrão PIANC Segurança crítica em fatores muito altos exigidos
Navios contentores	1.50 <sup>A</sup>	2.00 <sup>B</sup>	A: Post-Panamax e acima B: Panamax e menores
Carga geral, cargueiros	1.75		Utilize fatores mais altos e velocidades se os rebocadores estiverem disponíveis
Ro-Ro & Ferries	≥2.00		Fatores de segurança mais altos podem ser necessários na maioria dos berços expostos.
Transportadores de automóveis	2.00		Nenhum padrão PIANC Área com muito vento pode dificultar a atracação.
Navios cruzeiros	2.00		Nenhum padrão PIANC Área com muito vento pode dificultar a atracação.
Ferries rápidos	≥2.00		Nenhum padrão PIANC Navios possuem limitada velocidade baixa de manobrabilidade.
Rebocadores, utilitários	2.00		Existem em todas as formas e tamanhos. Muitos desconhecidos.

Figura 3.26 Fatores de segurança. Fonte: Manual de projeto de defensas da Fender Team

### 3.7.3.9 Espaçamento entre Defensas

Para o espaçamento entre defensas, não basta apenas pegar o navio-tipo para verificação, uma vez que, se muito espaçadas, navios menores podem entrar entre duas defensas causando o impacto direto com o cais, A expressão para se determinar o espaçamento depende do raio de proa do navio e é dado pela PIANC (2002) como:

$$S \leq 2\sqrt{R_B^2 - (R_B - h + C)^2} \quad (3.30)$$

$$R_B = \frac{x^2}{B} + \frac{B}{4} \quad (3.31)$$

Onde S representa o espaçamento entre defensas, R<sub>B</sub> a curva da proa, h a altura da defesa comprimida e C a folga ao cais.

### 3.7.4 Energia de Atracação pela NBR 9782 (1987)

De acordo com a NBR 9782 (1987), para determinação da energia de atração, deve-se calcular a seguinte expressão:

$$E_C = \frac{1}{2}(M_1 + M_2)V^2 C_E C_r \quad (3.32)$$

Onde  $E_C$  é a energia característica nominal,  $M_1$  é massa deslocada pelo navio,  $M_2$  é massa de água adicional,  $V$  é velocidade de aproximação do navio perpendicular à linha de atracação,  $C_E$  é o coeficiente de excentricidade e  $C_r$  é o coeficiente de rigidez.

#### 3.7.4.1 Massa Deslocada pelo Navio ( $M_1$ )

Segundo a norma, deve-se considerar a situação de carregamento e descarregamento. Para a situação de descarregamento, usa-se a massa máxima que o navio pode deslocar, enquanto na situação de carregamento pode-se adotar 90% da massa total do navio totalmente carregado.

#### 3.7.4.2 Massa de Água Adicional ( $M_2$ )

Refere-se à massa de água que se movimenta com o navio durante a atracação, adota-se como:

$$M_2 = \frac{\pi D^2}{4} L \gamma_a \quad (3.33)$$

Onde  $D$  é o calado do navio,  $L$  é o comprimento entre perpendiculares do navio,  $\gamma_a$  é o peso específica da água. A norma destaca uma nota de que podem ser usadas massas hidrodinâmicas maiores que as determinadas acima, desde que sejam resultado de experimentos em laboratórios idôneos.

#### 3.7.4.3 Velocidade de aproximação do navio ( $V$ )

Assim como a velocidade de aproximação determinada pela PIANC (2002), a norma brasileira também utiliza variáveis como tamanho dos navios, condições de abrigo, utilização

ou não de rebocadores e condições climáticas da região. Para isso, a NBR9782 (1987) apresenta a Tabela 3.4 onde pode ser determinada a velocidade.

Tabela 3.4 – Velocidades de aproximação do navio segundo NBR9782 (1987). Fonte: NBR9782 (1987).

unidade: m/s					
Condição	Aproximação	Velocidade perpendicular à linha de atracação			
		Até	até	Até	Navios
		1.000 TPB	5.000 TPB	10.000 TPB	Maiores
Vento e ondas fortes	Difícil	0,75	0,55	0,4	0,3
Vento e ondas fortes	Favorável	0,6	0,45	0,3	0,2
Vento e ondas moderadas	Aceitável	0,45	0,35	0,2	0,15
Protegido	Difícil	0,25	0,2	0,15	0,1
Protegido	Favorável	0,2	0,15	0,12	0,1

#### 3.7.4.4 Coeficiente de Excentricidade ( $C_E$ )

O coeficiente de excentricidade sugerido pela norma brasileira, tem o mesmo conceito do  $C_E$  da PIANC (2002), e, apesar da equação ser simplificada, leva ao mesmo resultado, sendo:

$$C_e = \frac{r^2}{l^2 + r^2} \quad (3.34)$$

Onde  $r$  é o raio de giro do navio e pode ser considerado como 25% do comprimento total do navio e  $l$  é a distância entre o ponto de contato do navio com a defesa e o centro de gravidade do navio, medida paralelamente a linha de atracação.

#### 3.7.4.5 Coeficiente de Rigidez ( $C_R$ )

O Coeficiente de rigidez da norma brasileira também detém o mesmo conceito do coeficiente de amortecimento sugerido pela PIANC (2002), e dependendo da rigidez do sistema de defensas pode ser adotado de 0,90 à 0,95.

#### 3.7.4.6 Forças Perpendiculares à Linha de Atracação

A NBR 9782 (1987) estabelece que as forças perpendiculares à linha de atracação, ou seja, a própria força gerada pela energia de atracação, devem ser majoradas em 1,4 para situações normais, de acordo com as combinações de carga. O que será feito de forma geral para todos os esforços na análise de segurança nas estruturas.

#### 3.7.4.7 Forças Paralelas à Linha de Atracação

Dependendo do tipo de material utilizado para defensas e o casco do navio, podem ocorrer forças de atrito no momento da atracação que devem ser consideradas. A NBR 9782 (1987) sugere que sejam verificados esses esforços e apresenta uma tabela (Tabela 3.5) com diferentes tipos de coeficientes de atrito entre materiais.

No entanto, atualmente é instalado na parte frontal das defensas, um painel em UHMW-PE (Polietileno de peso molecular ultra-alto). Que servem para ajudar a distribuir as tensões, reduzir ainda mais a distância entre defensas, além de terem um coeficiente de atrito muito baixo, não gerando forças tangenciais consideráveis, tanto para o sistema de defensas, quanto para o casco do navio. (FENDER DESIGN, 2011).

Tabela 3.5 Coeficientes de atrito com aço. Fonte: NBR9782 (1987).

Material	Coeficiente de atrito com aço
Aço	0,35 - 0,40
Madeira seca	0,60
Madeira molhada	0,20
Borracha	0,30 - 0,40
Resina sintética	0,10 - 0,20

### 3.7.5 Combinações de Ações em Cais de Containers

Para as combinações de carregamento, deve ser verificado os pré-requisitos dispostos na NBR 9782 (1987). Segundo a norma, as ações devem ser combinadas de diferentes formas, de maneira que se configurem os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura.

Em qualquer combinação as ações permanentes deverão ser consideradas e o empuxo horizontal referente ao terrapleno existente em muitas estruturas de cais deve ser analisado como carga permanente.

A norma também ressalta que as ações devidas ao meio ambiente só serão combinadas entre si quando forem operacionalmente possíveis, ou seja, as cargas de amarração e atracação nunca atuaram em conjunto para o mesmo módulo do cais.

Também, operações portuárias não devem ser realizadas com velocidades de vento acima de 60 km/h e agitação residual de 1 m até 0,7 m.

Para as sobrecargas verticais, na presença de guindaste sobre trilho, pode-se considerar uma redução de 40% do seu valor, na área compreendida entre o trilho externo e o paramento do cais, não sendo, porém, considerado um valor inferior a 10 kN/m<sup>2</sup>.

Além disso, para análise dos suportes de fundação da estrutura do cais, como as estacas analisadas neste trabalho, pode-se considerar uma redução de 0,7( $\psi_0$ ) na sobrecarga vertical, quando esta não for considerada como variável principal, já que a probabilidade de ocorrência desse esforço em sua totalidade é pequena. Para as demais cargas variáveis atuantes na estrutura, pode-se considerar uma redução de 0,8( $\psi_0$ ), quando estas não estiverem sendo consideradas como principal. Para a sobrecarga que estiver posicionada no interior do pórtico do guindaste, pode ser reduzida em 50% do valor característico.

## 3.8 COMBINAÇÕES

Para a verificação e segurança da estrutura do cais, devem ser analisados todos os estados limites possíveis para estrutura estudada de acordo com a NBR 8681 (2003). Para este trabalho, foi realizada apenas a verificação de estados limites últimos, ou seja, referente a

situação de ruptura e que resulta nas cargas para o dimensionamento das estacas do cais, uma vez que as cargas analisadas se referem a situação de esforço máximo das estacas.

Para isto, foi utilizado a combinação de cargas normais disposta na NBR 9782 (1987), onde o valor combinado da ação  $F_d$  é definido da seguinte forma:

$$F_d = \gamma_g F_G + \gamma_q \left( F_{Q_{1,K}} + \sum \psi_0 + F_{Q_{j,K}} \right) + \gamma_\epsilon \psi_0 F_E \quad (3.35)$$

Onde  $F_G$  é o valor característico das ações permanentes,  $F_{Q_{1,K}}$  é o valor característico da ação variáveis considerada como principal, isto é, a de maior valor para o elemento em estudo,  $F_{Q_{j,K}}$  são os valores característicos das demais ações variáveis e  $F_E$  representa os valores característicos dos efeitos diferidos e da variação de temperatura.

### 3.8.1 Coeficientes de Ponderação

#### 3.8.1.1 Ações Permanentes

O coeficiente de ponderação para as ações permanentes determinado pela Tabela 3.6 de acordo com a NBR 9782 (1987). A norma ressalta que para ser uma combinação de grande variabilidade, como o utilizado, o peso próprio da estrutura não pode superar 75% da totalidade das ações permanentes submetidas ao cais.

Para os efeitos de variação de temperatura, o coeficiente de ponderação adotado é de acordo com a Tabela 3.7 retirada da NBR8792 (1987).

Tabela 3.6 Coeficientes de ponderação das ações permanentes ( $\gamma_g$ ). Fonte: NBR9782 (1987).

Efeitos	Variabilidade	Combinações		
		Normais	Montagem ou de construção	Excepcionais
desfavoráveis	pequena	1,30	1,20	1,10
	grande	1,40	1,30	1,20
Favoráveis	pequena	1,00	1,00	1,00
	grande	0,90	0,90	0,90

Tabela 3.7 Coeficientes de ponderação das de efeitos de recalque de apoio, retração de materiais, variação de temperatura e deformações diferidas ( $\gamma_e$ ). Fonte: NBR9782, (1987).

<b>Efeitos</b>	<b>Combinações</b>		
	<b>Normais</b>	<b>Montagem ou de construção</b>	<b>Excepcionais</b>
<b>Desfavoráveis</b>	1,20	1,20	0,00
<b>Favoráveis</b>	1,00	1,00	0,00

### 3.8.1.2 Ações Variáveis

O coeficiente de ponderação para ações variáveis  $\gamma_q$  é determinado pela Tabela 3.8 retirada da NBR9782 (1987). Este coeficiente majora as cargas variáveis atuantes sobre a estrutura do cais.

Tabela 3.8 Coeficientes de ponderação das ações variáveis ( $\gamma_q$ ). Fonte: NBR9782/87.

<b>Combinações</b>	<b><math>\gamma_q</math></b>
<b>Normais</b>	1,40
<b>Montagem</b>	1,20
<b>Excepcionais</b>	1,00

## **4 METODOLOGIA E VERIFICAÇÃO DO MODELO**

### **4.1 METODOLOGIA DE MODELAGEM**

Primeiramente foi realizado um estudo amplo sobre estruturas portuárias de forma a conhecer os diversos problemas e soluções para uma estrutura deste tipo, dando ênfase aos cais de contêineres. Em uma segunda etapa foi modelado um dos módulos do cais de contêineres do TECON-RS, a fim de se utilizar de uma estrutura real executada para a análise do cais e, principalmente, da fundação do cais estudado. O cais não foi modelado fielmente ao executado no terminal, mas foi igual na maioria de sua geometria. O TECON-RS foi escolhido por se tratar de um porto importante tanto a nível regional como a nível nacional, e também por ter-se à disposição o projeto estrutural do mesmo para seguir a geometria da estrutura.

Já o software ANSYS foi escolhido por ser um poderoso software que utiliza o método dos elementos finitos, além de ser um software em que a instituição FURG dispõe, não gerando custos para o trabalho. Além do ANSYS, foi utilizado os softwares Excel (SUPORTE DO OFFICE) e Tecplot (MANUAL DO TECPLOT) para a análise completa dos diversos resultados e combinações, podendo-se obter uma boa apresentação dos mesmos.

Com o modelo desenvolvido e sabendo que o método dos elementos finitos gera uma análise complexa, foi feita a verificação do modelo estrutural, de forma a saber se a distribuição dos resultados estava coerente. Para isso, utilizou-se outros modelos analíticos de análise de estruturas e outros softwares, em duas e três dimensões, em verificação aos resultados do modelo executado no ANSYS.

A partir disto, foi desenvolvido um levantamento dos tipos de carregamentos necessários a serem dispostos no modelo, analisando tanto literaturas e normas brasileiras como a NBR9782 (1987) e NBR8681 (2003), assim como catálogos e outros materiais estrangeiros, uma vez que as normas brasileiras são antigas em comparação às normas de fora do Brasil, e, além disso, os navios, canais e portos, sofreram grande evoluções ao longo do tempo. Foi, portanto, demonstrado também as dificuldades de obtenção das informações para a realização do projeto.

Com as cargas pré-determinadas, foram então elaboradas 227 combinações de esforços. É de suma importância que se saiba que toda a análise dos resultados foi desenvolvida em forma



de reações de apoio no ponto de engastamento das estacas. Estudou-se cada tipo de carregamento distribuído atuante na fundação do cais, podendo então se verificar a importância de cada elemento de fundação e cada carregamento aplicado.

Portanto, o objetivo do trabalho não é o dimensionamento das estacas do cais, e sim, analisar as etapas de um projeto estrutural de um cais de contêineres sobre estacas, desde a obtenção da geometria, tipos de equipamentos e acessórios utilizados no cais, assim como a distribuição das cargas nas fundações através de suas combinações mais importantes.

## **4.2 VERIFICAÇÃO DO MODELO**

De forma geral, os objetivos a serem alcançados quando se modela uma estrutura são determinar esforços e deslocamentos. Para este trabalho, o principal são os esforços. Porém, os esforços estão totalmente ligados aos deslocamentos uma vez que há esforços gerados pelos momentos das cargas atuantes na estrutura, que subsequentemente estão totalmente ligados aos deslocamentos. Desta forma, o modelo mais preciso que se pode produzir com a ajuda da informática é o tridimensional, de forma que se possa representar mais precisamente a rigidez da estrutura.

O software escolhido para se desenvolver o modelo foi o ANSYS (ANSYS, 2009), com capacidade de resolver problemas ligados à análise de estruturas baseado no método dos elementos finitos (MEF),

Na análise física da engenharia, o que se busca é qualificar o funcionamento e quantificar a resistência dos elementos da natureza aplicados à engenharia através de modelos matemáticos. Um dos mais precisos métodos é o chamado método dos elementos finitos;

### **4.2.1 O Método dos Elementos Finitos e o ANSYS**

O método dos elementos finitos é um procedimento numérico, que pode ser aplicado na obtenção de soluções para uma variedade de problemas de engenharia como análises lineares, não-lineares, análise de esforço, transferência de calor, escoamento de fluido e eletromagnetismo (MOAVENI, 1999).

Consiste na existência de uma equação integral, de modo que seja possível substituir essa integral sobre um domínio complexo por um somatório de integrais estendidas a sub domínios. Em outras palavras, é a aproximação do domínio discretizado para um número finito de subdomínios de geometria simples e arbitrária. A solução aproximada é uma combinação linear dessas funções. Se for possível calcular todas as integrais estendidas ao sub domínio, basta desenvolver o somatório correspondente ao segundo membro da integral, correspondente a uma geometria simples, como segmento de reta, triângulo, quadrilátero ou paralelepípedo. Para o caso da aplicação a análise de estruturas, a formulação intuitiva é baseada no princípio dos trabalhos virtuais (AZEVEDO, 2003).

Para a realização da verificação, foi desenvolvido um modelo tridimensional (Figura 4.1), executado no software de elementos finitos ANSYS, baseado em um dos módulos de ampliação do cais do TECON-RS, localizado na cidade de Rio Grande-RS. Com essa finalidade utilizaram-se outros três métodos analíticos para distribuição de esforços e comparação de resultados: Pórtico simples bidimensional para uma faixa de estacas utilizando o software Ftool; método de Nökkentteved (MASON, 1987) também utilizando o software Ftool: programa gráfico-interativo para análise de estruturas planas (MARTHA, 2012); e um modelo tridimensional de grelhas e pórtico espacial utilizando o software TQS: programa gráfico-interativo para análise e dimensionamento de estruturas (MANUAL DO TQS, 2011). Além das análises anteriores, o refinamento da malha aplicado ao cais no próprio modelo do ANSYS foi necessário com o intuito de demonstrar a convergência dos resultados, podendo então, se escolher uma malha que gere um menor tempo de processamento do modelo, com resultados confiáveis.

#### **4.3 MODELO TRIDIMENSIONAL UTILIZANDO MEF(ANSYS)**

O modelo foi constituído de 60 estacas circulares vazadas com diâmetro externo e interno respectivamente de 0,80 m e 0,50 m; vigas retangulares longitudinais sobre as cabeças das estacas e sob a laje superior com dimensão de 1,20 m x 0,40 m; e, uma laje superior de dimensões de 49,97 m x 23,04 m x 0,60 m, apoiada sobre as vigas longitudinais.

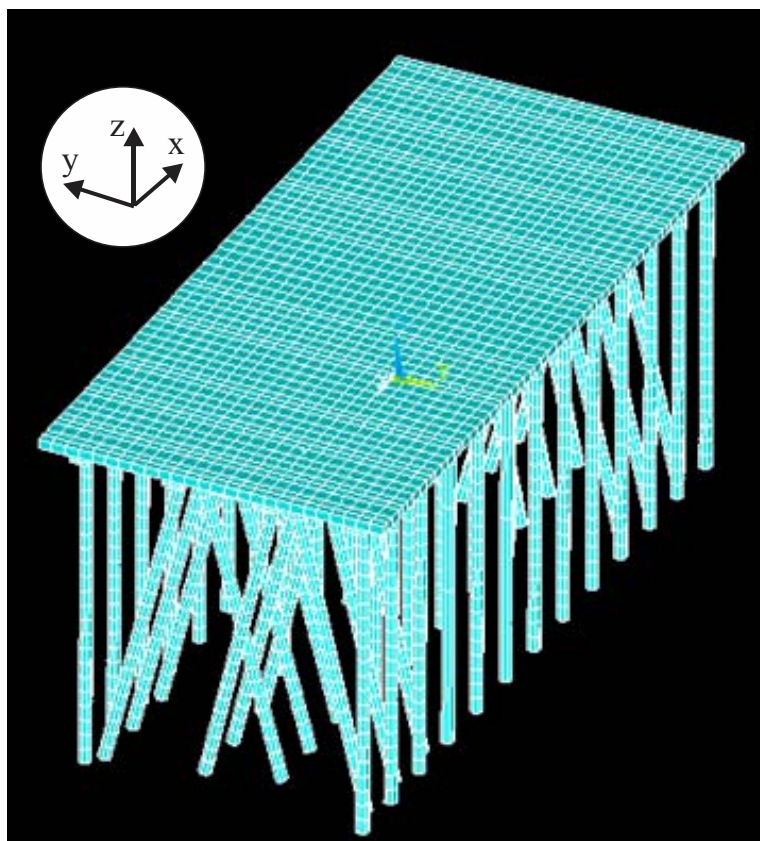


Figura 4.1 Modelo tridimensional desenvolvido no software ANSYS.

#### 4.3.1 COMPRIMENTO DE ENGASTAMENTO

O comprimento de engastamento das estacas foi determinado em 21,50 m, desde o nível do topo da laje até o engaste na base da fundação. Para isto, utilizou-se o método de Davisson e Robinson, que determina um comprimento,  $L_s$ , que, somado ao comprimento livre da estaca,  $L_u$ , representa uma haste rigidamente engastada, de comprimento  $L_e = L_u + L_s$ , de forma a ter um deslocamento igual ao da estaca cravada no solo (DAVISSON E ROBINSON, 1965). A expressão do método resulta em:

$$L_e = L_s + L_u \quad (4.1)$$

$$L_s = 1,8L_0 \quad (4.2)$$

$$L_0 = \sqrt[5]{E_P \cdot \frac{I}{n_h}} \quad (4.3)$$

Onde  $E_P$  é o módulo de elasticidade do material da estaca,  $I$  é o momento de inércia da seção transversal da estaca e  $n_h$  é o coeficiente de reação horizontal do solo. De acordo com o memorial de cálculo da ampliação do cais do TECON-RS, observando-se o perfil do solo e analisando as camadas superficiais constata-se que é argila plástica com areia fina (Figura 4.2).

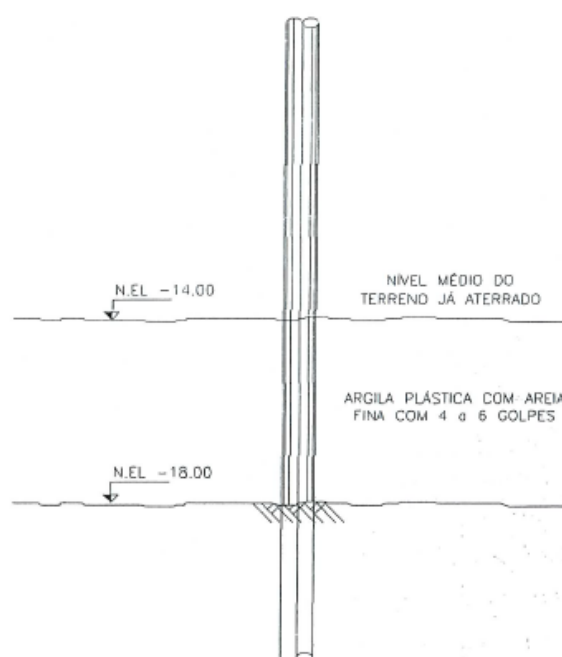


Figura 4.2 Perfil do solo onde localiza-se o Tecon-RS. Fonte: Memória de cálculo do projeto estrutural do Tecon-RS

Alonso (1983), apresenta valores de reação horizontal do solo (Tabela 4.1). Para o cálculo do comprimento de engastamento foi então atribuído o valor para areia fofa submersa.

Tabela 4.1 Valores para reação horizontal do solo. Fonte: Urbano Alonso (1983)

Compacidade da areia ou consistência da argila	Valor de $n_h$ (MN/m <sup>3</sup> )	
	Seca	Submersa
Areia fofa	2,60	1,50
Areia medianamente	8,00	5,00
Areia compacta	20,00	12,50
4.3.1.1 Silte muito fofo	-	0,10 a 0,30
Argila muito mole	-	0,55

#### 4.3.1.2 Elementos Utilizados

Para a modelagem no ANSYS, foi utilizado o elemento de barra Beam189 para as vigas e as estacas e o elemento de casca Shell93 para a laje superior. Esses elementos foram estudados e escolhidos de forma a se adequarem satisfatoriamente à situação, de forma a gerar resultados coerentes.

##### 4.3.1.2.1 Elemento Beam189

O elemento Beam189 (Figura 4.3) foi utilizado para a modelagem tanto das vigas, quanto das estacas. O elemento trabalha de forma linear ou não-linear e é representado em forma de barra, com três nós em três dimensões, baseando-se na teoria de vigas de Timoshenko. Quanto às solicitações, trabalha com esforços normal, de cisalhamento, flexão e torção, apresentando seis graus de liberdade por nó, podendo ser ampliado para um sétimo grau que representa a deformação do material. Os parâmetros de entrada do elemento limitam-se ao perfil de seção transversal, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson (ANSYS, 2009).

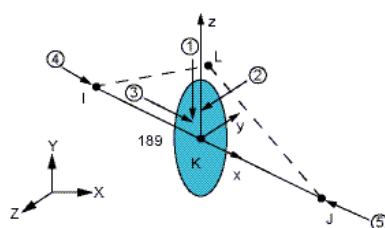


Figura 4.3 Elemento Beam189

#### 4.3.1.2.2 Elemento Shell93

O elemento Shell 93 (Figura 4.4) é um elemento quadrático isoparamétrico, utilizando oito nós com seis graus de liberdade por nó, apresentando translação e rotação nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Desta forma, é um elemento que trabalha com qualidade tanto com superfícies de forma curva como com formas retas. O elemento pode ser discretizado tanto como isotrópico quanto ortotrópico e pode apresentar espessuras variáveis (ANSYS, 2009).

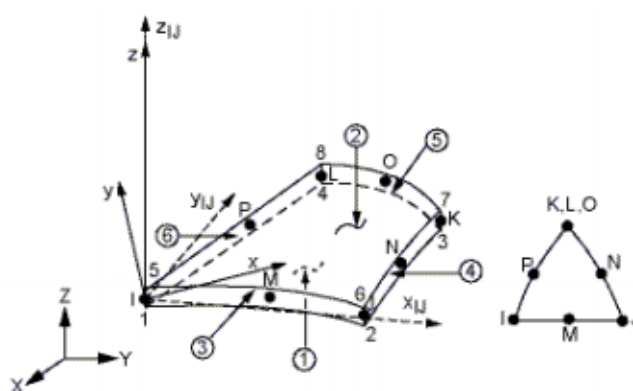


Figura 4.4 Elemento Shell93

#### 4.3.1.2.3 Parâmetros de Rigidez

Os parâmetros de rigidez foram escolhidos tal qual o cais estudado foi executado, apresentando em sua memória de cálculo,  $f_{ck} = 50$  MPa para o concreto; módulo de elasticidade secante  $E_{cs} = 33658$  MPa e coeficiente de Poisson  $\nu = 0,2$ .

### 4.4 DESENVOLVIMENTO DA VERIFICAÇÃO DO MODELO

#### 4.4.1 Pórtico Plano Carregado Sobre Área de influência

No primeiro modelo de comparação, foi usado um método muito usual para pré-dimensionamento de estruturas, que consiste na distribuição de cargas por áreas de influência

da laje sobre as estacas. Separando neste caso, duas faixas longitudinais de estacas, representadas pelas diferentes hachuras da Figura 4.5 A primeira contendo estacas inclinadas (Figura 4.6) e a segunda contendo apenas estacas verticais (Figura 4.7). O modelo foi executado no software Ftool de análise estrutural plana (MARTHA, 2012). Dessa forma, pode-se gerar aproximadamente qual carregamento estaria sendo distribuído para cada estaca. Porém, esse método de cálculo apresenta alguns desafios, como representar a mesma rigidez entre as estruturas estudadas, uma vez que o modelo espacial abrange a laje, as vigas longitudinais e as estacas, formando uma ligação dos três elementos e se aproximando de uma viga T sobre estacas. Outro obstáculo para se obter resultados precisos entre os dois métodos, é que no modelo tridimensional usam-se estacas inclinadas em mais de uma direção, utilizadas nesse tipo de estrutura para absorver esforços horizontais gerados por marés e correntes. Essas situações acabam deixando os resultados do pórtico plano mais imprecisos em relação ao modelo de elementos finitos do ANSYS. Dessa forma, foi utilizada apenas uma carga vertical de  $50 \text{ kN/m}^2$  aplicada sobre a laje para análise, procurando se obter resultados mais precisos.

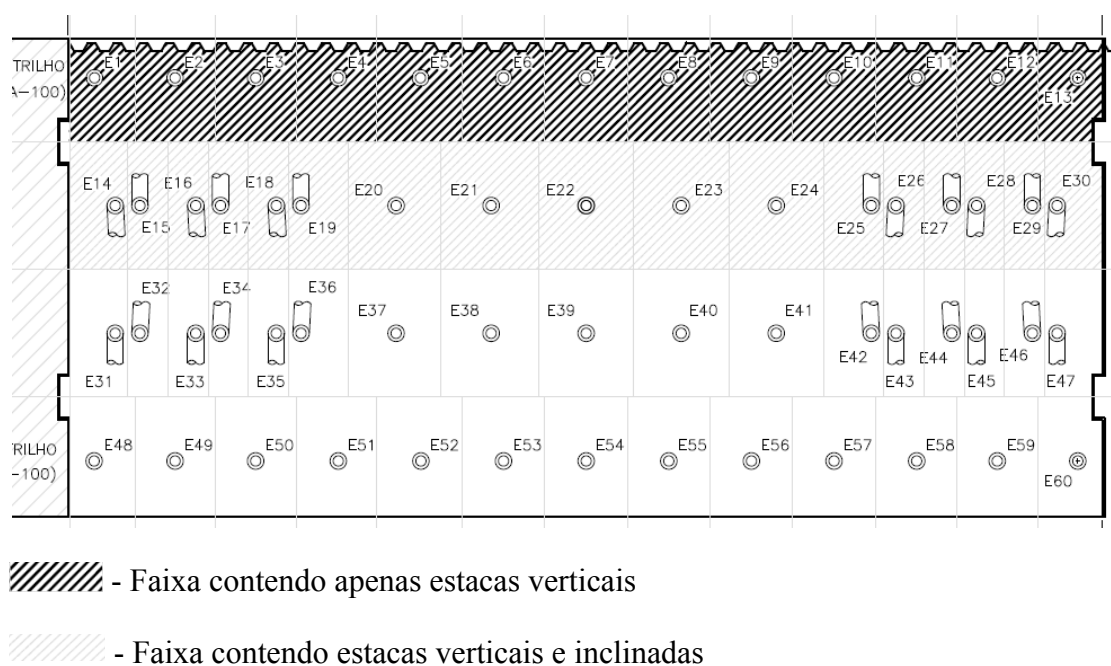


Figura 4.5. Planta baixa demarcando as faixas de áreas de influência utilizadas para construção dos pórticos no software Ftool

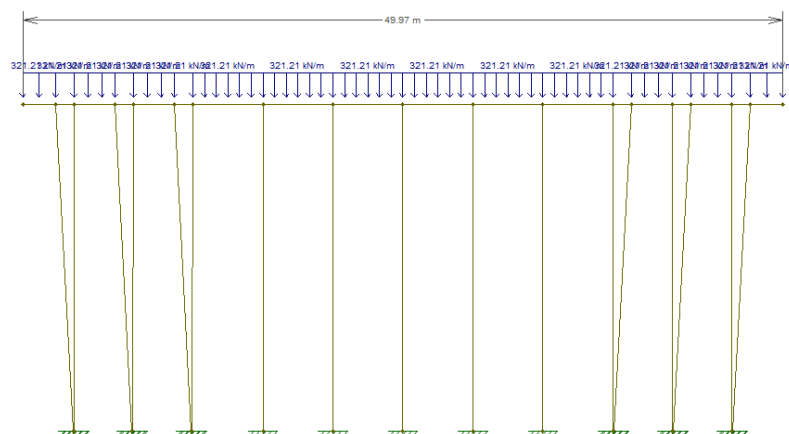


Figura 4.6. Modelo de pórtico no Ftool para uma faixa contendo estacas inclinadas.

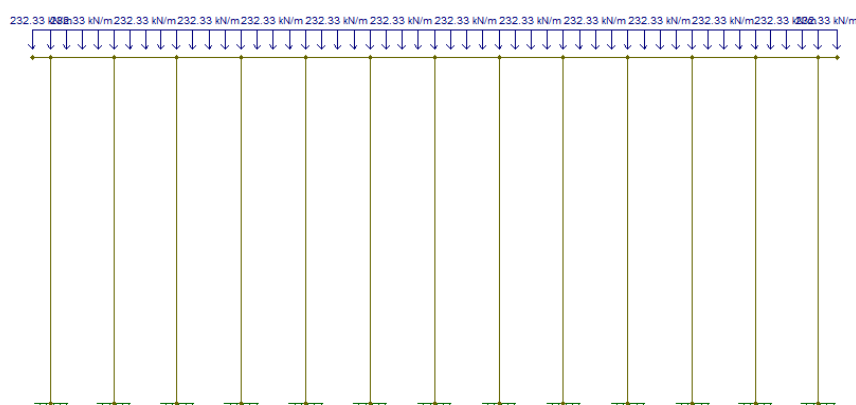


Figura 4.7. Modelo de pórtico no Ftool para uma faixa contendo apenas estacas verticais.

#### 4.4.2 Método de Nökkenteved

Essa etapa da verificação foi desenvolvida para comparar os resultados utilizando uma faixa transversal de estacas do cais (Figura 4.8) utilizando o método de Nökkenteved. Segundo Mason(1982), esse método baseia-se em admitir que o bloco que liga as estacas seja infinitamente rígido e que as estacas devam ser elásticas acompanhando o movimento da laje. Isso deve-se ao fato que o método foi desenvolvido para análise de estacas em blocos de



fundação, que são consideravelmente rígidos frente as estacas. Além disso, as estacas devem estar apoiadas no topo e na base. Nesse caso, para a determinação dos esforços normais nas estacas foi utilizado o método das deformações, aplicando-se à laje movimentos rígidos unitários de translação vertical e horizontal e de rotação. Para isso foi adotada uma espessura maior para a laje do cais de forma que ela ficasse com uma rigidez bastante elevada.

A construção do modelo foi desenvolvida no software Ftool (Figura 4.9), e foi adotado o mesmo comprimento para todas estacas além das mesmas serem articuladas tanto na laje quanto na base. O método consiste em determinar um centro elástico a uma altura  $z_0$  localizada pela intersecção da projeção dos eixos das estacas inclinadas, onde aplicamos os carregamentos e determinamos os esforços normais de cada estaca. Para este caso, foi adotada uma simplificação, considerando todas as estacas iguais e o estaqueamento simétrico. Dessa forma, a carga nas estacas dá-se por (ALONSO, 1989):

$$N_i = V \left( \frac{\cos \alpha_i}{\sum \cos^2 \alpha_i} \right) + H \left( \frac{\sin \alpha_i}{\sum \sin^2 \alpha_i} \right) + M \left( \frac{P_i}{\sum P^2} \right) \quad (4.4)$$

Sendo:  $N_i$  a força normal absorvida pela estaca;  $V$  a força vertical do cais aplicada no centro elástico;  $H$  a força horizontal do cais aplicada no centro elástico;  $M$  o momento produzido pelas forças  $V$  e  $H$  e  $\alpha$  o ângulo entre a estaca e o eixo vertical. Destaca-se que nesta etapa foi adotado o mesmo tipo de carregamento do item 4.4.1 Portanto, além de não existir carregamento horizontal, o momento é nulo, e, considerando-se o pórtico simétrico, resulta na equação apenas o cálculo que utiliza a força vertical.

Considerando-se que, embora as estacas apresentem-se simétricas, isso não acontece com a laje. Desta forma, para uma primeira verificação de consistência na aplicação do modelo, foi adotada a Eq. (4.4) comparando-se os resultados obtidos com um modelo semelhante no FTool. Demonstrada a validade, em um segundo momento a não simetria da laje foi considerada e novos resultados para esta condição foram obtidos para comparação com o modelo do ANSYS.

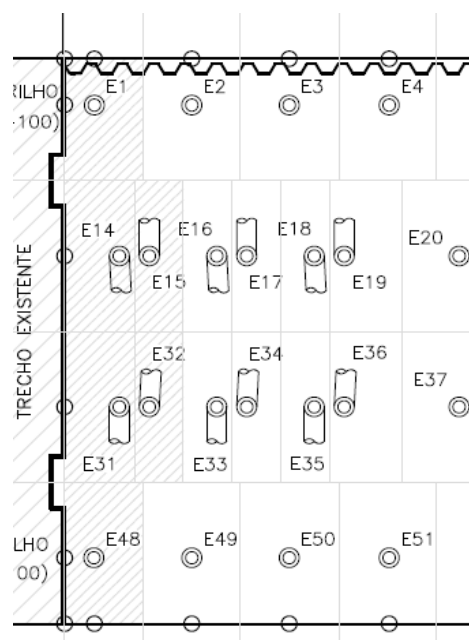


Figura 4.8. Planta baixa demarcando a faixa de área de influência utilizada para construção do pórtico no Ftool para o método de Nöckenteved.

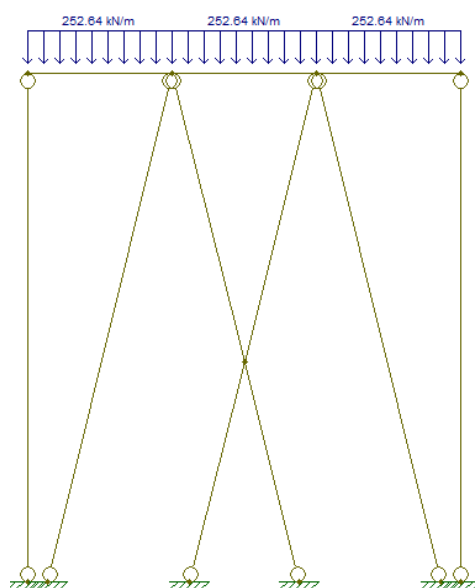


Figura 4.9. Modelo de pórtico desenvolvido no Ftool para o método de Nöckenteved.

#### 4.4.3 Modelo Tridimensional Utilizando o Método de Grelhas e Pórticos(TQS)

Para esta etapa da verificação, o intuito foi o de comparar os resultados de dois modelos tridimensionais: o modelo principal baseado no método dos elementos finitos com um modelo baseado no método de grelha e pórtico. Para isso, o mesmo foi desenvolvido no software TQS (Figura 4.10), que é um software para análise e cálculo de estruturas de concreto-armado, concreto-protendido, alvenaria estrutural e estruturas pré-moldadas (TQS, 2011). Nessa comparação a análise foi realizada em duas fases. A primeira com uma carga vertical de 50 kN/m<sup>2</sup> como nos outros modelos, e, a segunda, com apenas duas cargas horizontais concentradas de 1000 kN aplicadas nas posições de projeto das defensas (Figura 4.11).

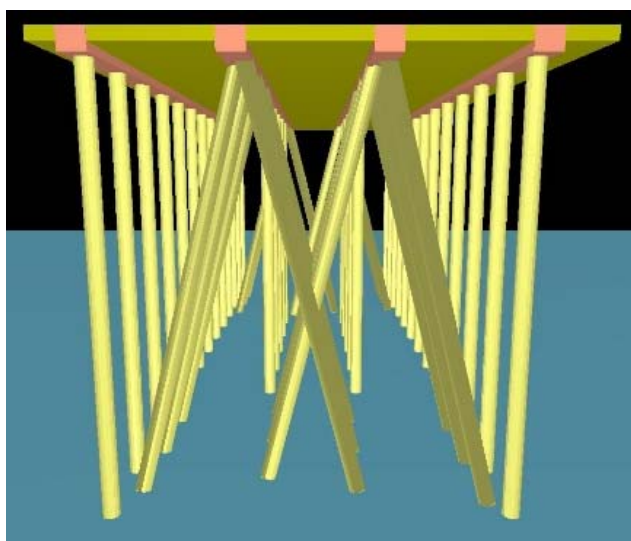


Figura 4.10: Modelo tridimensional desenvolvido no software TQS.

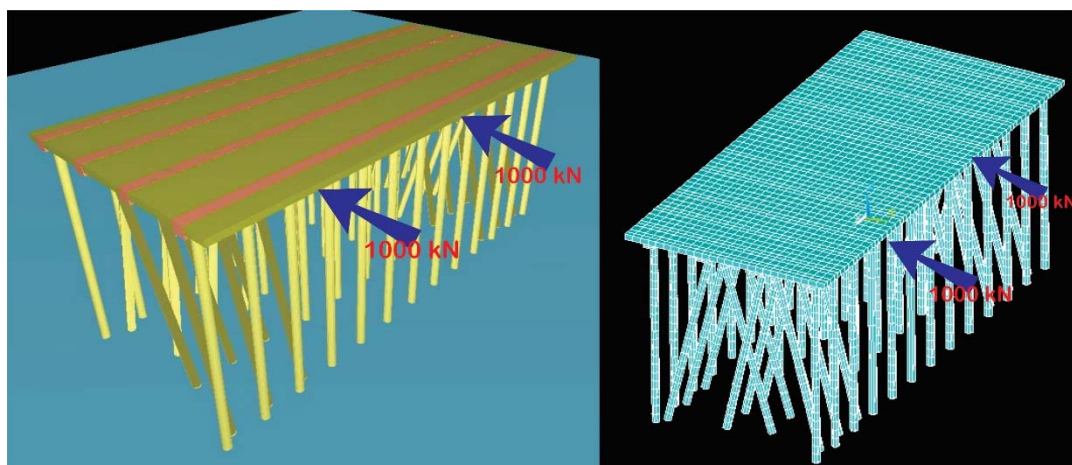


Figura 4.11: Modelos tridimensionais, TQS e ANSYS.

#### 4.4.4 Malhas e Convergência

Além da análise dos resultados do modelo discretizado no ANSYS, comparado-o com os outros modelos, foi necessária uma verificação do mesmo refinando sua malha. Isso, para assegurar que com os elementos utilizados existisse uma convergência de resultados tanto para uma malha mais espaçada como para uma mais refinada.

Sendo assim, com o intuito de demonstrar a convergência do modelo, foram refinadas 4 diferentes malhas quadradas, sendo elas: 1,00 m x 1,00 m; 0,50 m x 0,50 m; 0,25 m x 0,25 m e 0,10 m x 0,10 m.

#### 4.4.5 Resultados da Verificação

##### 4.4.5.1 Malhas e Convergência

Pode-se verificar no gráfico apresentado (Figura 4.12), que os resultados, independente da malha utilizada, convergem para os mesmos valores, verificando a modelagem adotada com os elementos escolhidos na utilização do Método dos Elementos Finitos e, portanto, foi adotada a malha de 1,0 m x 1,0 m por levar o menor tempo de processamento.

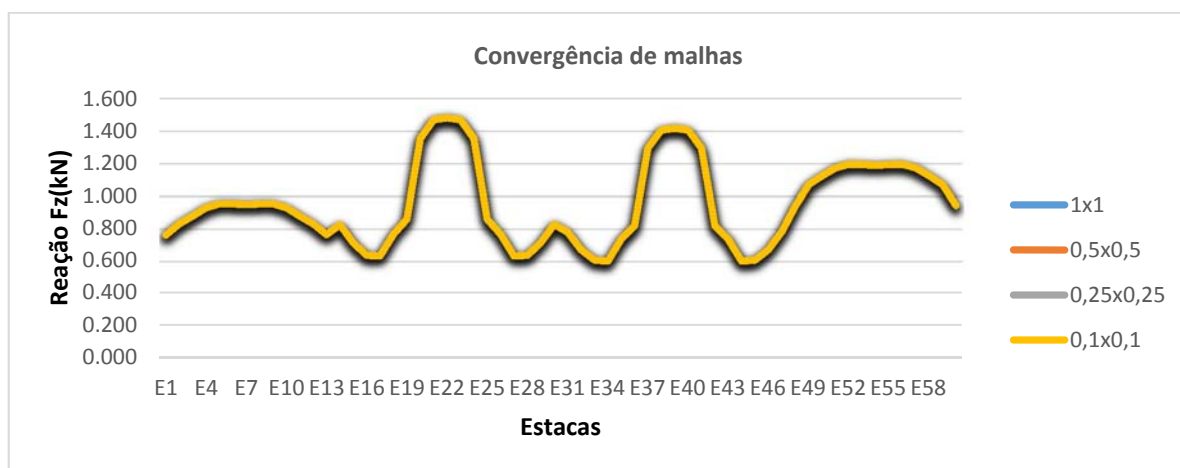


Figura 4.12. Convergência das malhas sobre carga vertical.

#### 4.4.5.2 Pórtico Plano Carregado Sobre Área de Influência

Pode-se verificar pelos resultados apresentados nos gráficos das “Figuras. 4.13 e 4.14”, que, comparando o modelo principal do ANSYS e o modelo de pórtico carregado para uma faixa longitudinal de estacas - contendo estacas inclinadas -, que os resultados das reações tanto na vertical  $z$ , como horizontal  $x$ , apresentam valores muito próximos. Isso demonstra a coerência desses resultados. Além disso, para as reações no sentido  $y$  e para os momentos, foi verificada a sua tendência para zero.

Para uma faixa longitudinal contendo apenas estacas verticais, verificou-se que as reações verticais são praticamente as mesmas (Figura 4.15) para os dois modelos o que verifica a malha 3d.

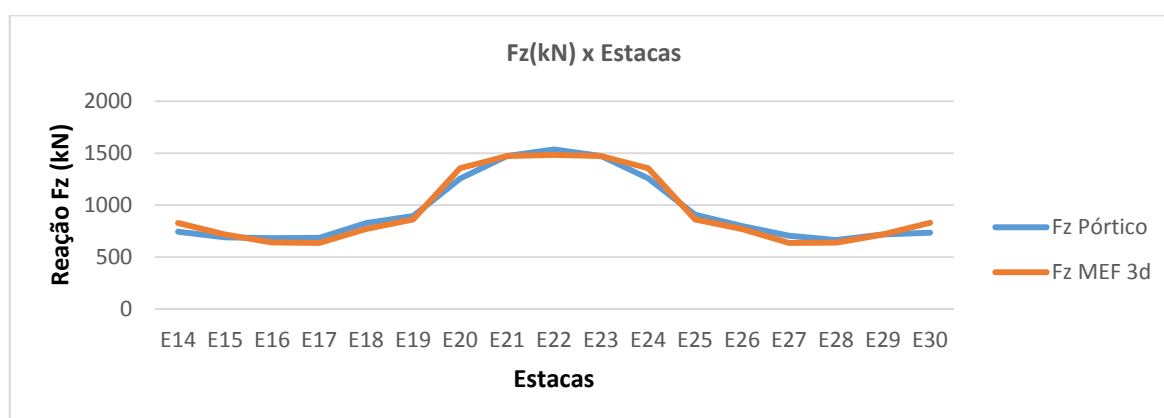


Figura 4.13. Gráfico reação  $F_z$  x Estacas, comparando resultados entre modelo de pórtico plano e tridimensional por MEF para trecho contendo estacas inclinadas.

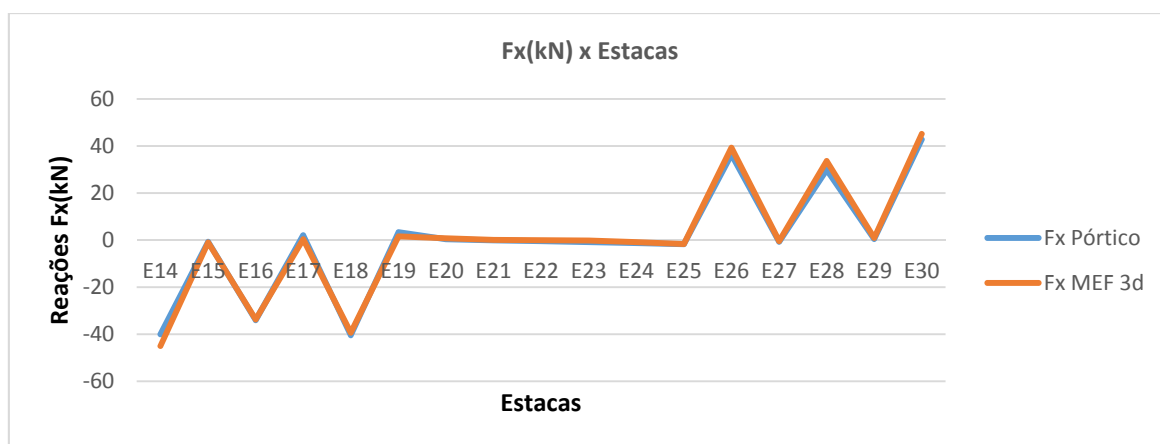


Figura 4.14 Gráfico reação  $F_x$  x Estacas, comparando resultados entre modelo de pórtico plano e tridimensional por MEF para trecho contendo estacas inclinadas.

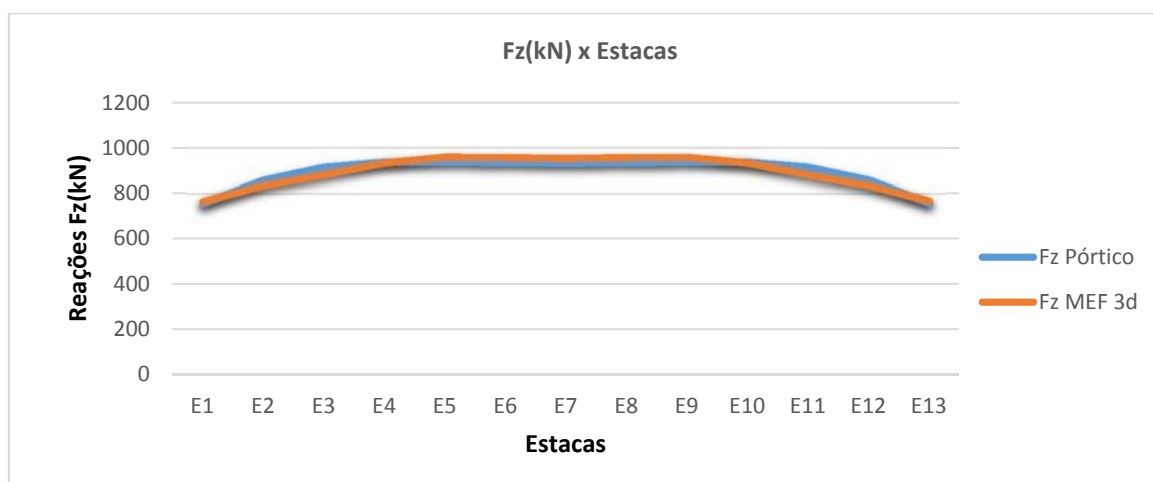


Figura 4.15. Gráfico reação  $F_z$  x Estacas, comparando resultados entre modelo de pórtico plano e tridimensional por MEF para trecho contendo apenas estacas verticais.

#### 4.4.5.3 Método de Nökkenteved

Os resultados obtidos na Tabela 4.2, representam o desenvolvimento da Eq. (4.4) no modelo no Ftool apresentado na Figura 4.9. Comparando com os resultados dos esforços normais nas estacas do pórtico apresentados na Tabela 4.3, verifica-se a adequação do modelo com a consideração de estacas e laje simétricos. A Tabela 4.3, por sua vez, apresenta os resultados considerando a laje na sua condição real. A diferença relativa dos resultados apresentada em porcentagem máxima foi da ordem de 4 %. Isto demonstra a proximidade entre

os resultados dos dois métodos, levando-se em conta o tipo de estrutura de engenharia.

Tabela 4.2 Resultados dos esforços normais nas estacas obtidos do pela equação 1 e pelo método de Nökkenteved

<b>Estacas</b>	<b>Ni (kN) Equação (4.4)</b>	<b>Ni (kN) Ftool</b>	<b>Diferença relativa (%)</b>
<b>E1</b>	828,5	816,88	1,40
<b>E14</b>	781,2	792,51	1,45
<b>E15</b>	778,8	792,51	1,76
<b>E31</b>	778,8	792,51	1,76
<b>E32</b>	778,8	792,51	1,76
<b>E48</b>	825,8	816,88	1,08

Tabela 4.3 Força normal nas estacas pelo método de Nökkenteved.

<b>Estacas</b>	<b>Ni (kN) Ftool</b>	<b>Ni (kN) Tridimensional ANSYS</b>	<b>Diferença relativa(%)</b>
<b>E1</b>	878,3	898,14	2,26
<b>E14</b>	898,3	875,95	2,49
<b>E15</b>	895,9	876,14	2,21
<b>E31</b>	970	936,3	3,47
<b>E32</b>	966,8	928,88	3,92
<b>E48</b>	1104,1	1086,4	1,60

#### 4.4.5.4 Modelo Tridimensional Utilizando o Método de Grelha e Pórtico(TQS)

Os resultados apresentados pelo TQS com os do modelo do ANSYS ficaram muito aproximados, demonstrando coerência de resultados para reações nas direções x, y e z. As Figuras 4.16 a 4.21 correspondem à aplicação da carga vertical e as Figuras 4.22 a 4.24 à carga horizontal. Algumas diferenças são verificadas nas Figuras. 4.19 e 4.20, porém, para a ordem de carregamentos e reações, estes resultados são considerados pequenos e residuais nestas estacas. Estas diferenças se justificam pela dificuldade de representar exatamente a mesma rigidez entre os dois modelos com softwares distintos (TQS e ANSYS). Por outro lado, mesmo apresentando diferenças, as linhas seguem a mesma tendência de valores e isso é satisfatório.

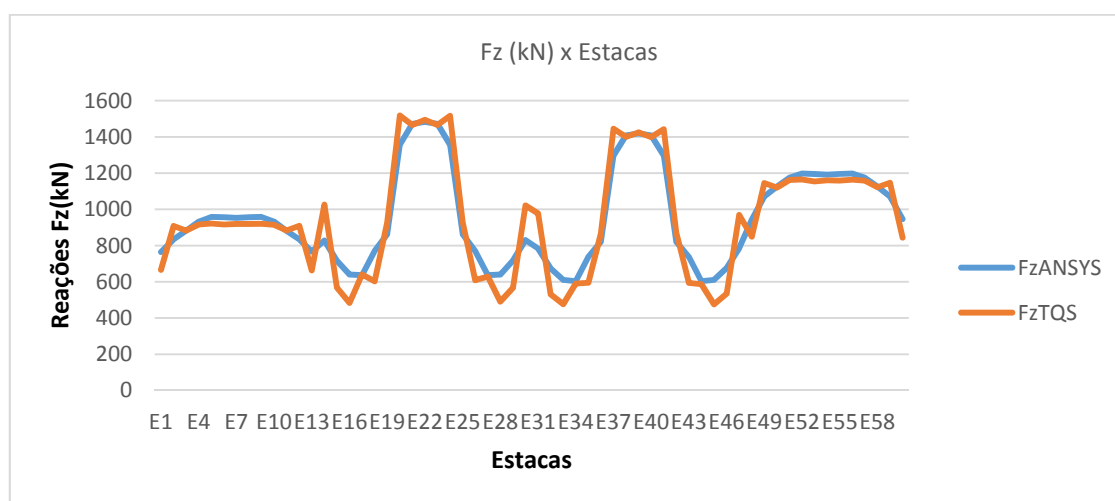


Figura 4.16. Gráfico reação Fz x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga vertical.



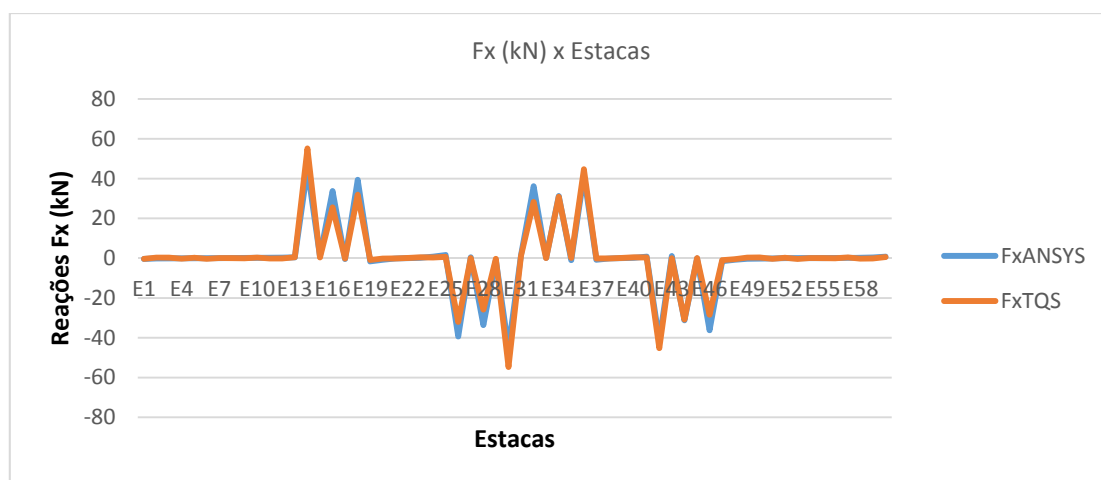


Figura 4.17. Gráfico reação  $F_x$  x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga vertical.

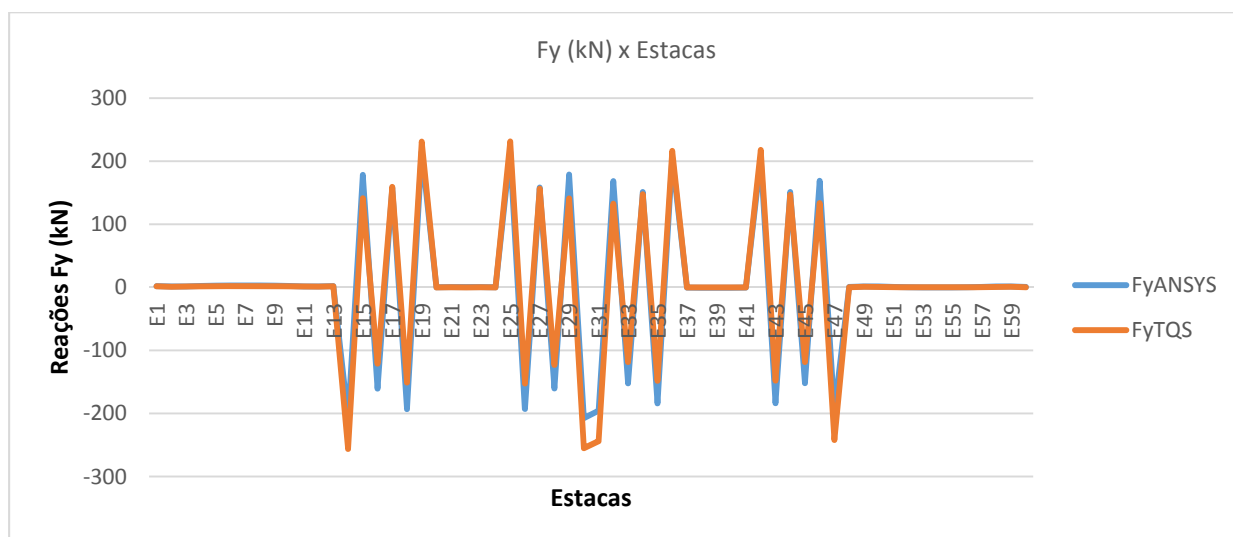


Figura 4.18. Gráfico reação  $F_y$  x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga vertical.

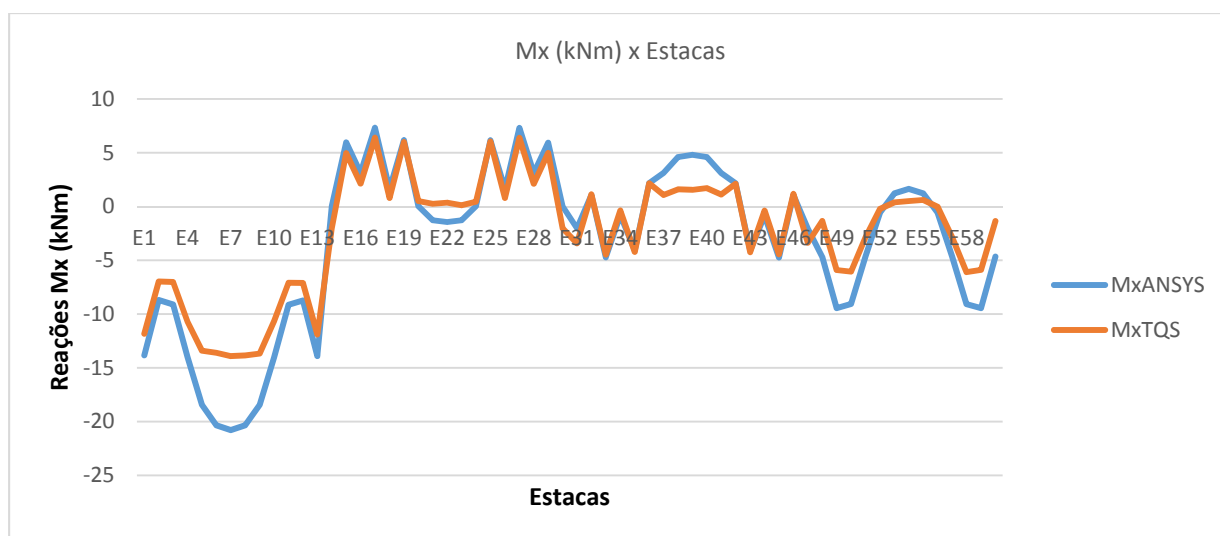


Figura 4.19. Gráfico reação Mx x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga vertical.

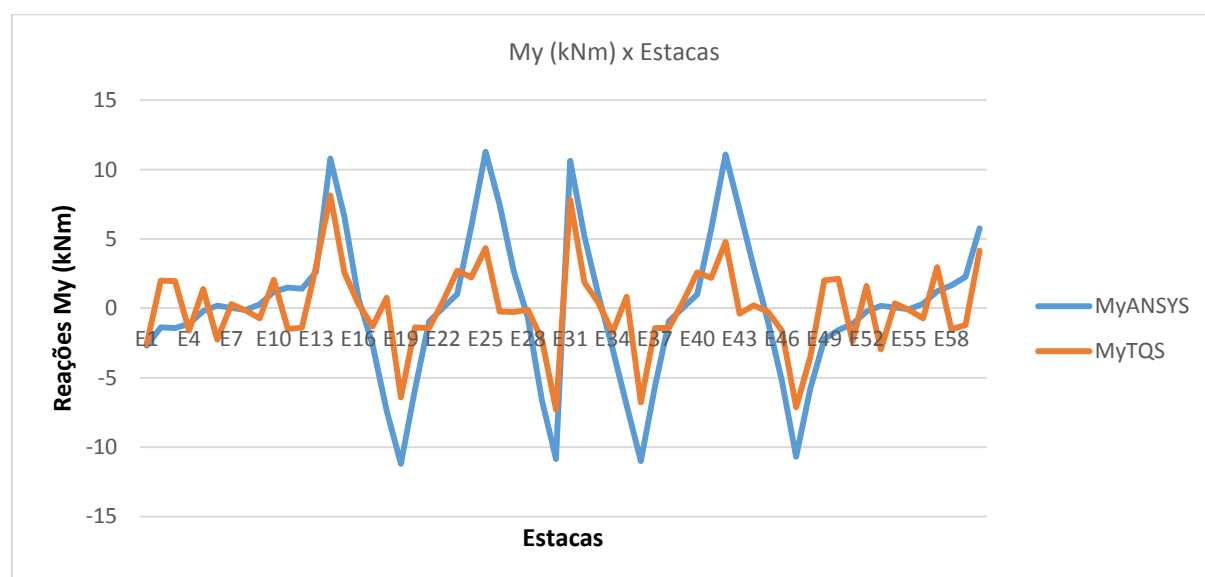


Figura 4.20. Gráfico reação My x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga vertical.

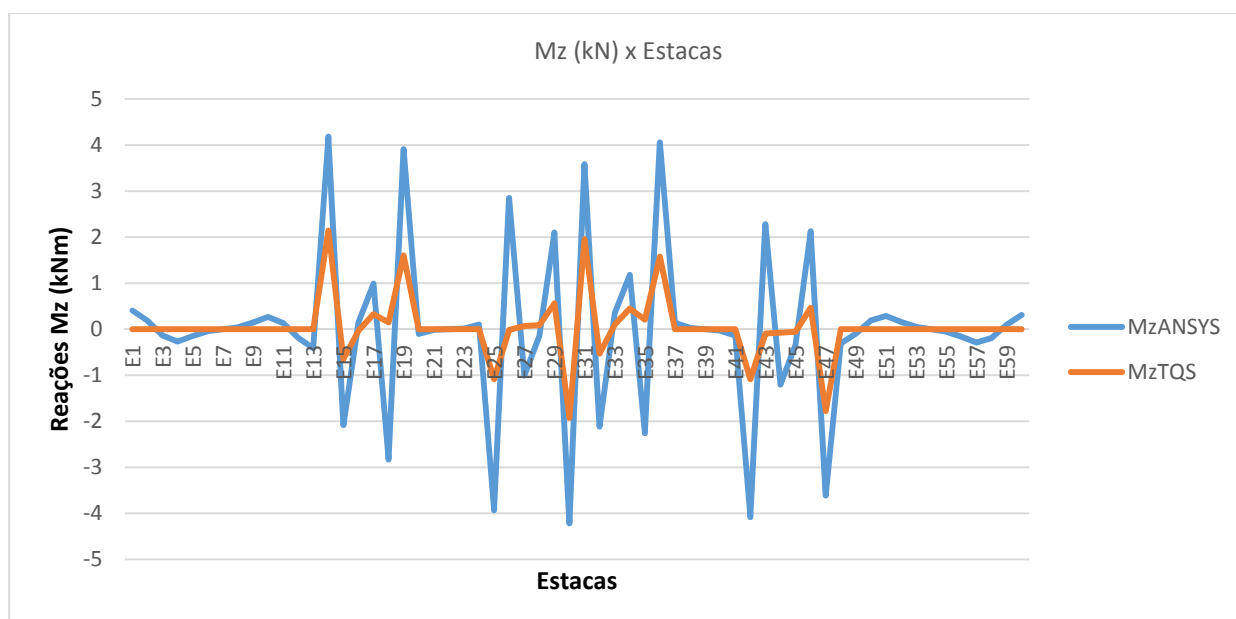


Figura 4.21. Gráfico reação  $M_z$  x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga vertical.

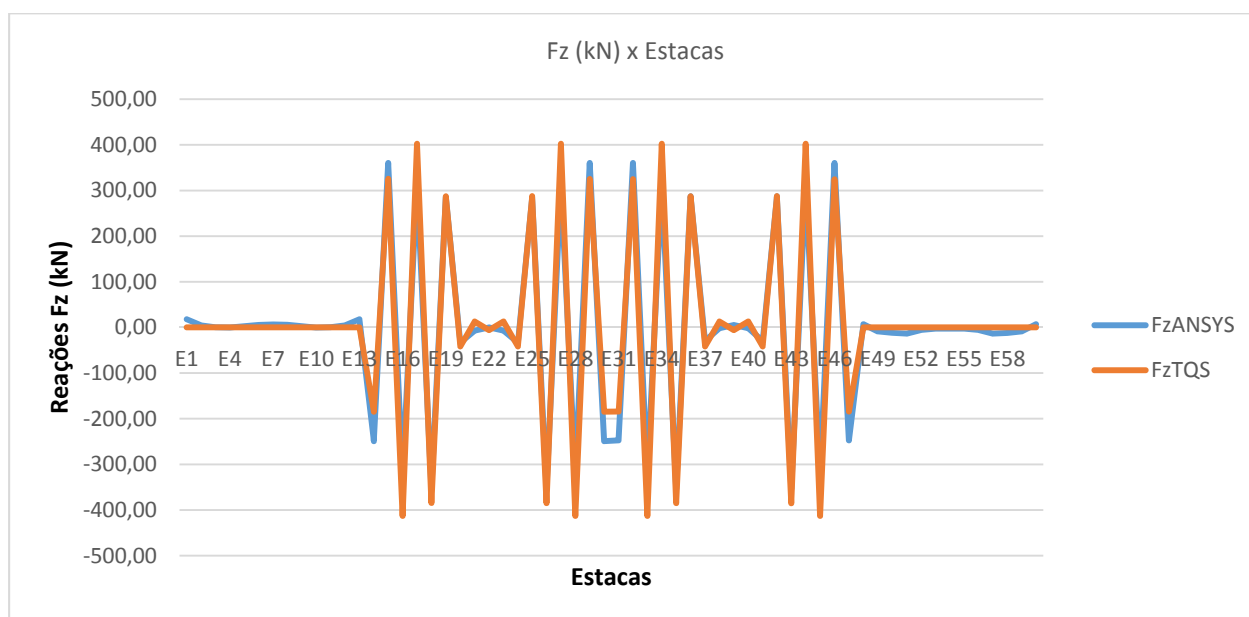


Figura 4.22. Gráfico reação  $F_z$  x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga horizontal.

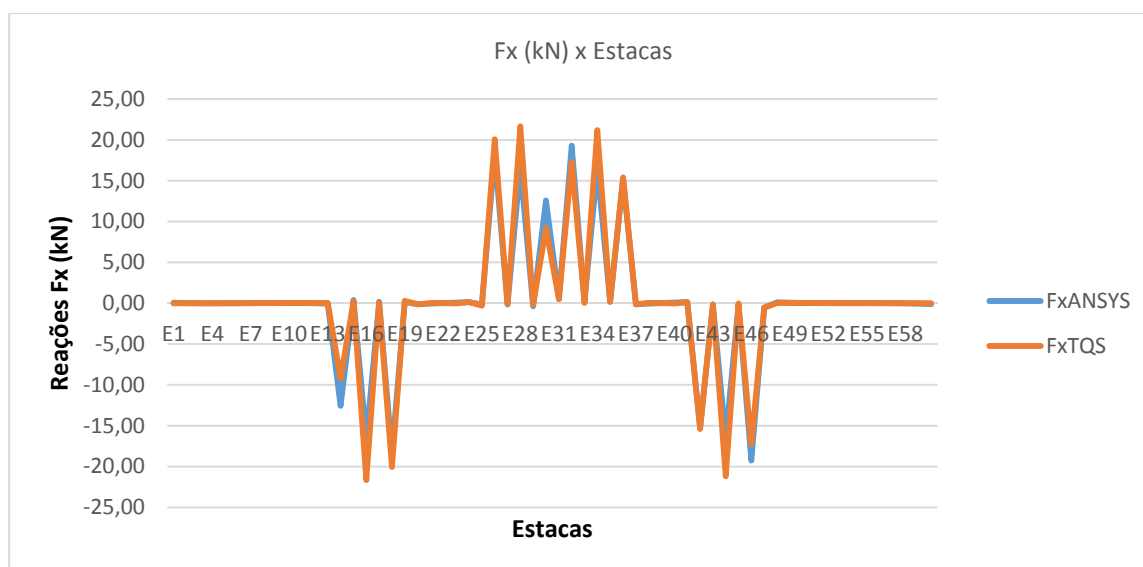


Figura 4.23. Gráfico reação Fx x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga horizontal.

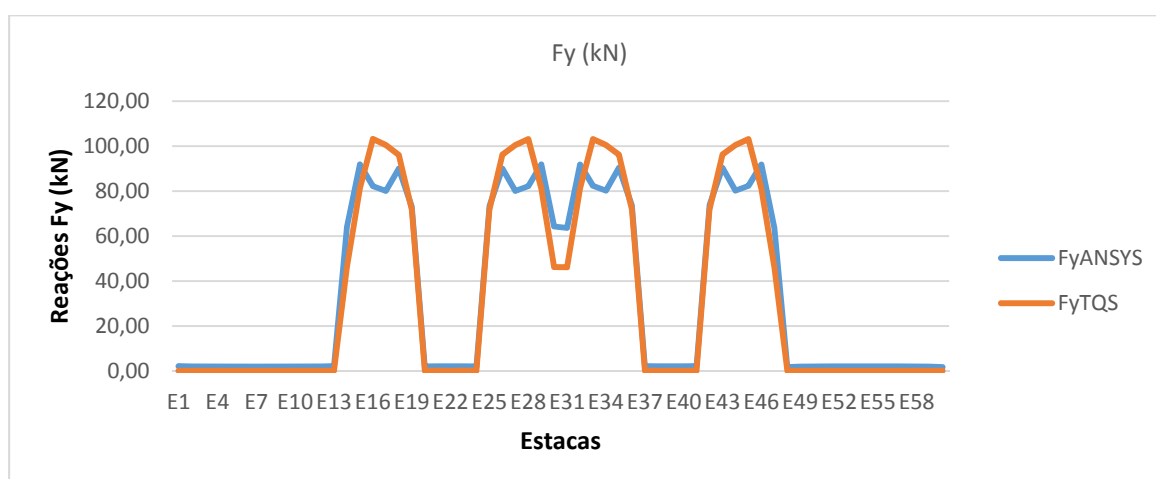


Figura 4.24. Gráfico reação Fy x Estacas, comparando resultados entre os modelos tridimensionais com carga horizontal.

#### 4.5 CONCLUSÕES DA VERIFICAÇÃO

Com base nos resultados apresentados, conclui-se, que o modelo tridimensional desenvolvido no software ANSYS apresenta distribuição coerente de cargas, tanto no que se refere a carga vertical, quanto a horizontal. Assim, considera-se o mesmo calibrado e apto a receber as diferentes combinações de esforços gerados sobre um cais de contêineres.

#### 4.6 OBSERVAÇÃO SOBRE O MODELO

A laje de cobertura existente no cais do TECON-RS é do tipo Pi, portanto, na continuidade da pesquisa, achou-se interessante atribuir uma espessura que atingisse uma rigidez equivalente da laje Pi, para a direção de maior rigidez, em uma laje de seção retangular (Figura 4.25). Também, foi adicionado ao modelo inicial, duas vigas transversais, na posição onde localizam-se as defensas do cais, de forma a dar rigidez na absorção das forças de atracação e amarração. Estas vigas foram adicionadas com as mesmas dimensões de seção transversal utilizadas para as vigas longitudinais. Como estas alterações se remetem a uma pequena variação de espessura da placa em alguns trechos, sem alterar a malha de distribuição já disposta no modelo apresentado, não se viu necessário refazer a verificação.

a) Laje Pi e rigidez equivalente;

Momento de Inércia da seção:  $0,017 \text{ m}^4$ .

Momento de Inércia de laje retangular equivalente:  $0,018 \text{ m}^4$  para  $h = 0,5 \text{ m}$

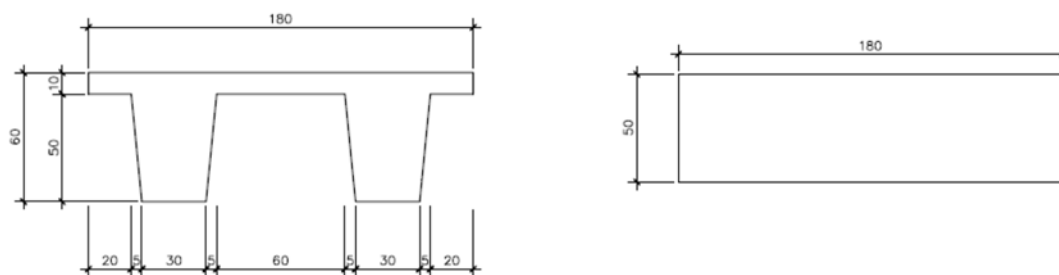


Figura 4.25 – Seção transversal da laje executada no Tecon e seção transversal da laje utilizada no modelo do trabalho.

b) Vigas transversais adicionadas ao ponto onde localizam-se as defensas e recebem cargas horizontais. (Figura 4.26)

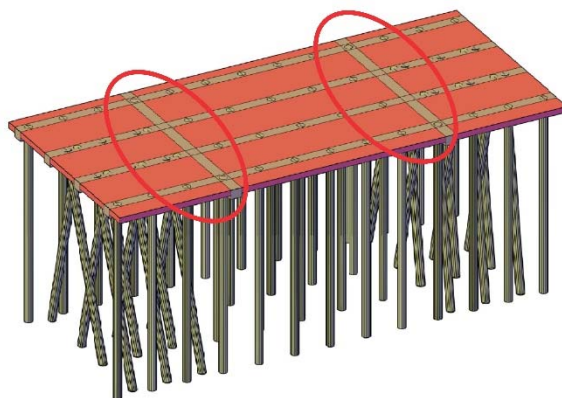


Figura 4.26 – Vigas transversais adicionadas ao modelo tridimensional.

## 5 ESTUDO DE CASO – O TECON DE RIO GRANDE – RS

### 5.1 O TECON-RS

Posicionado no complexo portuário denominado Superporto do Rio Grande, o terminal de contêineres de Rio Grande é conhecido como um dos principais da América Latina. O porto localiza-se no ponto geográfico central quando referenciado a uma distância de Buenos Aires a Paranaguá (Figura 5.1). Segundo o próprio website do terminal, o porto hoje é responsável por 98% da movimentação de carga de contêineres do estado do Rio Grande do Sul. (<http://www.tecon.com.br/>).

Em 2008, o TECON-RS (Figuras 5.2 e 5.3) passou por um processo de ampliação de 250 m do cais com 5 novos módulos, totalizando 900 m. Com isto aumentou consideravelmente a movimentação de carga, evitando ou diminuindo muito a espera dos navios fora do berço para atracar.

A geometria aplicada a ampliação do cais foi estudada a partir do projeto estrutural dos módulos. Este trabalho baseou-se no módulo 5 (Figura 5.4) de ampliação do cais, de forma a analisar um projeto real executado em um porto de grande importância para o país. O modelo não é 100% fiel ao TECON-RS, uma vez que foram feitas algumas simplificações no projeto, como a não utilização de uma cortina de concreto na ligação do cais com a retroárea presente no porto, ou a substituição das lajes pré-moldadas Pi por placa retangular como será demonstrado.

A estrutura do módulo estudado é do tipo laje sobre estacas, executados em concreto-armado, com a presença de duas defensas e cabeços de amarração Figura (5.5).

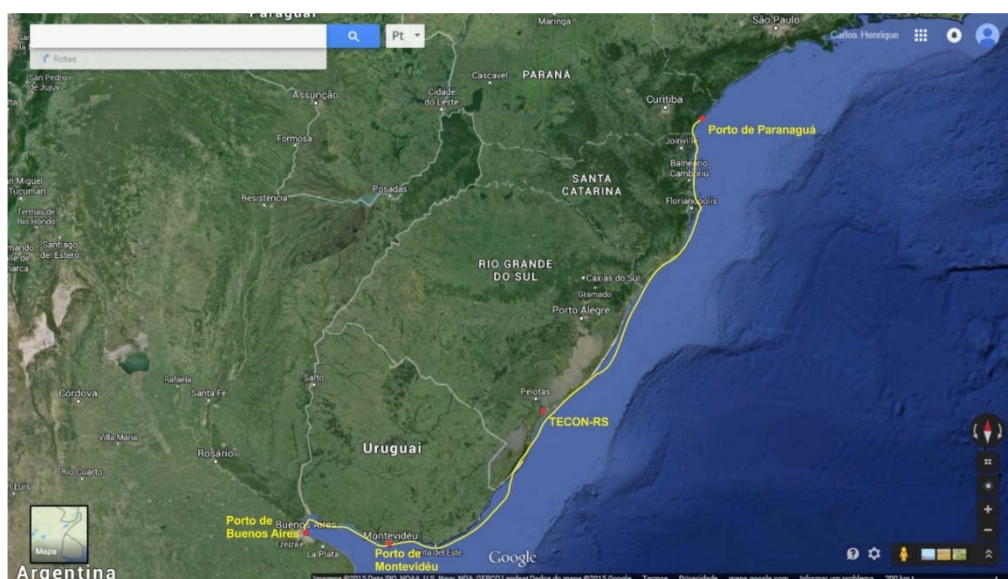


Figura 5.1 – Localização do TECON-RS. Fonte: Google maps (2015)

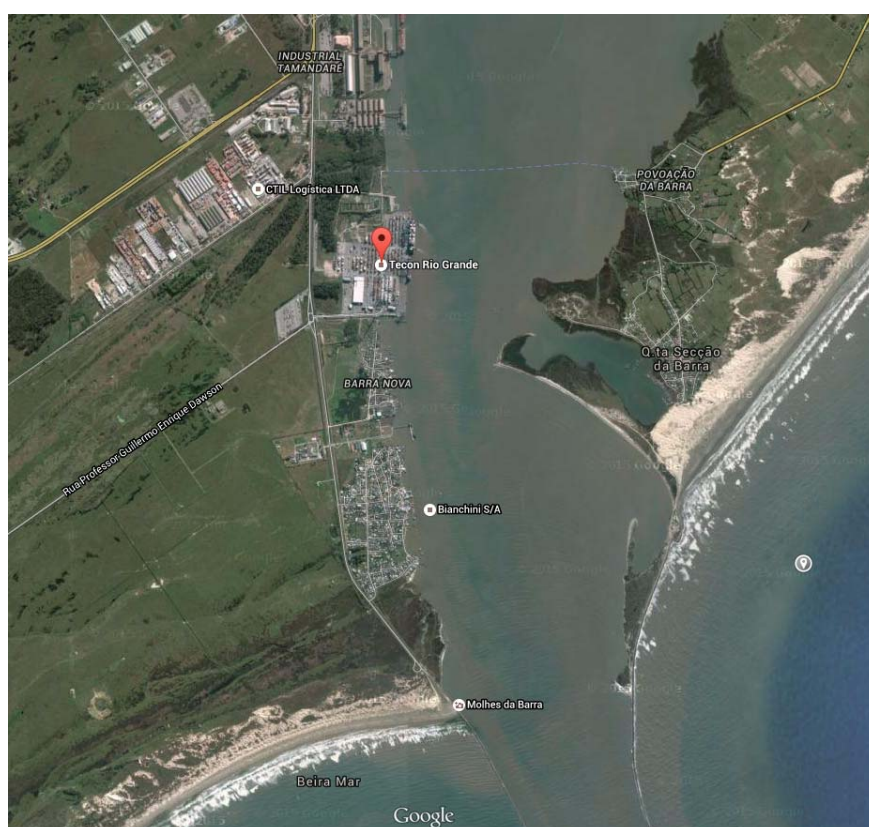


Figura 5.2 Tecon-RS Fonte: Google maps (2015)





Figura 5.3 – Imagem de satélite do TECON-RS. Fonte: Google maps (2015)



Figura 5.4. Foto de um dos berços de ampliação do TECON-RS. Fonte: Diones de Souza Dani.

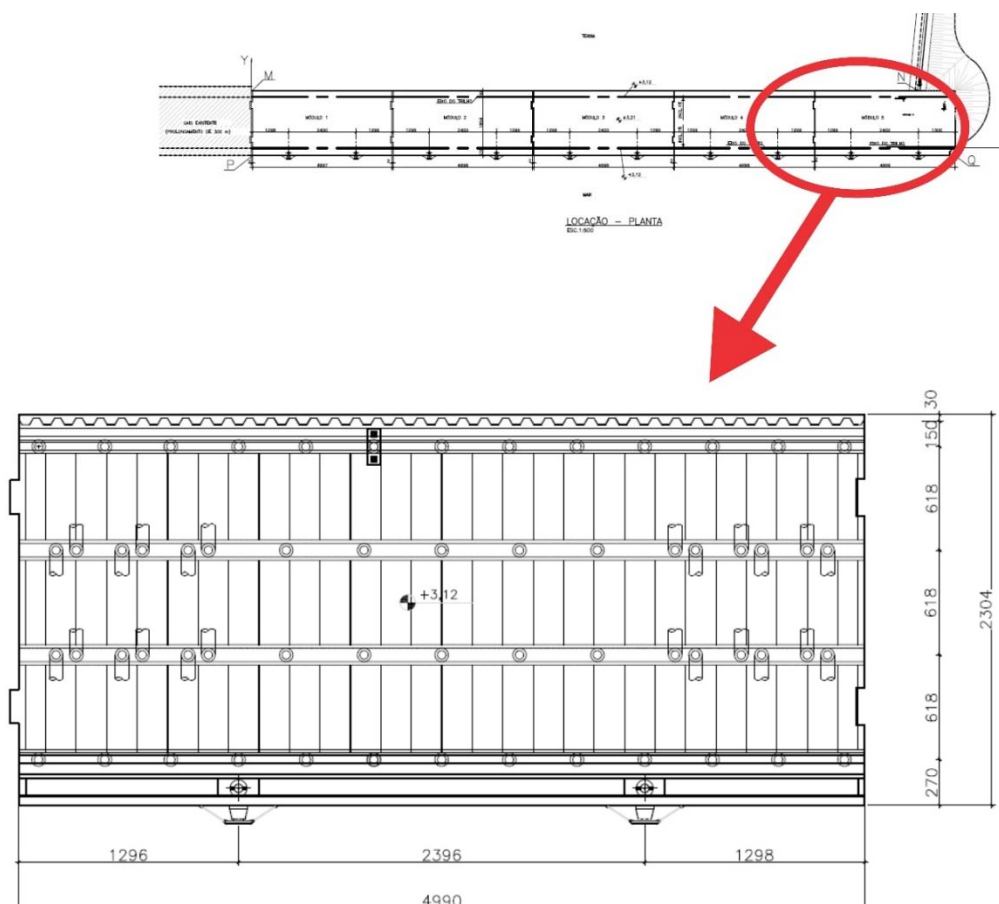


Figura 5.5 – Módulo 5 do Tecon-RS. Fonte: Memória do projeto estrutural do Tecon-RS

## 5.2 AÇÕES CONSIDERADAS NA ESTRUTURAS DO CAIS

Os tipos de ações que foram consideradas na análise do cais são de natureza permanente (peso próprio e pavimentação) e variáveis (sobrecarga, equipamentos, amarração, atracação e temperatura).

### 5.2.1 Peso próprio:

Para o peso próprio da estrutura, o material utilizado foi o Concreto-Armado, com um peso específico de  $25 \text{ kN/m}^3$  de acordo com a NBR 6120 (1980).

### 5.2.2 Pavimentação:

No caso do estudo aqui desenvolvido, como o cais é baseado no TECON-RS, verificou-se no projeto estrutural, o material utilizado para pavimentação.

Constatou-se (Figura 5.6) 40 cm de enchimento de areia com pavimentação de bloket e assim atribuindo:

Peso específico da areia:  $18 \text{ kN/m}^3$ ;

Peso específico do broket:  $24 \text{ kN/m}^3$ ;

Espessura da camada de areia: 0,40 m;

Espessura da camada de broket: 0,08 m.

Carga de pavimentação adotada:  $9 \text{ kN/m}^2$ .

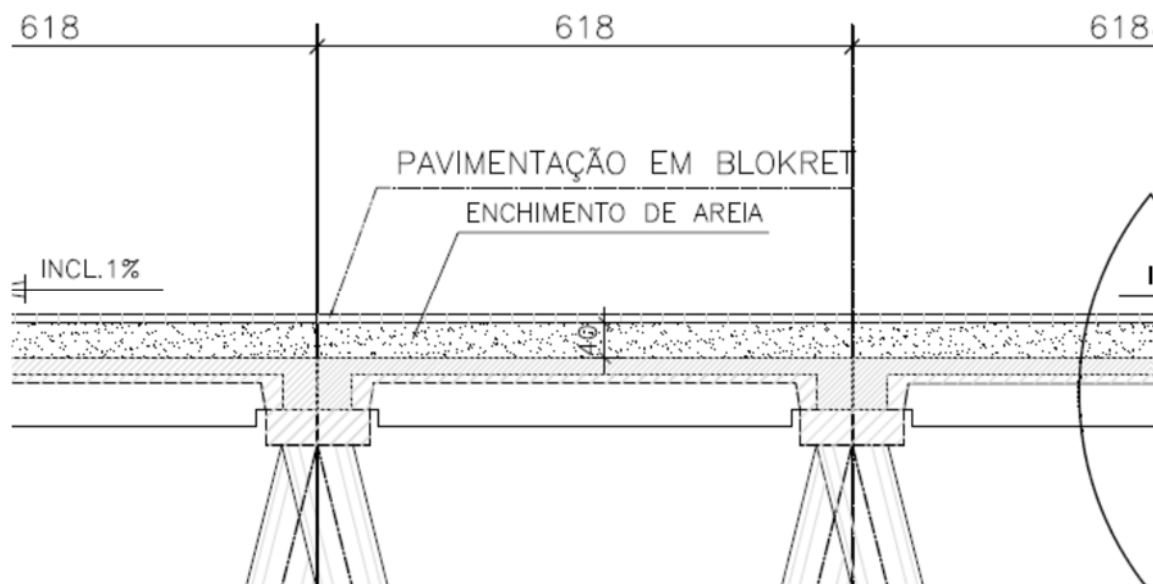


Figura 5.6 – Detalhe com tipo de pavimentação executada no Tecon-RS. Fonte: Memória de cálculo do Tecon-RS

### 5.2.3 Sobrecarga:

Para a análise desta pesquisa foi adotado uma sobrecarga distribuída sobre a laje de cobertura do cais de  $40 \text{ kN/m}^2$ , por se tratar de um cais de contêineres. Esta carga é confirmada por Thoresen (2014), quando especifica que locais que estejam sujeitos a tráfego de contêineres devem ser dimensionados com carga de no mínimo  $40 \text{ kN/m}^2$ .

### 5.2.4 Equipamentos

Como a NBR 9782:1987 especifica que se utilize pelo menos carregamentos de dois tipos de guindastes distintos na análise estrutural e, verificando os tipos de equipamentos dispostos no cais do TECON-RS, optou-se pela utilização do Portainer e o Mobile Harbour

Crane, por se tratarem dos equipamentos a transportarem e distribuírem o maior esforço para o cais dentro todos presentes atualmente no Porto.

### 5.2.5 Portêiner

De acordo com o o website do TECON-RS, o cais dispõe de 6 porteineres do tipo post-panamax (Figura 5.7). Como o tabuleiro do cais dispõe de um comprimento de aproximadamente 50 m, foi colocada essa carga em 7 posicionamentos diferentes (Figura 5.8), considerando a possibilidade de conter 1, 2, ou até mesmo 3 portêiners atuando juntos no cais. Para o trabalho em questão, foi utilizado guindaste de 8 rodas, com 500 kN/roda espaçadas de 1 m cada uma (Figura 5.9), como sugere a norma inglesa BS 6349 (2000). O catálogo da empresa Liebherr (2012) indica algo bem próximo também (Tabela 5.1).



Figura 5.7 – Guindastes Porteiner do cais do Tecon-RS Fonte:

<http://www.conexaomaritima.com.br/index.php?option=noticias&task=detalhe&Itemid=22&id=2110>

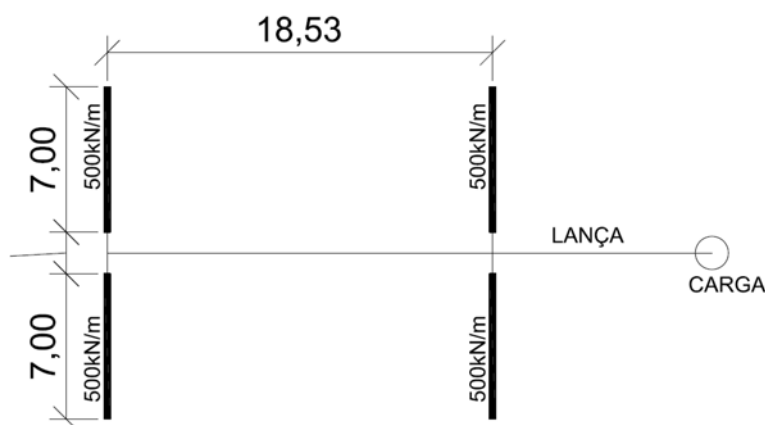


Figura 5.8 Carregamento do guindaste portêiner aplicado ao modelo.

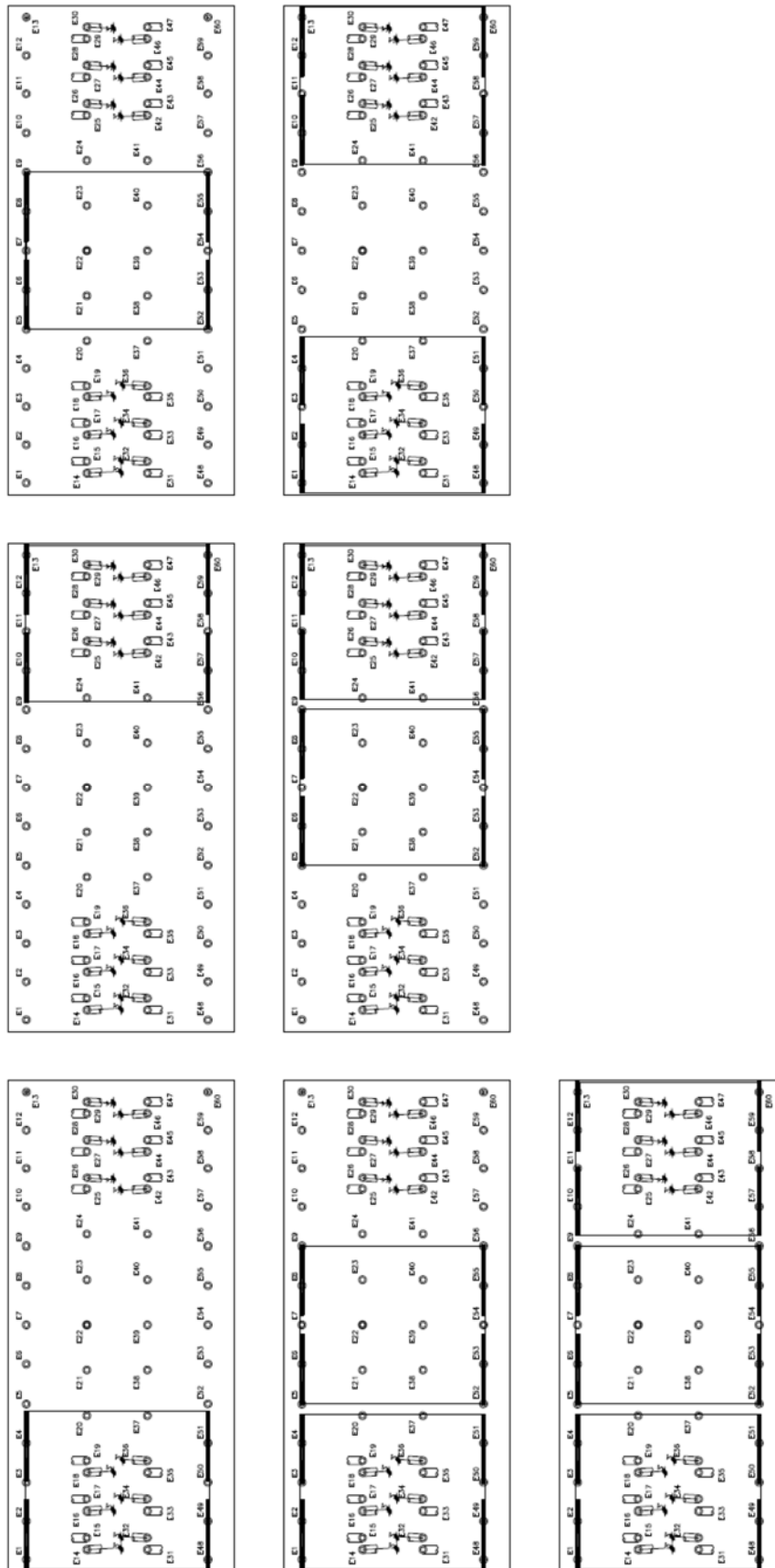


Figura 5.9 – Posição dos carregamentos do guindaste Portainer aplicados ao modelo.

Tabela 5.1 – Características do Guindaste Portêiner Post-Panamáx. Fonte: Liebherr (2012)

<b>Typical Post Panamax Crane *</b>	
B Outreach	40.00 - 46.00m
D Lift Height	30.00 - 35.00m
SWL Capacity	40/50T Single - 65T Twin
Hoisting Speed	60 / 150 m/min
Trolley Speed	180 - 210 m/min
Travel Speed	45 m/min
Wheel Load **	40 - 55T Per Meter

\*\* Based on 8 Wheels per Corner at 1.00m Spacing

### 5.2.6 Mobile Harbour Crane

De acordo com o website do TECON-RS (<http://www.tecon.com.br/>), o cais dispõe de 2 guindastes móveis, com capacidade para 100 t de carga. O pior posicionamento do MHC, é quando a lança se encontra carregada e posicionada a 45° (Figura 5.10), de acordo com as dimensões utilizadas, retiradas do catálogo da Terex (2010) (Figura 5.11). Nesta posição, apenas 2 patolas ficam sujeitas ao momento gerado por este carregamento. Para adotar o carregamento, baseou-se também no mesmo catálogo, no gráfico da Figura 5.12, que demonstra que para o comprimento de 20 m de lança em projeção horizontal, se obtém o maior esforço.

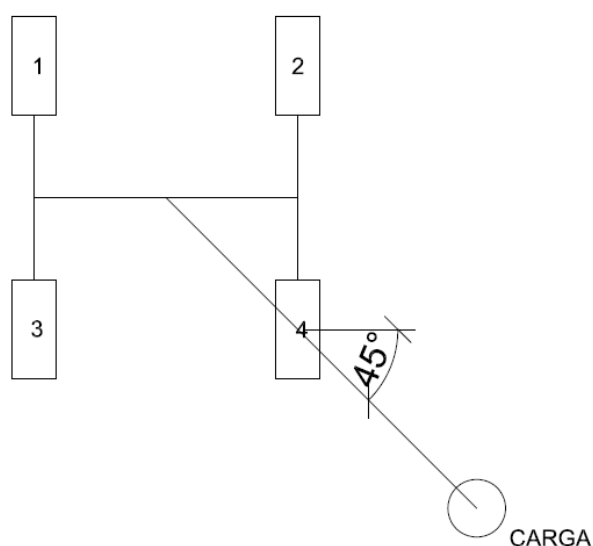


Figura 5.10 – Situação de maior carregamento do MHC considerando 4 apoios.

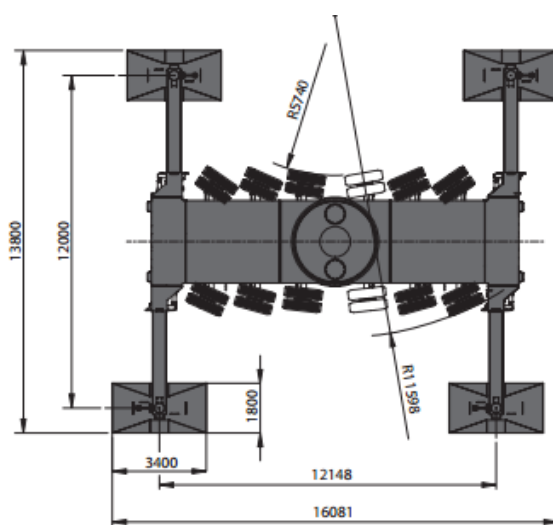


Figura 5.11 – Geometria do Guindaste MHC. Fonte: Catálogo da Terex (2010)

#### **Características:**

Peso próprio: 3000 kN;

Comprimento de maior esforço da lança: 20 m;

Área da patola = 6,12 m<sup>2</sup>.

Aplicando todos os carregamentos na estrutura patolada como na Figura 5.12 e analisando, obteve-se as seguintes reações:

Patola 1: -195,50 kN;

Patola 2: 1000 kN;

Patola 3: 1000 kN;

Patola 4: 2195,50 kN.

A reação negativa poderia significar o tombamento ou a perda do apoio. Para verificação, se analisou a estrutura retirando o apoio 1 (Figura 5.13) e resultou:

Patola 2: 821,50 kN;

Patola 3: 821,50 kN;

Patola 4: 2357,0 kN.

Desta forma, utilizou-se a reação da Patola 4 de 2357,0 kN como carregamento, fazendo 12 situações diferentes de carga na laje de cobertura como demonstra a Figura 5.14.

Como cada patola tem 6,12 m<sup>2</sup>, a carga colocada é 385,13 kN/m<sup>2</sup>.

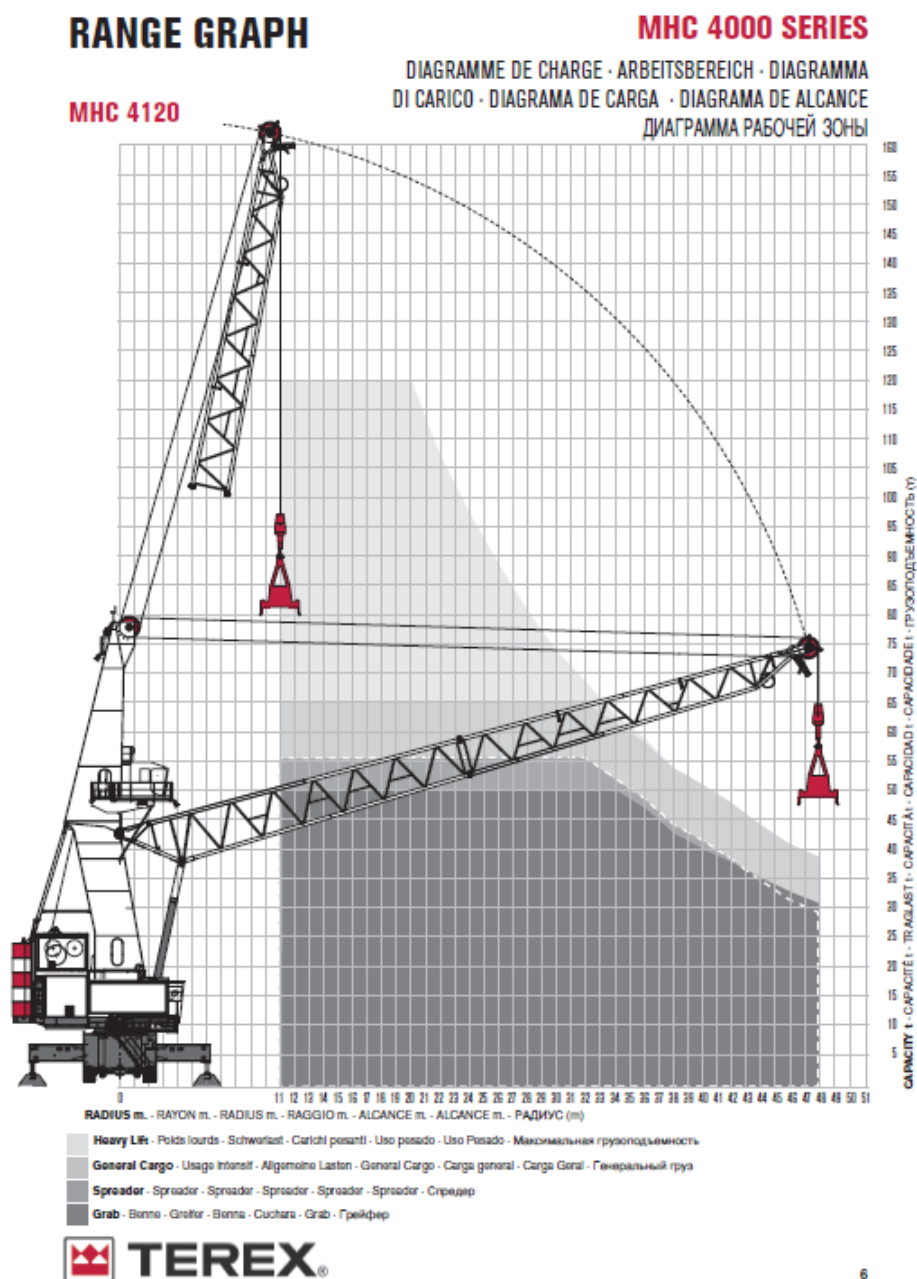


Figura 5.12 – Carregamento gerado pela lança do guindaste. Fonte: Catálogo da Terex



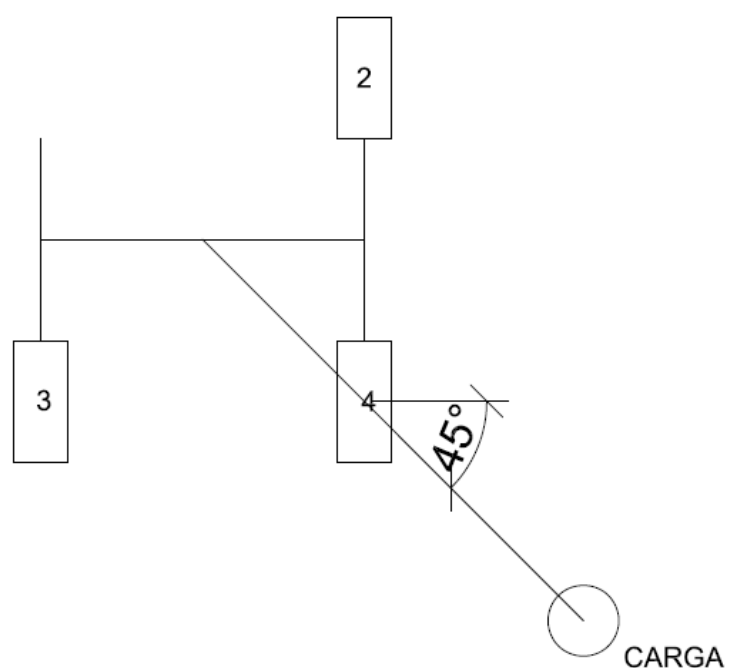


Figura 5.13 – Situação de maior carregamento do MHC considerando 3 apoios.

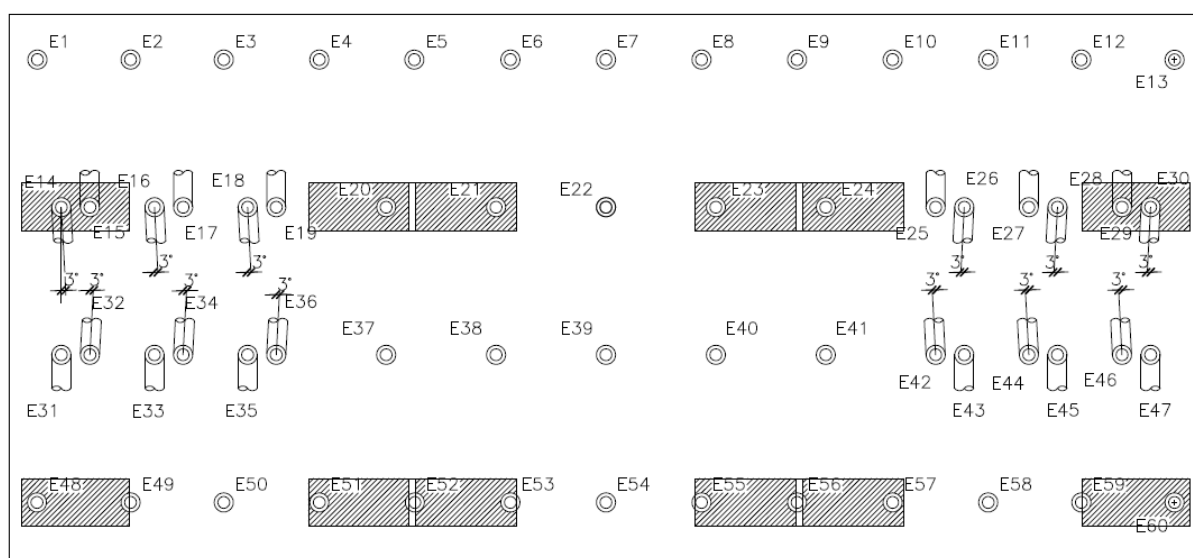
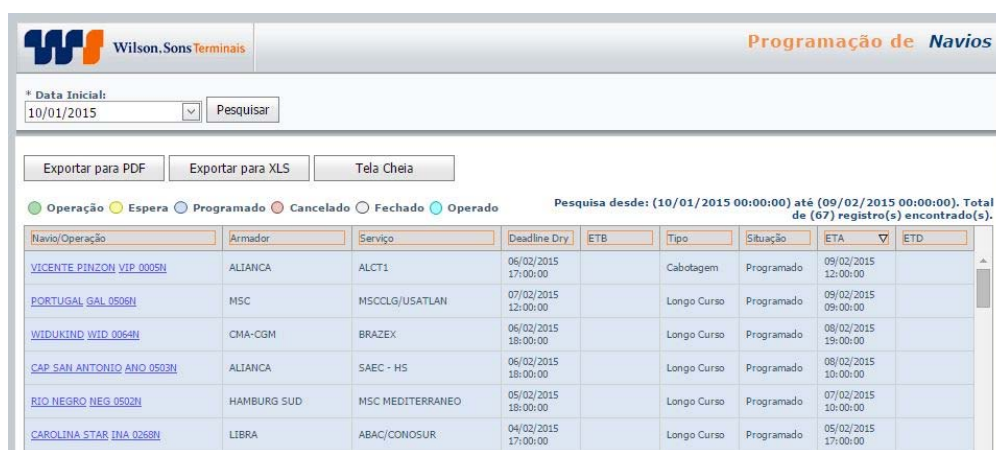


Figura 5.14 – A figura demonstra as 12 posições de carga para as patolas do MHC.

## NAVIO-TIPO:

A primeira coisa a se fazer para o cálculo dos esforços de amarração e atracação é determinar o navio-tipo do cais. A profundidade do canal do TECON-RS é de 12,5 m, equivalente a navios do tipo Panamáx. Verificando-se a movimentação de navios no cais através de seu site e, observando-se as Figuras 5.15 e 5.16, o navio porta contêineres Portugal (GAL) tem as dimensões de um navio Panamáx, sendo o maior encontrado nas movimentações do cais em uma pesquisa de 10/01/2015 à 09/02/2015..



Navio/Operação	Armador	Serviço	Deadline Dry	ETB	Tipo	Situação	ETA	ETD
VICENTE PINZON VIP 0005N	ALIANCA	ALCT1	06/02/2015 17:00:00		Cabotagem	Programado	09/02/2015 12:00:00	
PORTUGAL GAL 0506N	MSC	MSCCLG/USATLAN	07/02/2015 12:00:00		Longo Curso	Programado	09/02/2015 09:00:00	
WIDUKIND WID 0064N	CMA-CGM	BRAZEX	06/02/2015 18:00:00		Longo Curso	Programado	08/02/2015 15:00:00	
CAP SAN ANTONIO ANO 0503N	ALIANCA	SAEC - HS	06/02/2015 18:00:00		Longo Curso	Programado	08/02/2015 10:00:00	
RIO NEGRO NEG 0502N	HAMBURG SUD	MSC MEDITERRANEO	05/02/2015 18:00:00		Longo Curso	Programado	07/02/2015 10:00:00	
CAROLINA STAR INA 0268N	LIBRA	ABAC/CONOSUR	04/02/2015 17:00:00		Longo Curso	Programado	05/02/2015 17:00:00	

Figura 5.15 – Movimentação de navios no cais do Tecon-RS. Fonte: Tecon online



Dados Gerais	
Navio:	PORTUGAL
Tipo de Navio:	CONTAINER SHIP
Armador:	MSC
País do Navio:	[LU] LUXEMBOURG
Telefone:	
Fax:	
Largura:	32,2
Comprimento:	294,1
Calado:	
Calado M?nimo:	
Calado M?ximo:	

Figura 5.16 – Características de um navio porta-contêiner panamáx atracado no cais do Tecon-RS. Fonte: Tecon online

É possível então verificar que o navio Panamáx tem dimensões de:

Comprimento: 290 m;

Boca: 32 m;

Calado: 12,5 m;

A massa deslocada por um navio Panamáx é de até 80000 t, retirado da Figura 5.17. Sendo DWT a sigla para *dead weight*. Em português é traduzido como TPB, que significa tonelada peso bruto do navio.

Tipo	Dimensões	Tamanho do navio
Pequeno	LOA $\leq$ 115m	$\leq$ 10,000 DWT
Handysize	D <sub>L</sub> $\leq$ 10m	10,000 ~ 35,000 DWT
Handymax	LOA $\leq$ 190m	35,000 ~ 55,000 DWT
Panamax	B $\leq$ 32.3m LOA $\leq$ 289.6m D <sub>L</sub> $\leq$ 12.04m	60,000 ~ 80,000 DWT
Capesize	41 $\leq$ B $\leq$ 44m	80,000 ~ 200,000 DWT 90,000 ~ 180,000 DWT
Chinamax		$\leq$ 300,000 DWT
VLBC (Graneleiro muito grande)	LOA $\geq$ 300m	$\geq$ 200,000 DWT

Figura 5.17 – Características de um navio porta-contêiner panamáx atracado no cais do Tecon-RS. Fonte: Fender Team (2014).

## 5.2.7 Amarração:

### 5.2.7.1 Forças Devidas ao Vento

#### 5.2.7.1.1 Velocidade Básica do Vento

Deve-se verificar a velocidade básica do vento na região onde vai ser construído o cais, através das isopletas de vento (Figura 5.18). Segundo a NBR6123, a velocidade básica do vento é a velocidade para uma rajada de 3 s, excedida em média uma vez em 50 anos, 10 m acima do terreno em campo aberto e plano. Para Rio Grande, a velocidade básica do vento é em torno de 47 m/s., porém, a norma NBR9782 (1987), sugere que não sejam utilizadas velocidades que gerem pressões maiores do que  $1 \text{ kN/m}^2$  nas embarcações, portanto, foi verificado e utilizado a máxima velocidade admitida para o projeto como demonstrado na Tabela 5.2

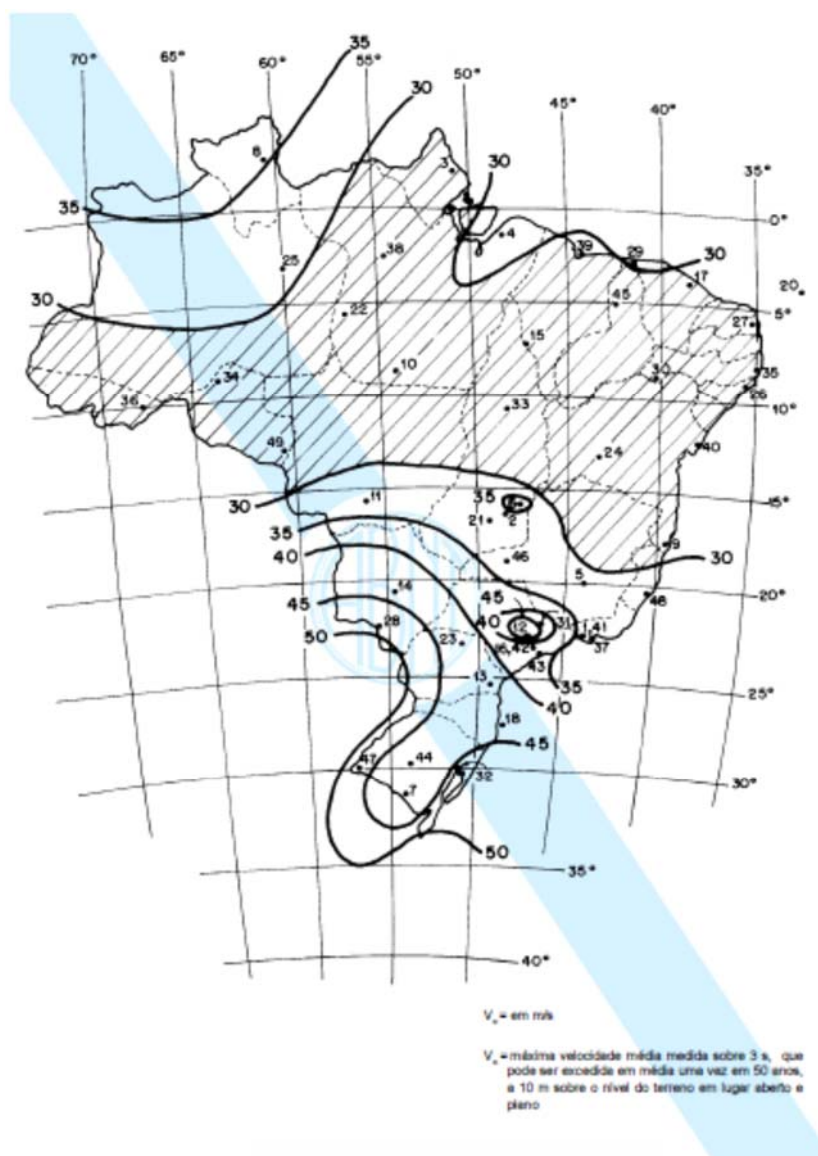


Figura 5.18 – Isopletas da velocidade básica do vento. Fonte: NBR 6123 (1988)

### 5.2.7.1.2 Área Velica

O maior esforço produzido pelo vento, ocorrerá quando o navio estiver em lastro, pelo fato de ter uma maior área exposta ao vento. Na determinação desta área, Siano (1983) apresenta uma equação a mesma pode ser determinada esta área, para:

Navio Carregado:

$$A_L = 1,96L_{OA}(P - D); \quad (5.1)$$

$$A_T = 2,89B(P - D) \quad (5.2)$$

Navio em lastro:

$$A_L = 1,96L_{OA}(P - D) + 0,64L_{PB}D; \quad (5.3)$$

$$A_T = 2,898L_{OA}(P - D) + 0,62BD \quad (5.4)$$

Onde P corresponde a altura total do navio,  $L_{OA}$  é o comprimento máximo do navio, D o calado, B a boca ou largura do navio,  $A_L$  é a área velica de obstrução do vento com o vento na direção longitudinal e  $A_T$  é a área velica de obstrução do vento com o vento na direção transversal. Estas equações são para vento a 0 e 90 graus, ou seja, nas piores situações. Porém, a informação da altura total dos navios não foi encontrada em nenhuma das bibliografias estudadas.

A PIANC(2002), mostra em seus anexos (Tabela 5.3), informações oriundas do Ministério dos Transportes do Japão, que publicou em 1998 dimensões para navio, contendo áreas velicas determinadas, de onde pode-se então, retirar dados. Porém, o fato de os navios e portos estarem em constante desenvolvimento, apenas resultados tabelados de 1998 poderiam prejudicar os resultados de um projeto. A Tabela 5.2 apresenta os resultados de área velica para o navio estudado neste trabalho.

Tabela 5.2. Áreas velicas para navio em lastro e carregado, na direção longitudinal e transversal. (PIANC, 2002)

Áreas com navio em lastro	
AVT(m <sup>2</sup> )	AVL(m <sup>2</sup> )
6090	1310
Áreas com navio carregado	
AVT(m <sup>2</sup> )	AVL(m <sup>2</sup> )
6610	1220

Tabela 5.3 Dados de áreas velicas para navios porta contêineres. (PIANC, 2002)

Appendix C. Table C-1										Confidence Limit: 75%	
Type	Dead Weight Tonnage (t)	Displacement (t)	Length Overall (m)	Length P. P. (m)	Breadth (m)	Depth (m)	Maximum Draft (m)	Wind Lateral Area (m <sup>2</sup> )		Wind Front Area (m <sup>2</sup> )	
								Full Load Condition	Ballast Condition	Full Load Condition	Ballast Condition
Container Ship**	7,000	10,700	123	115	20.3	9.8	7.2	1,460	1,590	330	444
	10,000	15,100	141	132	22.4	11.3	8.0	1,880	1,990	410	535
	15,000	22,200	166	156	25.0	13.3	9.0	2,490	2,560	524	663
	20,000	29,200	186	175	27.1	14.9	9.9	3,050	3,070	625	771
	25,000	36,100	203	191	28.8	16.3	10.6	3,570	3,520	716	870
	30,000	43,000	218	205	30.2	17.5	11.1	4,060	3,950	800	950
	40,000	56,500	244	231	32.3	19.6	12.2	4,970	4,730	950	1,110
	50,000	69,900	266	252	32.3	21.4	13.0	5,810	5,430	1,090	1,250
	60,000	83,200	286	271	36.5	23.0	13.8	6,610	6,090	1,220	1,370

### 5.2.7.1.3 Forças devidas ao vento

Através da equação 3.5 se determinou a força do vento (Tabela 5.4). A velocidade máxima admitida foi 33 m/s, desta forma, não se precisou verificar a velocidade característica, uma vez que a velocidade máxima fica bem abaixo da velocidade básica do vento da região. Para o coeficiente de forma, adotou-se o sugerido pela norma, 1,2NBR 9782 (1987).

Tabela 5.4 – Determinação da força do vento nas embarcações

v(m/s)	33,00			
Lastro				
K	V <sup>2</sup> (m/s) <sup>2</sup>	θ(Graus)	Fv(kN)	Fv/A(kN/m2)
1,20	1089,00	0,00	4974,01	1,00
1,20	1089,00	90,00	1069,94	0,21
Carregado				
K	V <sup>2</sup> (m/s) <sup>2</sup>	θ(Graus)	Fv(kN)	Fv/A(kN/m2)
1,20	1089,00	0,00	5398,72	0,84
1,20	1089,00	90,00	996,44	0,15

#### 5.2.7.1.4 Forças Devidas as Correntes

Para a força nas correntes, tendo o calado do navio carregado, se determina a área onde atuara a força devida as correntes no navio, Mason apresenta uma equação para estimar o calado do navio em lastro onde:

$$D_{\min} = \frac{\text{Deslocamento}}{\text{Peso bruto}} \cdot D \quad (5.5)$$

Os coeficientes de forma são retirados das equações 3.9 e 3.10, e a velocidade da corrente foi adotada pelo máximo permitido em norma, ou seja, 1 m/s. Os resultados para as forças de corrente são apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Determinação das forças das correntes nos navios.

Lastro			
kct	$v^2(\text{m/s})^2$	AvT ( $\text{m}^2$ )	R (kN)
2,01	1,00	918,75	484,85
kvl	$v^2(\text{m/s})^2$	AvL ( $\text{m}^2$ )	R (kN)
1,22	1,00	101,25	60,85
Carregado			
Kct	$v^2(\text{m/s})^2$	AvT ( $\text{m}^2$ )	R(kN)
2,67	1,00	3675	2571,00
Kvl	$v^2(\text{m/s})^2$	AvL ( $\text{m}^2$ )	R(kN)
1,87	1,00	405	374,21

### 5.2.7.2 Forças de Amarração

Somando as forças críticas de vento e corrente nas direções transversal e longitudinal, pode-se então obter a força nos cabeços de amarração. Para a direção longitudinal, a norma NBR 9782 (1987) sugere que toda a força seja absorvida por um único cabo, enquanto na direção transversal pode-se estimar quantas cordas irão resistir ao esforço. Portanto, sabendo que para cada módulo com aproximadamente 50 m de extensão de cais, existem pelo menos 2 cabeços de amarração, e também, que o navio panamáx apresenta 290 m de comprimento, para um cais com um total de 900 m, estimou-se que pelo menos 12 cabeços de amarração (Figura 5.19) estejam atuando em um navio do tipo Panamáx para o esforço transversal. Podendo então, reduzir-se a força em 14 vezes. As forças calculadas para os cabos de amarração estão apresentadas na Tabela 5.6.

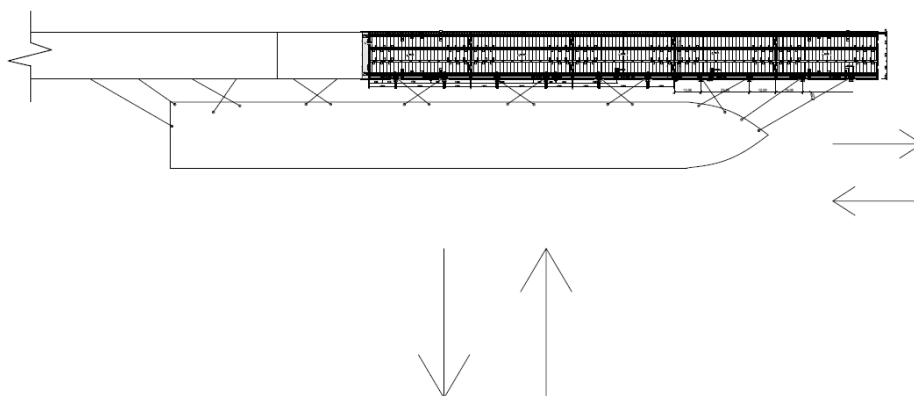


Figura 5.19 – Estimativa de amarração de um navio do tipo Panamáx no cais do Tecon-RS.



Tabela 5.6. Forças de amarração no cais

<b>CARGAS DE ATRACAÇÃO</b>	<b>FORÇA NOS CABOS(kN)</b>	<b>VETORES DE FORÇA(kN)</b>
<b>TRANSVERSAL</b>	7969,73	1328,29
<b>LONGITUDINAL</b>	1444,15	1667,56

## 5.2.8 Atracação

### 5.2.8.1 Energia de Atracação

Utilizando o método da PIANC(2002), foram obtidos os resultados na energia de atracação apresentado na Tabela 5.7. Para isto, foi adotado aproximação do navio ao cais com uma angulação de 10°. Para o coeficiente de amortecimento, utilizou-se a pior situação, como se o casco do navio não absorvesse nenhuma energia. O fator de segurança foi adotado em 1,8, já que a PIANC sugere de 1,5 a 2, utilizou-se a média para que os resultados da energia não levassem a um superdimensionamento.

Tabela 5.7 – Resultados da energia de atracação utilizando o método da PIANC.

<b>Md(t)</b>	<b>g(m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>L<sub>BP</sub>(m)</b>	<b>B(m)</b>	<b>D(m)</b>	<b>V(m/s)</b>	<b>V(m/s)<sup>2</sup></b>	<b>R(m)</b>	<b>r(m)</b>
80000	9,81	294	32	12,5	0,1	0,01	75,22	73,5

<b>Ce</b>	<b>Kc</b>	<b>Kc/D</b>	<b>Cm</b>	<b>Cc</b>	<b>Ca</b>	<b>Fs</b>	<b>EA(tf.m)</b>	<b>1,8*EA(tf,m)</b>
0,49	1,82	0,15	1,77	1,00	1,00	1,00	35,17	63,30

### 5.2.8.2 Defensas

De acordo com o memorial de cálculo da ampliação do cais do TECON-RS, as defensas utilizadas são do tipo elástica cilíndrica axial. Portanto, foi utilizada o mesmo tipo para se retirar a reação da defesa imposta no cais para análise deste trabalho.

Para a obtenção da força a ser colocada no modelo, foi utilizado o catálogo da empresa Fentek(2000), com a defesa Super Cone. Onde a Tabela 5.9 e a Figura 5.21 demonstra as características geométricas das defensas e na Tabela 5.10 demonstra as características mecânicas das defensas.

Como é preciso uma defesa que suporte mais de 630 kNm de energia, analisando o catálogo, para este trabalho, foi escolhida a defesa SNC1100-E20 com capacidade de resistir a energia absorvida de  $E_R = 635$  kNm e com uma reação de  $R_R = 1115$  kN.

A partir destes dados, analisa-se o gráfico reação-deformação (Figura 5.22) da defesa. Em comparação da energia transmitida e a energia resistida, temos quase 100%, o que significa que a reação a ser aplicada no cais é a própria reação retirada da Tabela 5.10, caso contrário poderia se verificar uma redução neste valor em função da máxima energia transmitida e o gráfico. Também em uma situação de choque que gere a energia completa estimada, ocorrerá 72% de deflexão e com isso, é possível então determinar o espaçamento máximo a ser utilizado entre defensas no cais.

Para se determinar o espaçamento entre defensas, foi necessário calcular o raio de proa para o navio tipo Panamáx, determinado em 176,82 m com o espaçamento máximo entre defensas, estimado em 21,86m, demonstrado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Resultado para afastamento mínimo entre defensas.

<b>H(m)</b>	<b>Z(m)</b>	<b>Pu(m)</b>	<b><math>\delta F(m)</math></b>	<b>C'(m)</b>	<b>S(m)</b>
1,1	0,165	1,265	0,792	0,135	21,86

O cais do TECON-RS tem uma distância entre defensas de aproximadamente 24 m. Isto é de certa forma um problema, pelo fato que neste trabalho está se fazendo uma análise para verificação das maiores cargas aplicadas o cais, o que ocorrerá com a acostagem do maior navio, ou seja, o navio-tipo. Porém, em um cais de porto, devem ser analisadas as distâncias entre defensas para diversos tipos de navios, uma vez que existindo uma grande distância, um navio menor pode entrar entre duas defensas e podendo desta forma, causar danos tanto para a estrutura do cais, quanto para a estrutura do navio.

Tabela 5.9 – Características geométricas da defesa Super Cone cilíndrica. Fonte: Fentek.(2000)

Fender	H	ØW	ØU	C	D	ØB	Anchors	ØS	Head Bolts	Z	Weight (kg)
SCN 300	300	500	295	27-37	15	440	4-M20	255	4-M20	45	31
SCN 350	350	570	330	27-37	15	510	4-M20	275	4-M20	52	40
SCN 400	400	650	390	30-40	20	585	4-M24	340	4-M24	60	74
SCN 500	500	800	490	32-42	25	730	4-M24	425	4-M24	75	144
SCN 550	550	880	525	32-42	25	790	4-M24	470	4-M24	82	195
SCN 600	600	960	590	40-52	30	875	4-M30	515	4-M30	90	240
SCN 700	700	1120	685	40-52	35	1020	4-M30	600	4-M30	105	395
SCN 800	800	1280	785	40-52	35	1165	6-M30	685	6-M30	120	606
SCN 900	900	1440	885	40-52	35	1313	6-M30	770	6-M30	135	841
SCN 1000	1000	1600	980	50-65	35	1460	6-M36	855	6-M36	150	1120
SCN 1050	1050	1680	1030	50-65	40	1530	6-M36	900	6-M36	157	1360
SCN 1100	1100	1760	1080	50-65	40	1605	8-M36	940	8-M36	165	1545
SCN 1200	1200	1920	1175	57-80	40	1750	8-M42	1025	8-M42	180	1970
SCN 1300	1300	2080	1275	65-90	40	1900	8-M48	1100	8-M48	195	2455
SCN 1400	1400	2240	1370	65-90	50	2040	8-M48	1195	8-M48	210	3105
SCN 1600	1600	2560	1570	65-90	60	2335	8-M48	1365	8-M48	240	4645
SCN 1800	1800	2880	1765	75-100	60	2625	10-M56	1540	10-M56	270	6618
SCN 2000	2000	3200	1955	80-105	90	2920	10-M56	1710	10-M56	300	9560

All dimensions in millimetres.  
Anchor and head bolt locations are equispaced on the same pitch circle diameter.

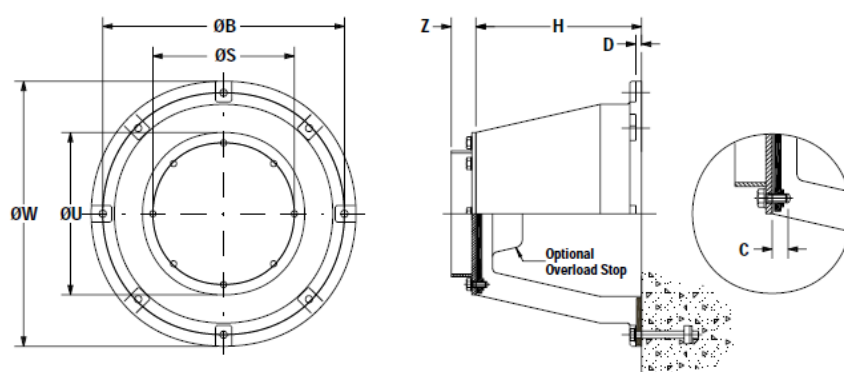
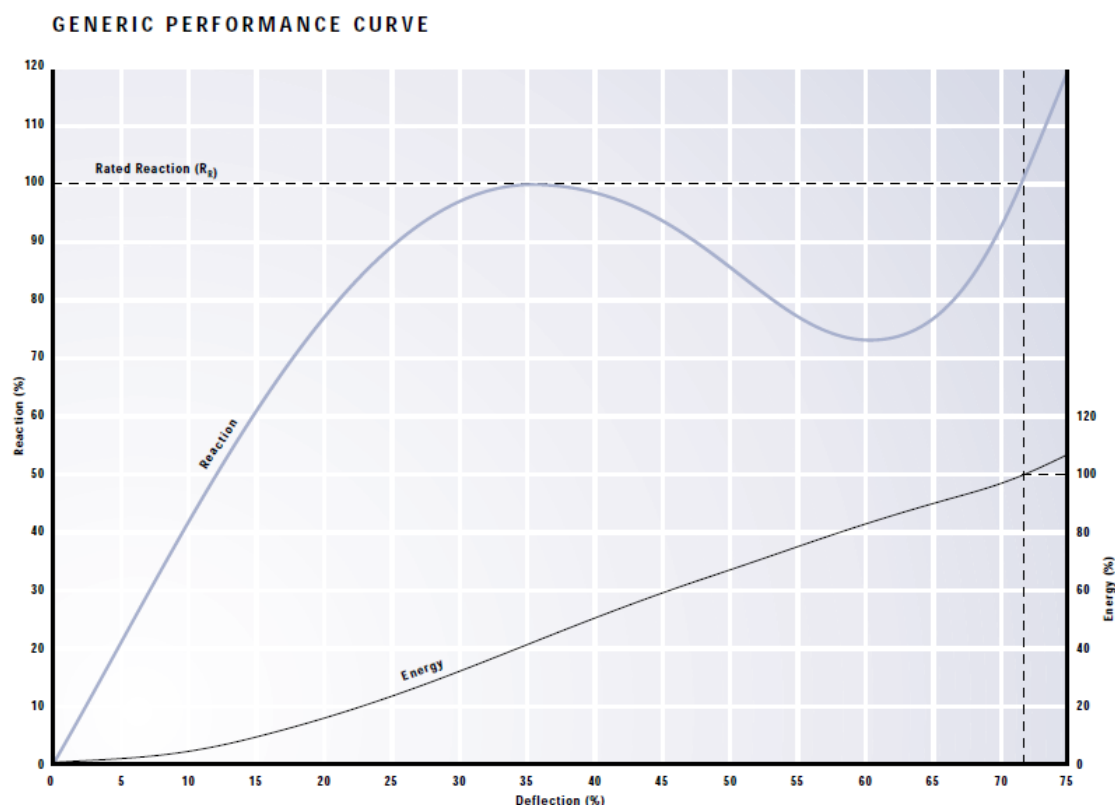


Figura 5.21 – Detalhe das características geométricas da defesa Super Cone cilíndrica. Fonte: Fentek (2000).

Tabela 5.10 – Características mecânicas da defesa Super Cone cilíndrica. Fonte: Fentek.(2000)

SUPER CONE FENDERS PERFORMANCE																		
Energy Index	SCN 300	SCN 350	SCN 400	SCN 500	SCN 550	SCN 600	SCN 700	SCN 800	SCN 900	SCN 1000	SCN 1050	SCN 1100	SCN 1200	SCN 1300	SCN 1400	SCN 1600	SCN 1800	SCN 2000
E0.9 $E_{\sigma}$	7.7	12.5	18.6	36.5	49	63	117	171	248	338	392	450	585	743	927	1382	1967	2700
$R_{\sigma}$	59	80	104	164	198	225	320	419	527	653	720	788	941	1103	1278	1670	2115	2610
E1.0 $E_{\sigma}$	8.6	13.9	20.7	40.5	54	70	130	190	275	375	435	500	650	825	1030	1535	2185	3000
$R_{\sigma}$	65	89	116	182	220	250	355	465	585	725	800	875	1045	1225	1420	1855	2350	2900
E1.1 $E_{\sigma}$	8.9	14.4	21.4	41.9	56	72	134	196	282	385	447	514	668	847	1068	1577	2244	3080
$R_{\sigma}$	67	91	119	187	226	257	365	478	601	745	822	899	1073	1258	1459	1905	2413	2978
E1.2 $E_{\sigma}$	9.2	14.8	22.1	43.2	58	74	137	201	289	395	458	527	685	869	1085	1618	2303	3160
$R_{\sigma}$	68	93	122	191	231	263	374	490	617	764	843	923	1101	1291	1497	1955	2476	3056
E1.3 $E_{\sigma}$	9.5	15.3	22.8	44.6	59	76	141	207	296	405	470	541	703	891	1113	1660	2362	3240
$R_{\sigma}$	70	96	125	196	237	270	384	503	633	784	865	947	1129	1324	1536	2005	2539	3134
E1.4 $E_{\sigma}$	9.8	15.7	23.5	45.9	61	78	144	212	303	415	481	554	720	913	1140	1701	2421	3320
$R_{\sigma}$	72	98	128	200	242	276	393	515	649	803	886	971	1157	1357	1574	2055	2602	3212
E1.5 $E_{\sigma}$	10.1	16.2	24.2	47.3	63	80	148	218	310	425	493	568	738	935	1168	1743	2480	3400
$R_{\sigma}$	74	100	131	205	248	283	403	528	665	823	908	995	1185	1390	1613	2105	2665	3290
E1.6 $E_{\sigma}$	10.4	16.7	24.8	48.6	65	82	151	223	317	435	504	581	755	957	1195	1784	2539	3480
$R_{\sigma}$	75	102	133	209	253	289	412	540	681	842	929	1019	1213	1423	1661	2155	2728	3368
E1.7 $E_{\sigma}$	10.6	17.1	25.5	50.0	67	84	155	229	324	445	516	595	773	979	1223	1826	2590	3560
$R_{\sigma}$	77	104	136	214	259	296	422	553	697	862	951	1043	1241	1456	1690	2205	2791	3446
E1.8 $E_{\sigma}$	10.9	17.6	26.2	51.3	68	86	158	234	331	455	527	608	790	1001	1250	1867	2657	3640
$R_{\sigma}$	79	107	139	218	264	302	431	565	713	881	972	1067	1269	1489	1728	2255	2854	3524
E1.9 $E_{\sigma}$	11.2	18.0	26.9	52.7	70	88	162	240	338	465	539	622	808	1023	1278	1909	2716	3720
$R_{\sigma}$	80	109	142	223	270	309	441	578	729	901	994	1091	1297	1522	1767	2305	2917	3602
E2.0 $E_{\sigma}$	11.5	18.5	27.6	54.0	72	90	165	245	345	475	550	635	825	1045	1306	1950	2775	3800
$R_{\sigma}$	82	111	145	227	275	315	450	590	745	920	1015	1115	1325	1555	1805	2355	2980	3680
E2.1 $E_{\sigma}$	11.8	19.0	28.3	55.4	74	93	169	252	355	488	565	652	847	1074	1341	2003	2851	3904
$R_{\sigma}$	84	114	149	233	283	324	462	606	765	945	1042	1145	1361	1597	1853	2418	3060	3778
E2.2 $E_{\sigma}$	12.1	19.4	29.0	56.7	76	96	173	258	364	501	580	669	869	1102	1376	2056	2926	4008
$R_{\sigma}$	86	117	153	239	290	332	474	621	785	969	1069	1174	1396	1638	1901	2480	3139	3876
E2.3 $E_{\sigma}$	12.4	19.9	29.7	58.1	77	99	177	265	374	514	595	686	891	1131	1412	2109	3002	4112
$R_{\sigma}$	89	120	157	246	298	341	486	637	805	994	1096	1204	1432	1680	1949	2543	3219	3974
E2.4 $E_{\sigma}$	12.7	20.3	30.4	59.4	79	102	181	271	383	527	610	703	913	1159	1447	2162	3077	4216
$R_{\sigma}$	91	123	161	252	305	349	498	652	825	1018	1123	1233	1467	1721	1997	2605	3298	4072
E2.5 $E_{\sigma}$	13.0	20.8	31.1	60.8	81	105	185	278	393	540	625	720	935	1188	1483	2215	3153	4320
$R_{\sigma}$	93	126	165	258	313	358	510	668	845	1043	1150	1263	1503	1763	2045	2668	3378	4170
E2.6 $E_{\sigma}$	13.3	21.3	31.8	62.2	83	108	189	284	402	553	640	737	957	1216	1518	2268	3228	4424
$R_{\sigma}$	95	129	169	264	320	366	522	683	865	1067	1177	1292	1538	1804	2093	2730	3457	4268
E2.7 $E_{\sigma}$	13.5	21.7	32.5	63.5	85	111	193	291	412	566	655	754	979	1245	1554	2321	3304	4528
$R_{\sigma}$	97	132	173	270	328	375	534	699	885	1092	1204	1322	1574	1846	2141	2793	3537	4366
E2.8 $E_{\sigma}$	13.8	22.2	33.2	64.9	86	114	197	297	421	579	670	771	1001	1273	1589	2374	3379	4632
$R_{\sigma}$	100	135	177	277	335	383	546	714	905	1116	1231	1351	1609	1887	2189	2855	3616	4464
E2.9 $E_{\sigma}$	14.1	22.6	33.9	66.2	88	117	201	304	431	592	685	788	1023	1302	1625	2427	3455	4736
$R_{\sigma}$	102	138	181	283	343	392	558	730	925	1141	1258	1381	1645	1929	2237	2918	3696	4562
E3.0 $E_{\sigma}$	14.4	23.1	34.6	67.6	90	120	205	310	440	605	700	805	1045	1330	1660	2480	3530	4840
$R_{\sigma}$	104	141	185	289	350	400	570	745	945	1165	1285	1410	1680	1970	2285	2980	3775	4660
E3.1 $E_{\sigma}$	15.9	25.4	38.1	74.4	99	132	226	341	484	666	770	886	1150	1463	1826	2728	3883	5324
$R_{\sigma}$	114	155	204	318	385	440	627	820	1040	1282	1414	1551	1848	2167	2514	3278	4153	5126
ER (e)	0.138	0.163	0.186	0.232	0.256	0.290	0.364	0.414	0.466	0.518	0.544	0.571	0.622	0.674	0.725	0.830	0.932	1.036
Energy Index	SCN 300	SCN 350	SCN 400	SCN 500	SCN 550	SCN 600	SCN 700	SCN 800	SCN 900	SCN 1000	SCN 1050	SCN 1100	SCN 1200	SCN 1300	SCN 1400	SCN 1600	SCN 1800	SCN 2000
Index	300	350	400	500	550	600	700	800	900	1000	1050	1100	1200	1300	1400	1600	1800	2000



INTERMEDIATE DEFLECTION TABLE																	
D(%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	72	75
E(%)	0	1	4	8	15	22	31	40	50	59	67	75	82	89	96	100	106
R(%)	0	19	39	59	75	89	97	100	98	92	84	77	73	77	91	100	118

Figura 5.22 – Gráfico de reação x deformação para a defesa cilíndrica Super Cone. Fonte: Catálogo da Fentek

### 5.2.8.3 Energia de Atracção pela NBR 9782 (1987)

Fazendo o cálculo da energia de atracção pela NBR9782 (1987) e utilizando um coeficiente de segurança de 1,4 como sugerido pela norma, chega-se a uma energia de 377,7 kNm (Tabela 5.11). Este valor representa aproximadamente 60% da energia de atracção obtida pelo método da PIANC. Apesar de os itens 3.7 e 3.8 deste trabalho demonstrarem que o coeficiente de segurança do método da PIANC é adotado em torno de 1,8 para este tipo de cais, como o utilizado nesta pesquisa, enquanto no método da norma brasileira é 1,4, não justifica o método da NBR 9782 (1987) dar tão abaixo do calculado de acordo com a PIANC. Se retirados

os dois coeficientes de segurança, os resultados ainda ficariam aproximadamente 38% defasados e o fato de a maioria dos autores utilizar o método do PIANC pode significar que a norma brasileira apresenta uma formulação que atualmente se usada, pode estar colocando em risco tanto a segurança dos cais como a dos navios.

Tabela 5.11 – Resultado da energia de atracação utilizando o método da NBR 9782 (1987)

<b>M'(t)</b>	<b>M1(t)</b>	<b>M2(t)</b>	<b>V(m/s)</b>	<b>l(m)</b>	<b>r(m)</b>	<b>Ce</b>	<b>Cr</b>	<b>Ec(t.m)</b>	<b>1,4*Ec(t.m)</b>
80000,00	8154,94	3474,20	0,10	75,22	73,50	0,49	0,95	26,98	37,77

### 5.3 VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DA ESTRUTURA

A verificação de segurança da estrutura para deste trabalho, foi realizada apenas para o estado limite último, ou seja, referente à situação de ruptura e que resulta nas cargas para o dimensionamento das estacas do cais, uma vez que as cargas analisadas se referem à situação de esforço máximo das estacas.

Para a combinação de cargas normais, desenvolveu-se 227 combinações de esforços (Anexo A) afim de se chegar às 12 combinações críticas de esforços máximos e mínimos,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  e  $M_z$ .

#### 5.3.1 Coeficientes de Ponderação

##### 5.3.1.1 Ações Permanentes

O coeficiente de ponderação para as ações permanentes  $\gamma_g$  foi determinado igual a 1,4 de acordo com a Tabela 3.6. A norma NBR 9782 (1987) ressalta que para ser uma combinação de grande variabilidade, como o utilizado, o peso próprio da estrutura não pode superar 75% da totalidade das ações permanentes submetidas ao cais. Verificou-se da seguinte maneira:

Peso próprio total da estrutura estudada: 27957,83 kN

Outras cargas permanentes:

Pavimentação: 10361,79 kN.

Total: 38319,72 kN

O peso próprio remete-se a 73% das ações totais permanentes existentes no cais.

Para os efeitos de variação de temperatura, o coeficiente de ponderação  $\gamma_e$  foi adotado como 1,2 de acordo com a Tabela 3.7.

### **5.3.1.2 Ações Variáveis**

O coeficiente de ponderação para ações variáveis  $\gamma_q$  foi determinado em 1,4 pela Tabela 3.8. Este coeficiente majora as cargas variáveis atuantes sobre a estrutura do cais.

Como forma de simplificação do trabalho, em um primeiro momento não foi feita a verificação das combinações utilizando fatores de ponderação favorável. Após esta análise, utilizando aquela que obteve maior esforço  $F_z$  negativo, ou seja, a combinação 79 que apresenta a estaca E15 com reação mínima para  $F_z$ , se utilizou as ponderações favoráveis para combinação normal. Isto resultou em um aumento de 17% na reação negativa da estaca. No Anexo B, se encontram todas as combinações, carregamentos e ponderações analisadas e utilizadas nesta pesquisa.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As 227 combinações de carregamentos, fornecem as reações obtidas no ponto de engastamento das estacas, verificando as cargas máximas e mínimas para  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  e  $M_z$ .

Para melhor desenvolver o estudo, a análise foi focada em 12 combinações, sendo essas, as que apresentavam a estaca com carga máxima ou mínima para forças e momentos, tanto para estacas inclinadas quanto para estacas verticais. A Tabela 6.1 apresenta as reações decorrentes das combinações que geraram os esforços máximos e mínimos. Já a Tabela 6.2 identifica o tipo de esforço a que a estaca está submetida. A não ser pela Tabela 6.2, as reações serão apresentadas em termos de coordenadas globais, onde a Figura 6.1 apresenta o sistema coordenadas do modelo construído.

Tabela 6.1 – Resultados máximos e mínimos para as 12 principais combinações.

COMB.	ESTACA	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)	ESFORÇO
53	30	129,49	609,04	2559,61	118,77	-29,43	-3,30	FXMÁX
91	14	-233,64	904,13	3707,69	34,63	-461,28	111,84	FXMÍN
37	14	-226,64	907,64	3727,97	50,93	-368,10	92,36	FYMÁX
84	29	-44,87	-923,50	3805,42	-83,64	-509,75	-129,66	FYMÍN
177	57	-45,39	-3,66	4202,73	15,88	-489,38	-2,73	FZMÁX
79	15	-43,39	438,19	-1656,17	-127,04	-480,37	-123,92	FZMÍN
16	14	-32,54	151,53	761,60	181,71	46,51	3,57	MXMÁX
92	15	-42,01	254,09	-865,12	-186,89	-460,83	-120,36	MXMÍN
117	48	9,84	-2,20	2380,42	20,53	88,19	0,86	MYMÁX
82	60	-62,68	-1,80	2457,84	18,56	-663,47	-6,30	MYMÍN
102	26	-19,29	161,24	766,08	109,93	-586,20	140,39	MZMÁX
76	42	-38,37	-70,47	412,57	-129,02	-595,20	-149,61	MZMÍN



Tabela 6.2 – Esforços apresentados nas estacas que apresentam máximos e mínimos do projeto.

		FORÇA NORMAL	FORÇA CORTANTE	MOMENTO TORÇOR	MOMENTO FLETOR
COMBINAÇÃO	ESTACA	Nd (kN)	Vd (kN)	MTd (kNm)	MFd (kNm)
53	30	2633,88	57,91	-4,34	122,07
91	14	3412,64	56,22	4,53	308,14
37	14	3514,02	53,14	7,85	252,21
84	29	3378,64	40,11	-1,06	363,96
177	57	4191,74	30,95	-1,61	330,99
79	15	-1018,84	35,73	-2,62	340,37
16	14	772,98	24,72	24,11	186,69
92	15	-206,76	44,05	-3,90	346,26
117	48	2380,50	10,09	0,88	90,68
82	60	2393,08	44,44	-4,27	464,91
102	26	1158,98	69,71	1,16	434,09
76	42	727,16	32,27	0,61	451,39

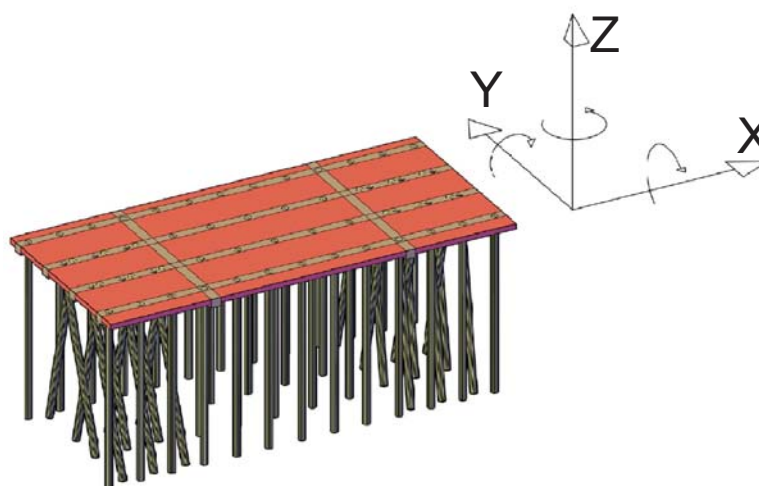


Figura 6.1 – Sistema de coordenadas global do modelo

Analisando os resultados da Tabela 6.2, ou seja, considerando esforço normal, esforço cortante, momento torçor e momento fletor nas estacas, percebe-se que o esforço cortante ou momento torçor das estacas são pequenos, quando comparados com o esforço normal. O momento de torção já era esperado que fosse residual, uma vez que para um modelo como este, dificilmente apresentaria torção nas estacas.

O motivo do esforço de corte das estacas ser pequeno deve-se ao fato de que as estacas quando dispostas na direção vertical, não tem rigidez suficiente para absorver esforços transversais comparado com as estacas inclinadas. Estas, as inclinadas, vão absorver o esforço que estiver voltado para a direção de maior rigidez, e dessa forma a carga vertical sempre se oporá ao esforço de corte, como demonstra a Figura 6.2. Desta forma, percebe-se que pode-se ter estacas de grandes vãos neste tipo de estrutura.

Esta observação é de grande importância, uma vez que com a presença de estacas verticais e inclinadas, gera-se uma situação em que o principal esforço nas estacas é o normal, ou seja, na direção de maior rigidez e possibilitando assim, obter grandes vãos, o que muitas vezes é necessário em uma estrutura executada em mar.

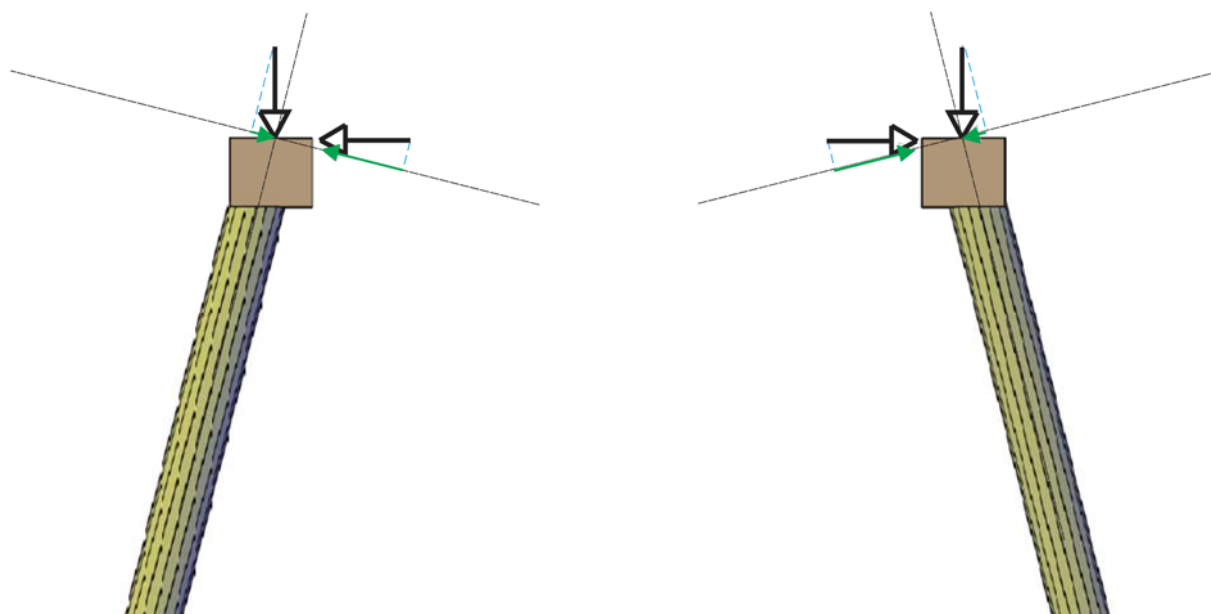


Figura 6.2 Demonstração de que a carga vertical sempre será oposta a carga transversal quando decompostas a posição de esforço cortante das estacas inclinadas.

Em um projeto estrutural, são apresentadas geralmente as cargas máximas e mínimas em cada estaca. Porém, máximos e mínimos servem apenas para se fazer o dimensionamento e, mesmo assim, não é o ideal, visto que esforços máximos não acontecem em um mesmo momento em uma estrutura. Sendo assim, e com o objetivo de entender como as cargas de um cais de contêineres se distribuem na sua fundação, vamos analisar cada uma das 12 combinações em separado, de forma a perceber qual o tipo de carregamento é importante e onde localiza-se a pior situação.

## 6.1 OBSERVAÇÕES SOBRE A APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados serão apresentados em forma de valores e gráficos;

É importante salientar que os gráficos de superfície, não representam uma superfície, apresentam resultados de reações pontuais no engastamento das estacas, melhor demonstrados nos gráficos de linha. Porém, o gráfico foi montado como superfície com o intuito de se ilustrar para onde estão indo as cargas de reação;

Deve-se entender que a carga ser máxima ou mínima, não quer dizer que ela é maior ou menor, e sim está identificando o sentido para qual está voltada, de acordo com o sistema global de coordenadas.

### a) COMBINAÇÃO 53 (FX Máximo)

Na combinação 53, onde no projeto, acontece a reação  $F_x$  máxima, a variável principal é a sobrecarga vertical, não existindo ações na direção  $x$  capazes de as induzir. Portanto, neste caso, conclui-se que essas reações são geradas pelos momentos, e que o somatório das reações dessa direção resulta em zero. Através dos gráficos das Figuras de 6.3 a 6.8, observa-se que chegamos a reações positivas e negativas, principalmente absorvidas pelas estacas inclinadas. Estas, obtêm uma leve inclinação de 3 graus na direção  $X$ , exatamente de forma a ficarem responsáveis por absorverem esses esforços. O interessante a ser verificado, é que quando não existirem esforços na direção  $X$ , como nesta combinação, todas as estacas inclinadas ficam carregadas transversalmente, gerando esforços de ação e reação.

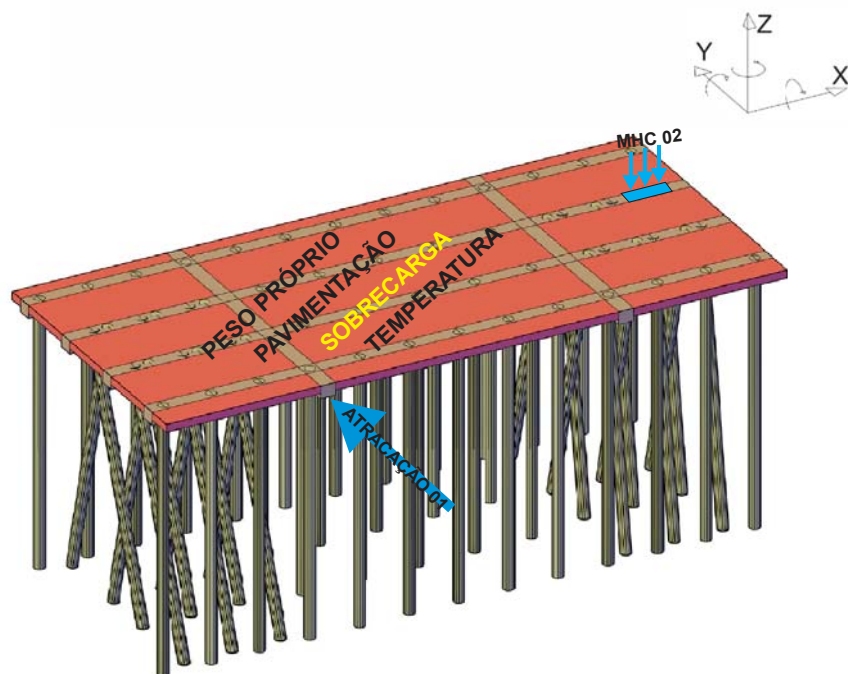


Figura 6.3 – Cargas utilizadas na combinação 53

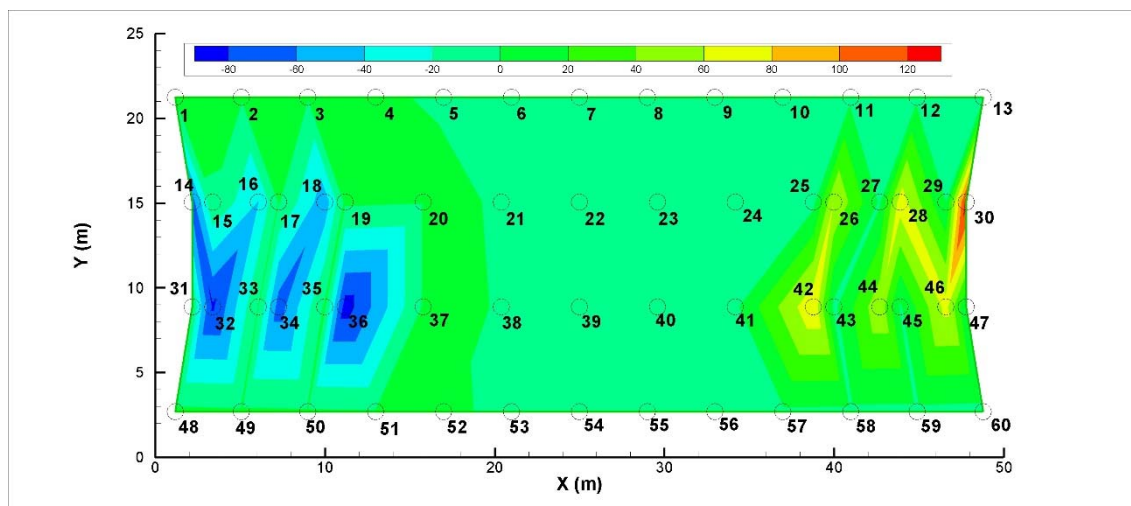


Figura 6.4 Reações de Fx em kN para combinação 53.

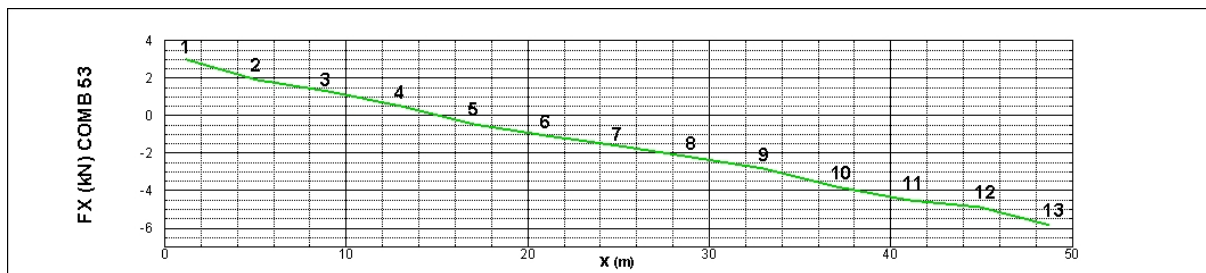


Figura 6.5 – Reações Fx das estacas de 1 a 13 para combinação 53.

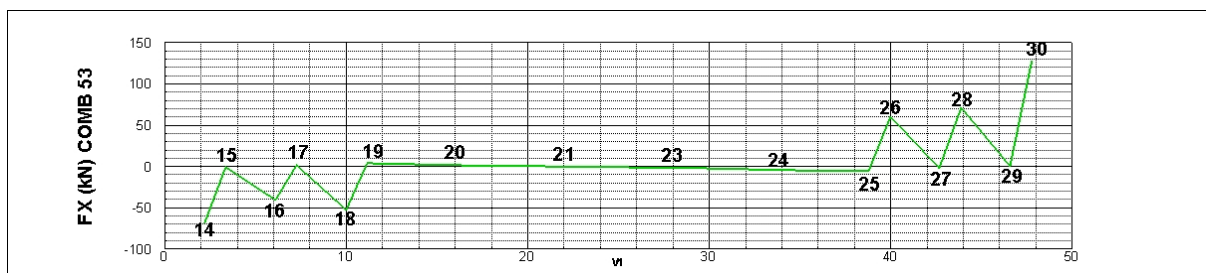


Figura 6.6 – Reações Fx para estacas de 14 a 30 para combinação 53.

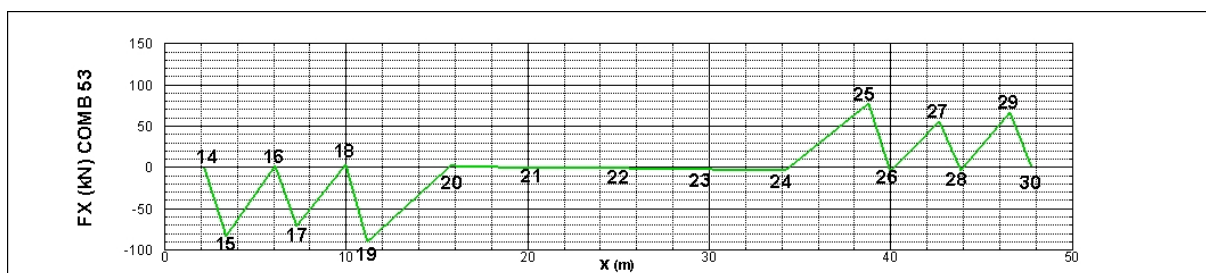


Figura 6.7 – Reações Fx para estacas de 31 a 47 para combinação 53.

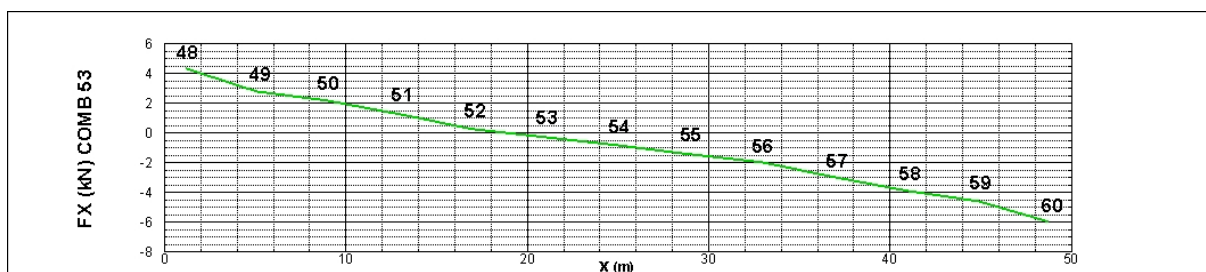


Figura 6.8 – Reações Fx para estacas de 48 a 60 para combinação 53.

### b) COMBINAÇÃO 91 (FX Mínimo)

Se tratando da combinação 91, que apresenta a reação mínima para direção x, observa-se na Figura 6.9, uma coerência no carregamento, sendo a carga de amarração a variável principal. Como na combinação 53, as estacas inclinadas a 3 graus recebem o maior esforço demonstrado nas Figuras 6.9 Até 6.14. Nota-se que apenas as estacas inclinadas próximas aos esforços apresentam reações consideráveis, o que já era esperado.

As reações verticais consideráveis desta combinação se dão exatamente nas estacas 14, 16 e 18, na região onde o guindaste MHC está posicionado. A reação de maior esforço atinge 88% da maior reação  $F_z$  apresentada neste projeto. Isto demonstra que esta combinação é de significância uma vez verificado que os esforços normais são os de maior importância e que grande parcela da força  $F_z$  é decomposta para reação normal da estaca. Outra situação que fica clara é a importância de se considerar mais de um tipo de guindaste para o cais, uma vez que o Portêiner se movimenta ao longo das vigas extremas do cais, e outros guindastes, como o MHC, podem patolar ao longo das vigas extremas e intermediárias, gerando esforço consideráveis nas estacas da segunda viga longitudinal.

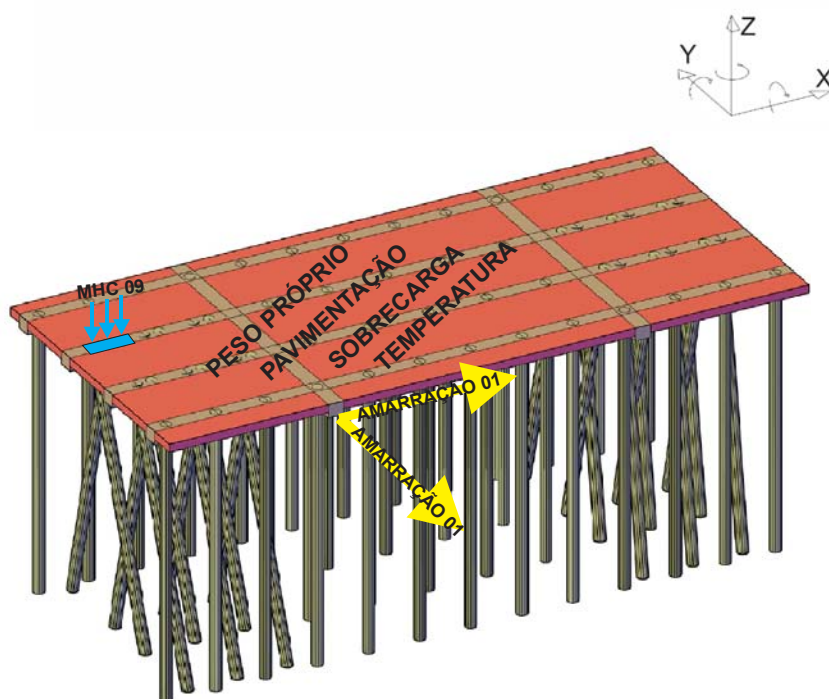


Figura 6.9 – Cargas utilizadas na combinação 91

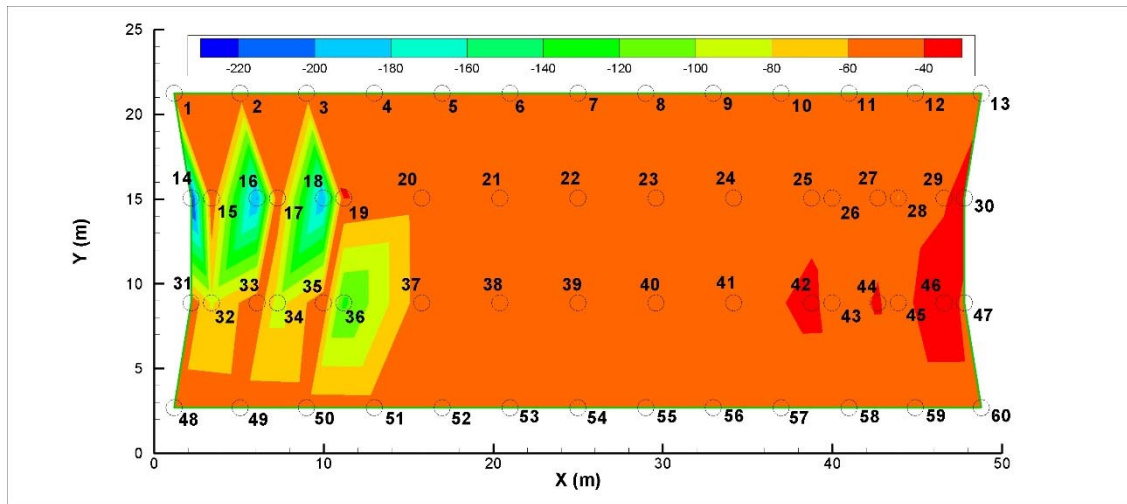


Figura 6.10 - Reações de Fx em kN para combinação 91

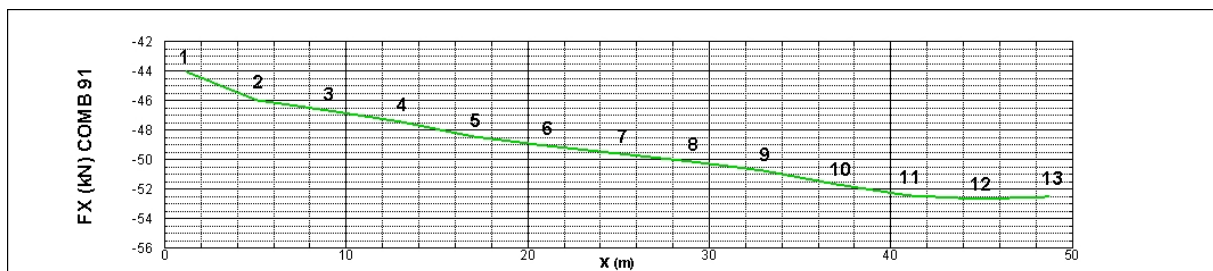


Figura 6.11 – Reações Fx para estacas de 1 a 13 para combinação 91.

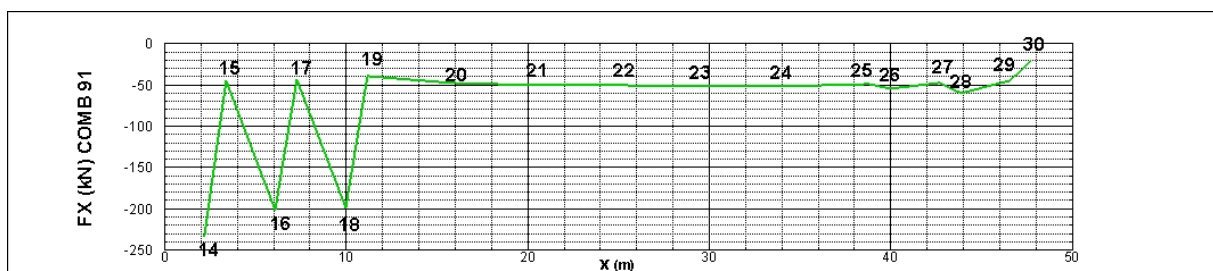


Figura 6.12 – Reações Fx para estacas de 14 a 30 para combinação 91.



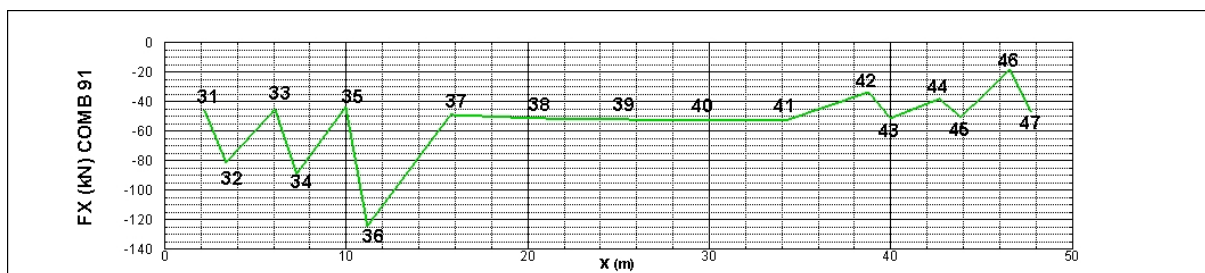


Figura 6.13 – Reações Fx para estacas de 31 a 47 para combinação 91.

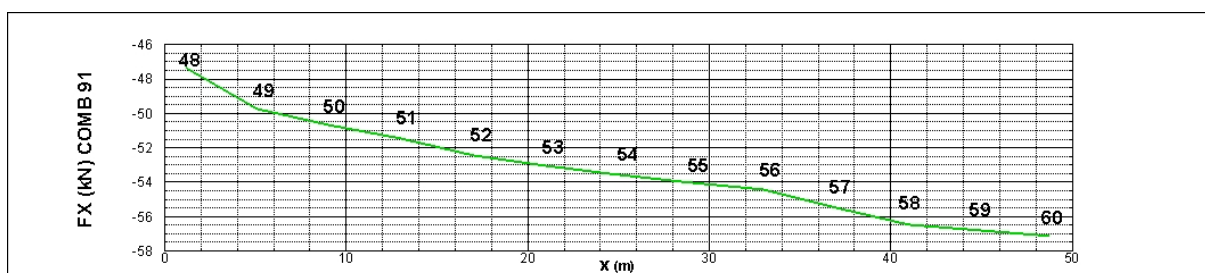


Figura 6.14 – Reações Fx para estacas de 48 a 60 para combinação 91.

### c) COMBINAÇÃO 37 (FY Máximo)

Para combinação 37, que gera a reação máxima  $F_y$ , observa-se que a variável principal não é o esforço de amarração, horizontal e com componente na direção do eixo Y, mas sim a sobrecarga, que é vertical. Isso deve-se ao fato de que existem estacas inclinadas que induzem a decomposição dos esforços. Adicionalmente, as influências dos coeficientes de minoração contribuem também para isso fazendo com que a reação causada pela força de sobrecarga mesmo não sendo maior do que a causada pelo esforço de amarração produza uma reação  $F_y$  maior. Isso tendo em vista o fato de a amarração ser minorada em 20%, quando variável secundária, enquanto a sobrecarga é minorada 30%. Isso faz com que a combinação 37 se apresente como principal para este esforço. Para deixar mais claro, verificou-se a combinação 91 (Anexo B), que apresenta mesma configuração, porém utilizando como variável principal a carga de amarração 01. Para se ter noção da diferença entre as duas, enquanto a combinação 37 apresenta uma reação  $F_y$  de 907,64 kN para a estaca 14, na combinação 91, apresenta uma reação de 904,13 kN para a mesma estaca. Desta forma, torna-se evidente que nem sempre a variável principal para uma combinação crítica de esforço transversal leva os esforços transversais como principal. Isto vai diretamente de encontro com a rigidez do módulo e os coeficientes de minoração e majoração que as combinações utilizam. A rigidez pode alterar



significativamente os resultados dos momentos gerados por cargas verticais dependendo da deformação da estrutura.

Outra situação de conclusão dos resultados vistos nas Figuras de 6.15 a 6.20, é que quando aplicado a força horizontal, ela é absorvida principalmente pelas estacas inclinadas próximas da região do esforço, deixando as estacas mais afastadas com pouca reação. Para esta combinação, mais uma vez a estaca 14 é destaque, que é uma das estacas inclinadas mais próximas a beira lateral do módulo.

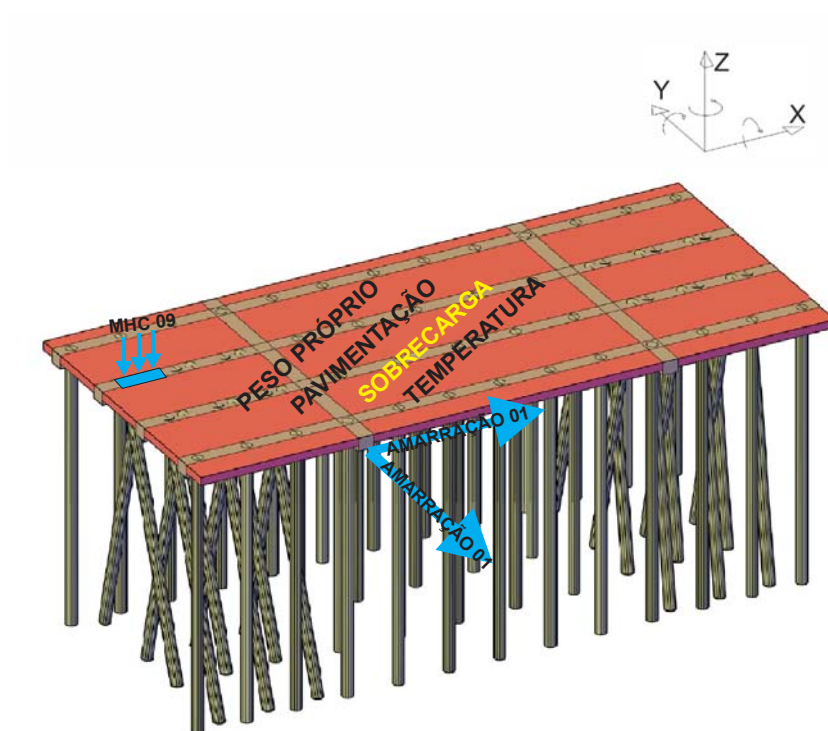


Figura 6.15 – Cargas utilizadas na combinação 37

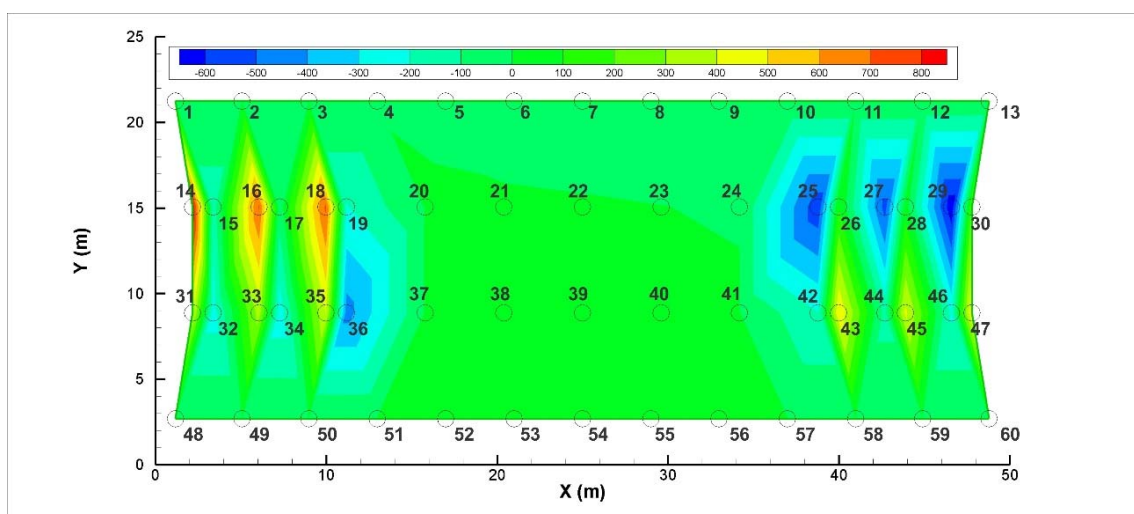


Figura 6.16 – Reações de  $F_y$  em kN para combinação 37.

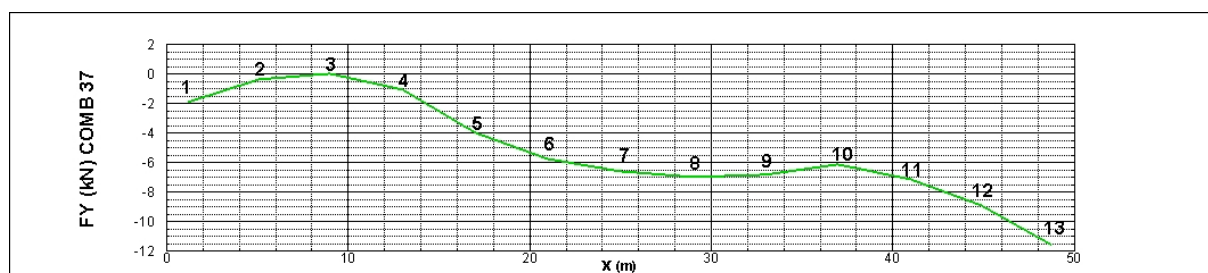


Figura 6.17 – Reações Fy para estacas de 1 a 13 para combinação 37.

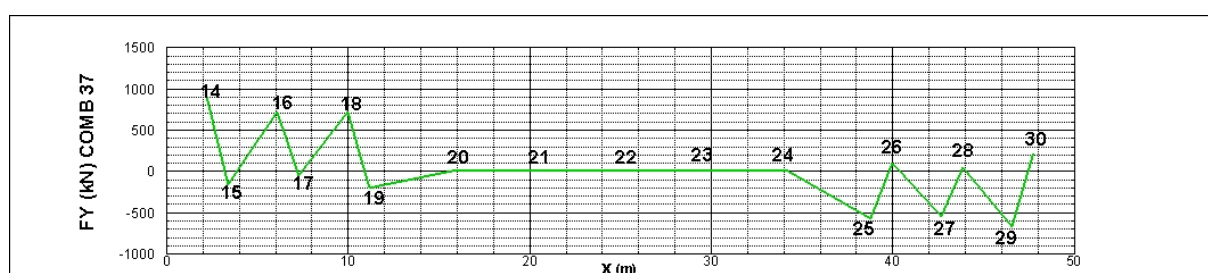


Figura 6.18 – Reações Fy para estacas de 14 a 30 para combinação 37.

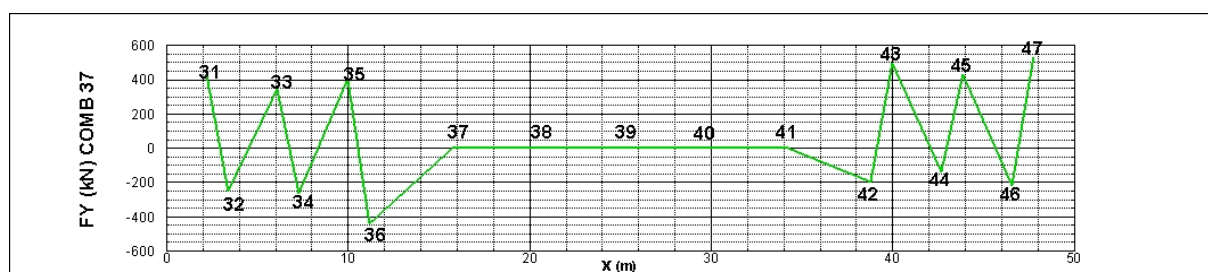


Figura 6.19 – Reações Fy para estacas de 31 a 47 para combinação 37.

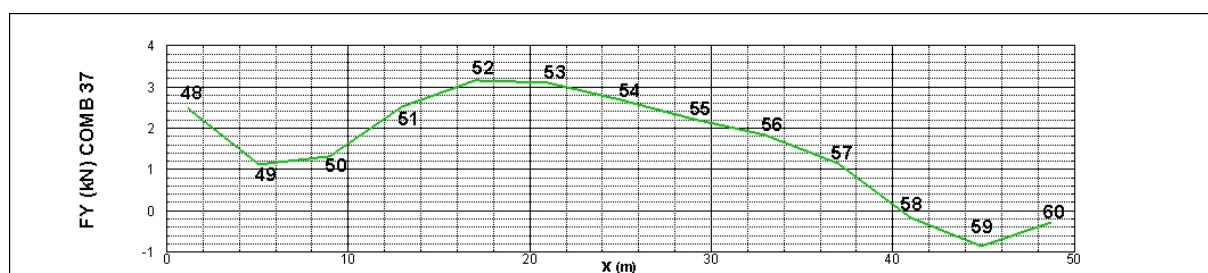


Figura 6.20 – Reações Fy para estacas de 48 a 60 para combinação 37.

#### d) COMBINAÇÃO 84 (FY Mínimo)

Para o esforço FY mínimo 84, o normal seria ter como carga e variável principal a de Amarração 01 (Figura 6.21), que apresenta uma força na direção Y exatamente no sentido oposto a reação mínima de FY. Analisando pelo bom senso, uma combinação apresentando força de atracação seria mais aceitável. Porém, a carga de amarração não tem só esforço na direção Y, mas também na direção X. O fato de ser necessário considerar a força de amarração longitudinal de amarração toda absorvida por uma única corda, faz com que essa força seja consideravelmente maior que as forças da direção Y de amarração e atracação. Esta situação leva a momentos gerados por essa força, principalmente para as estacas mais afastadas do ponto de aplicação da carga, que acaba por gerar reações consideráveis no sentido de reação mínima do eixo Y (Figuras 6.22 a 6.26). Desta forma, fica sim aceitável de que esse carregamento seja a variável principal. Além do mais, em função da carga do guindaste MHC, a reação vertical da estaca 29 chega a 91% da carga máxima FZ crítica de projeto. Isso faz com que a análise desta combinação seja de grande importância.

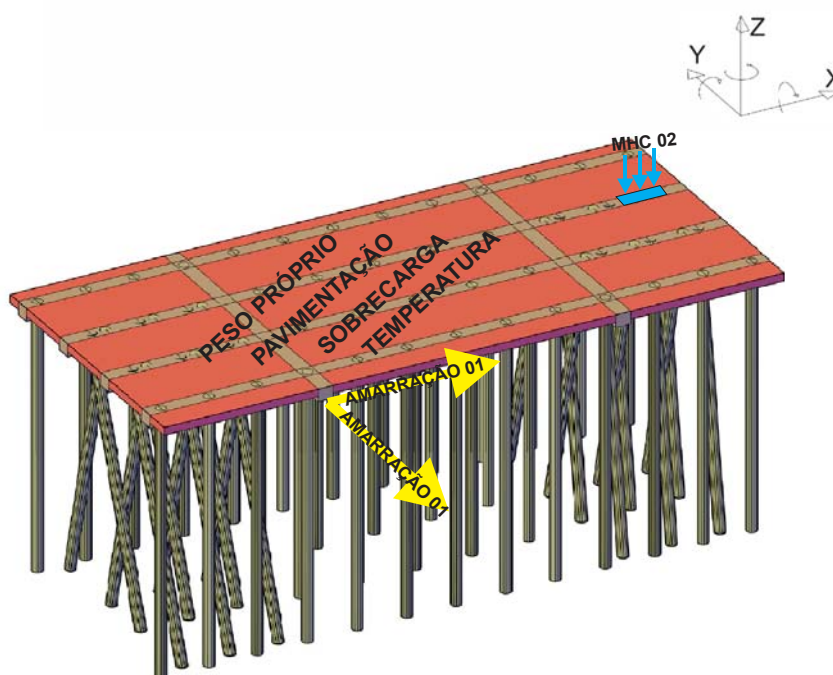


Figura 6.21 – Cargas utilizadas na combinação 84

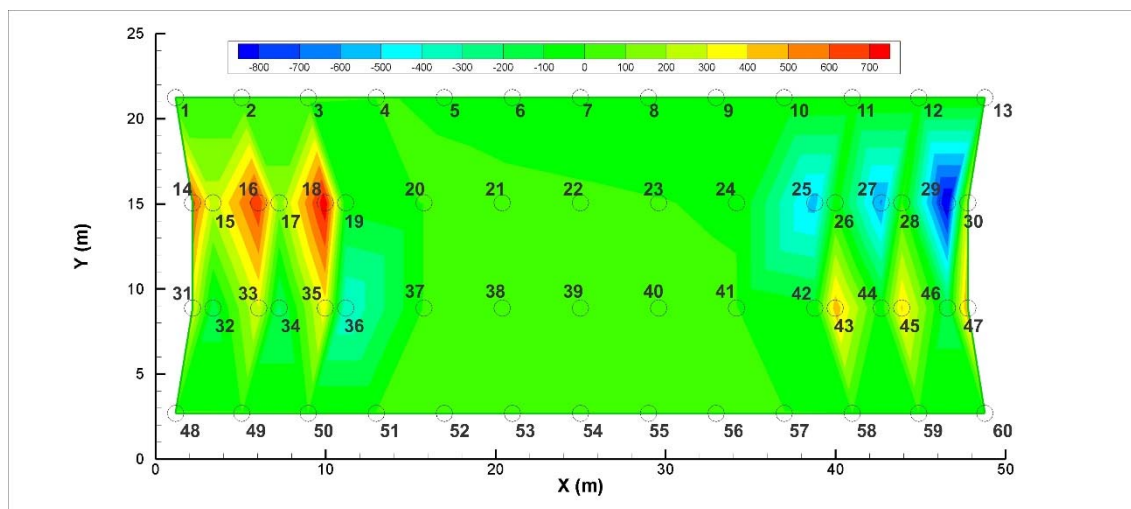


Figura 6.22 – Reações de Fy em kN para combinação 84.

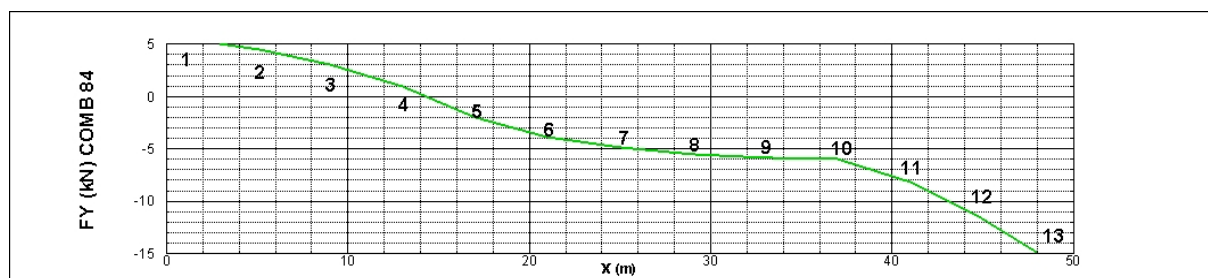


Figura 6.23 – Reações Fy para estacas de 1 a 13 para combinação 84.

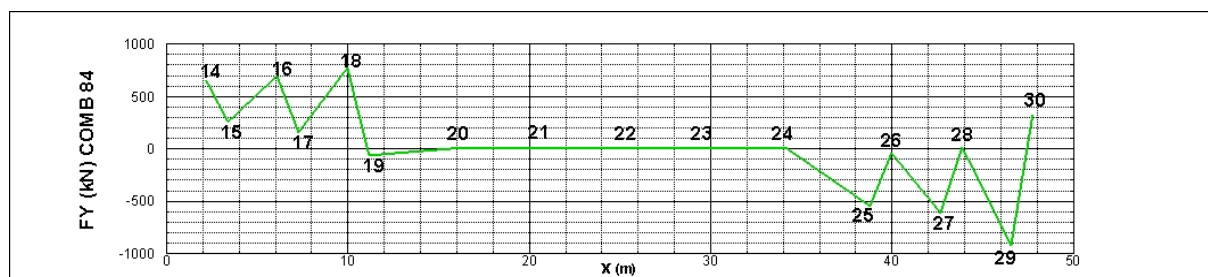


Figura 6.24 – Reações Fy para estacas de 14 a 30 para combinação 84.

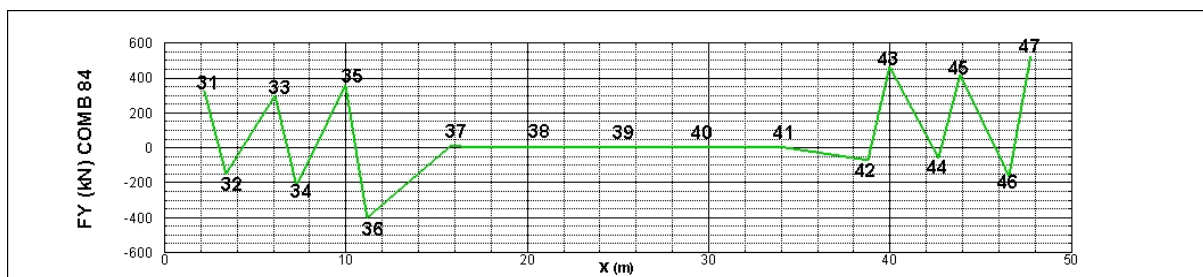


Figura 6.25 – Reações Fy para estacas de 31 a 47 para combinação 84.

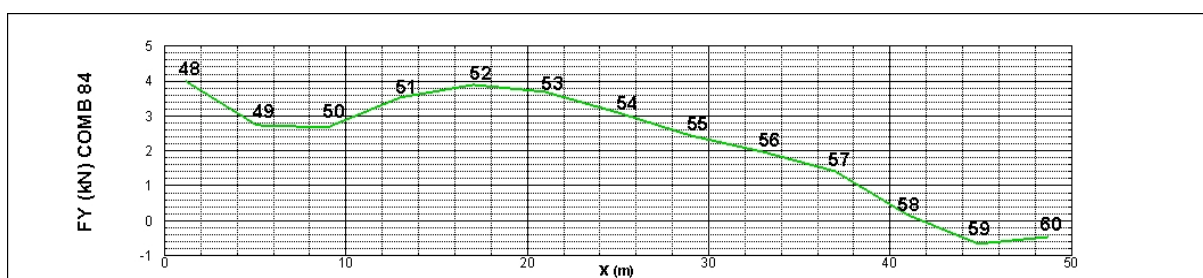


Figura 6.26 – Reações Fy para estacas de 48 a 60 para combinação 84.

#### e) COMBINAÇÃO 177 (FZ Máximo)

Esta combinação era esperada para FZ máximo, contendo o guindaste que gera maior carregamento vertical Portêiner. Também era esperado que as estacas da borda da frente do cais apresentassem maior reação vertical como apresenta as Figuras de 6.27 a 6.32. Esta situação em que três guindastes aparecem em conjunto no mesmo módulo é realmente difícil de ocorrer em um cais. Porém, o cais do Tecon-RS apresenta 6 destes guindastes sobre o cais, podendo se preciso for, utilizar esta configuração. Para esta, os esforços transversais chegam no máximo em torno de 60% da carga crítica de projeto. Mas isto não quer dizer que esta combinação não seja importante.





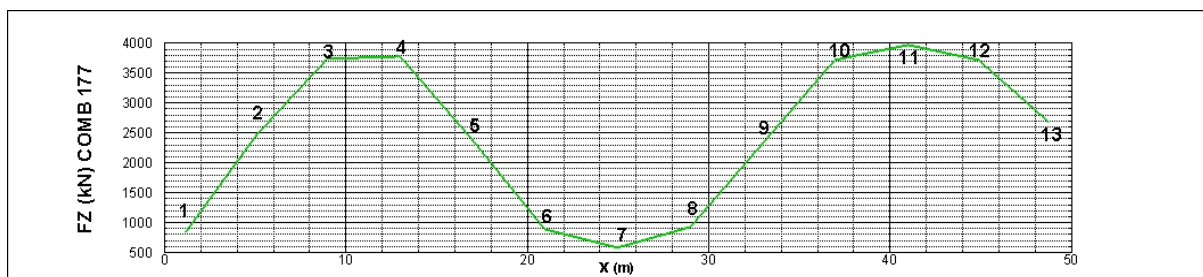


Figura 6.29 – Reações Fz para estacas de 1 a 13 para combinação 177.

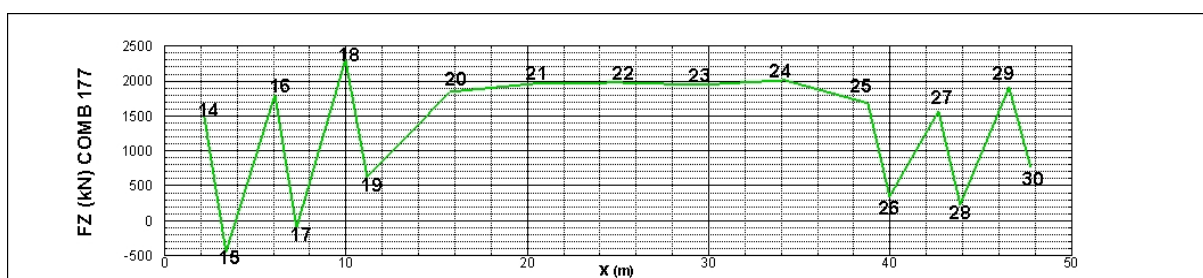


Figura 6.30 – Reações Fz para estacas de 14 a 31 para combinação 177.

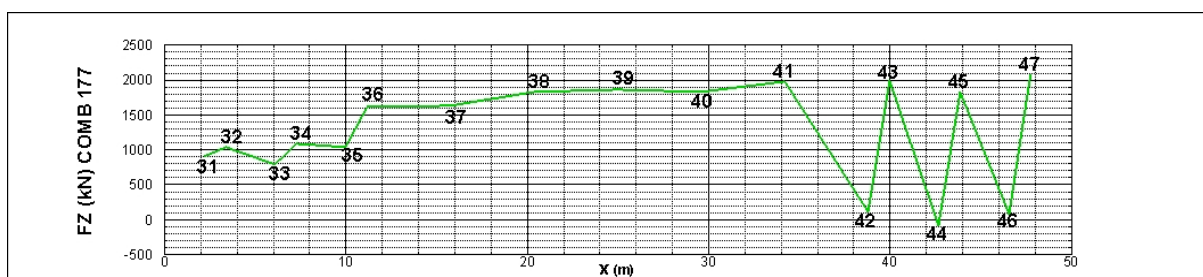


Figura 6.31 – Reações Fz para estacas de 31 a 47 para combinação 177.

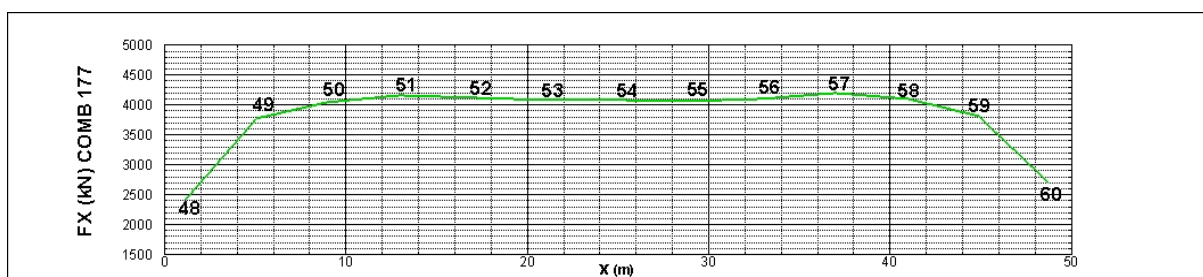


Figura 6.32 – Reações Fz para estacas de 48 a 60 para combinação 177.

#### f) COMBINAÇÃO 79 (FZ Mínimo)

Na combinação de FZ mínimo, foram adotados coeficientes de minoração para cargas permanentes. Os esforços de tração neste caso não aparecem em todas as estacas, como demonstram as figuras de 6.33 a 6.38, mas em algumas pode-se considerar importante para o dimensionamento das estacas. Essa tração se dá pelos momentos gerados da força de amarração dos navios no cais. Como as reações transversais não chegam a passar dos 67% em relação as cargas críticas, além do esforço de tração importante a ser analisado, de resto não deve gerar preocupações para o dimensionamento do cais.

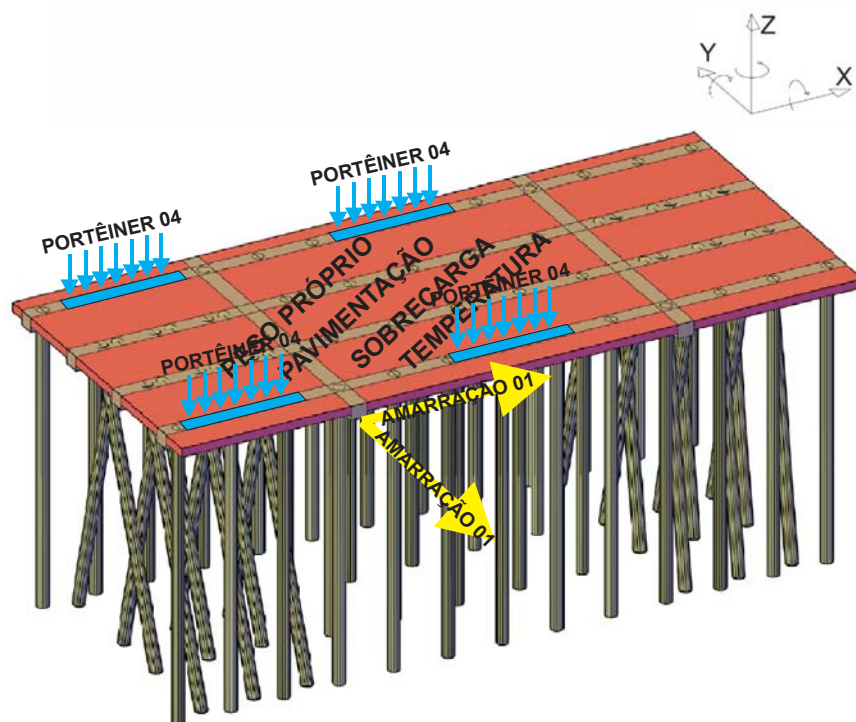


Figura 6.33 – Cargas utilizadas na combinação 79



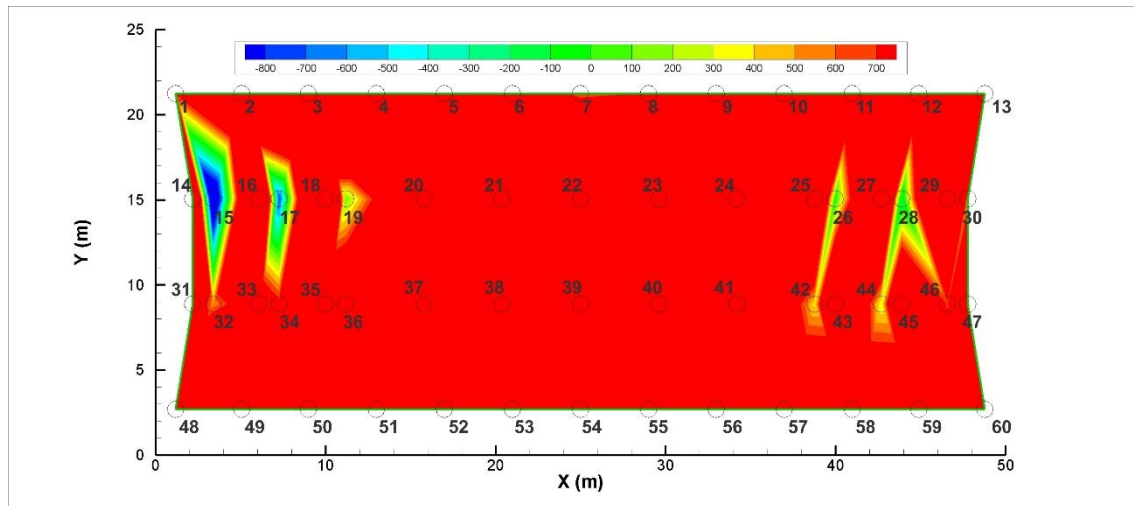


Figura 6.34 – Reações de Fz em kN para combinação 79.

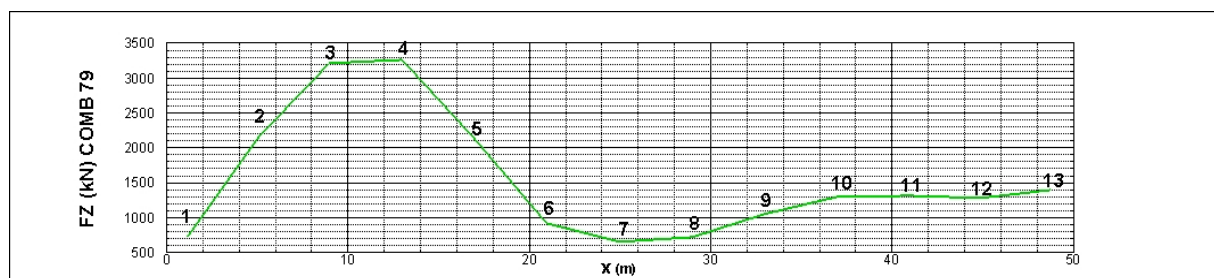


Figura 6.35 – Reações Fz para estacas de 1 a 13 para combinação 79.

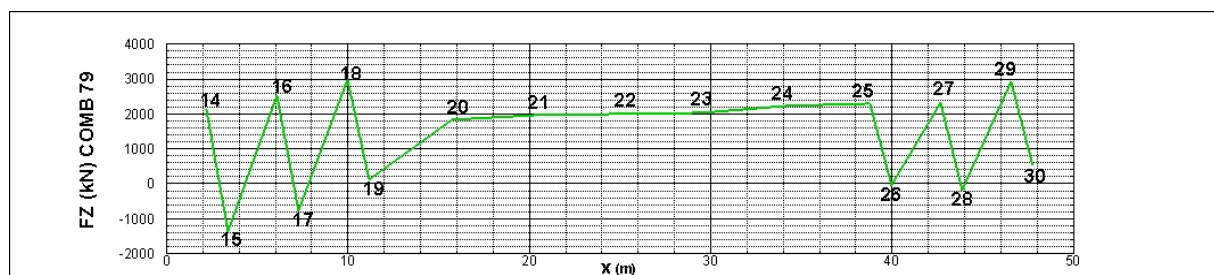


Figura 6.36 – Reações Fz para estacas de 14 a 30 para combinação 79.

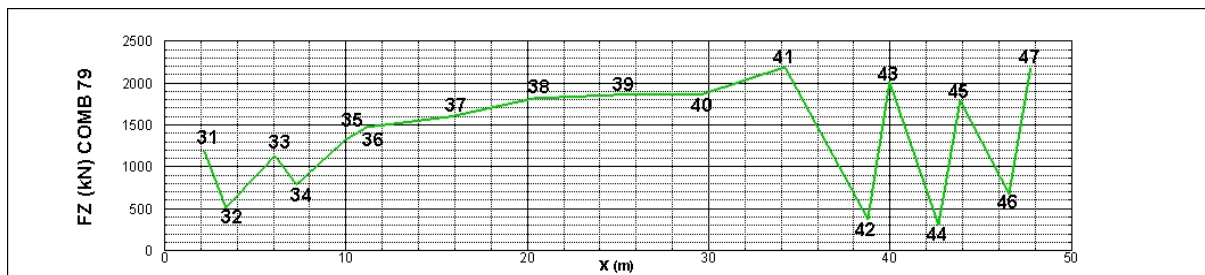


Figura 6.37 – Reações Fz para estacas de 32 a 47 para combinação 79.

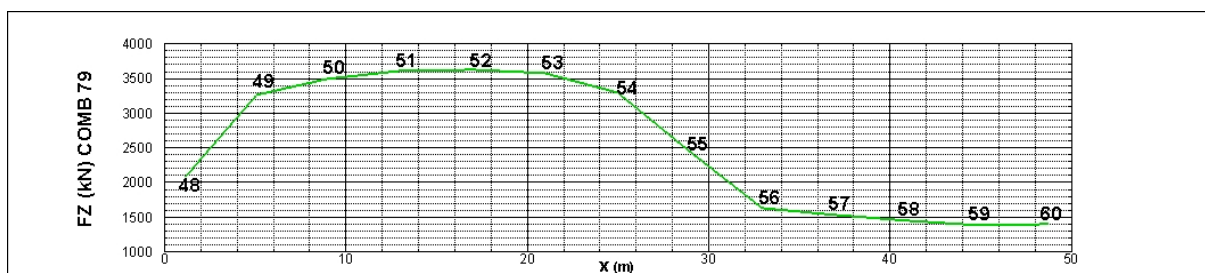


Figura 6.38 – Reações Fz para estacas de 48 a 60 para combinação 79.

**g) COMBINAÇÃO 16 (MX Máximo), COMBINAÇÃO 92 (MX Mínimo), COMBINAÇÃO 117 (MY Máximo), COMBINAÇÃO 82 (MY Mínimo), COMBINAÇÃO 102 (MZ Máximo) e COMBINAÇÃO 76 (MZ Mínimo) .**

Para as combinações de momentos, se verificou que as estacas inclinadas ficam responsáveis pela absorção da maioria desses esforços. Essa conclusão era esperada, uma vez que a estaca estando inclinada, tem maior capacidade de absorver reações em X, Y, do que as estacas verticais. Observando os resultados dos momentos nos gráficos das Figuras de 6.39 a 6.74, mostra-se que esses esforços não tem uma regra para uma ou outra ser a mais importante na produção destas reações que possa se utilizar de forma geral, isso depende muito da geometria e rigidez da estrutura. Para a combinação 16, por exemplo, a variável principal é a sobrecarga, produzindo um momento máximo na estaca 14, mas, analisando cada carregamento aplicado, o peso próprio da estrutura é a ação que gera mais reação MX nesta estaca, seguido pela sobrecarga que produz menos da metade do que o peso próprio, e depois a carga de atracção. Uma outra situação importante, verificada para esta combinação, é que as reações

dos outros esforços são consideravelmente menores em relação às combinações de reações de forças máximas e mínimas.

Na combinação 92, é possível se perceber uma situação muito parecida com a combinação 16, mas claro, utilizando a ação de amarração ao contrário da atracação. Em virtude de a força de amarração ser um pouco superior à força de atracação, apresenta-se uma reação mínima um pouco maior que para a reação de máxima. A estaca a receber esse esforço é a estaca 15 e, de acordo com os gráficos se percebe que enquanto uma estaca inclinada absorve esforço para a direção de máxima, a próxima estaca vizinha, inclinada para o outro lado recebe o esforço de mínima. Para esta combinação o peso próprio também produz às principais ações, seguindo pela a amarração. Neste caso, por não ser carga de Portêiner e sim do MHC, a sobrecarga é a mesma para todo o cais e, como o módulo do cais é praticamente simétrico, os momentos são desconsideráveis. Este fator serve também para a ação de pavimentação.

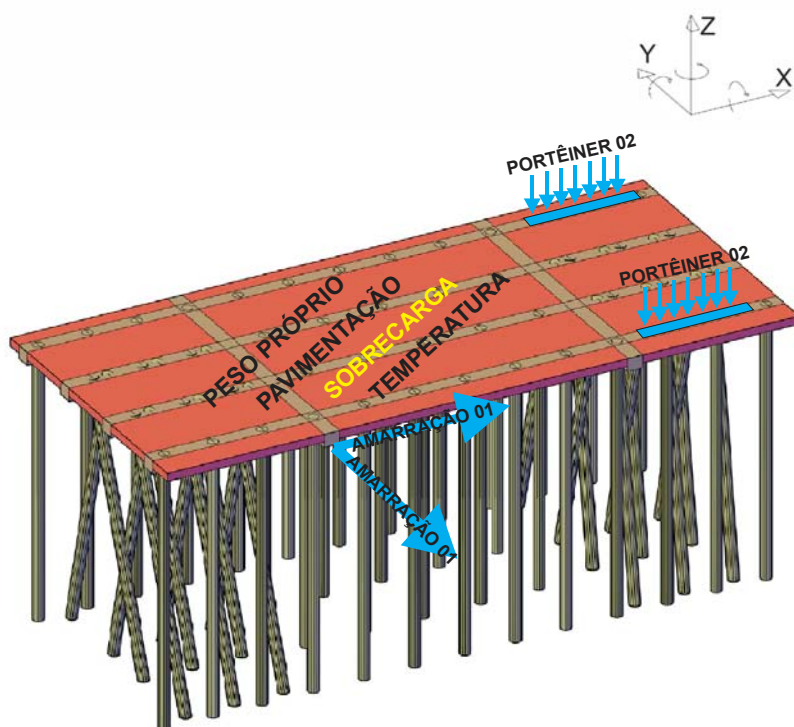


Figura 6.39 – Cargas utilizadas na combinação 16

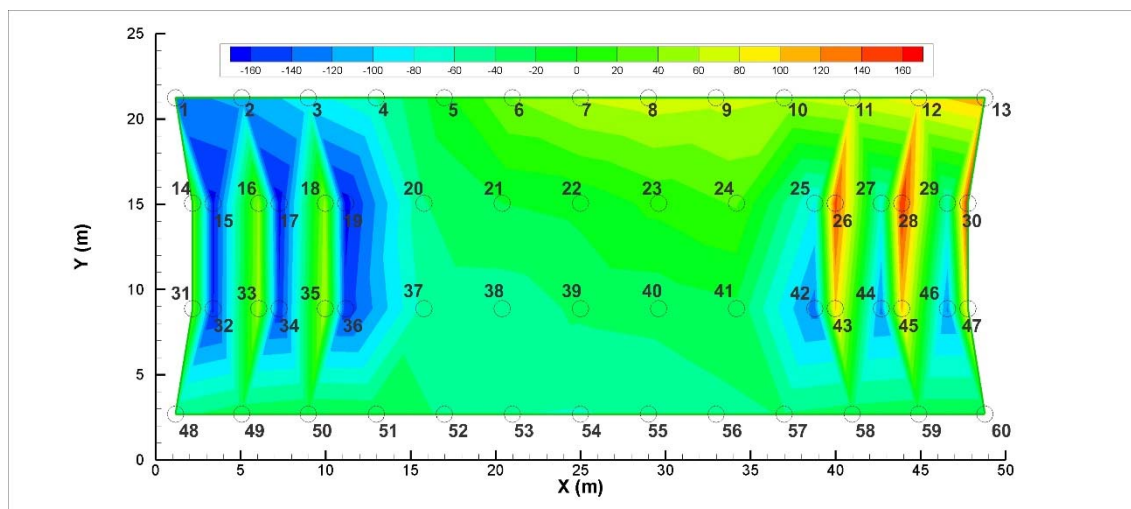


Figura 6.40 – Reações de Mx em kNm para combinação 16.

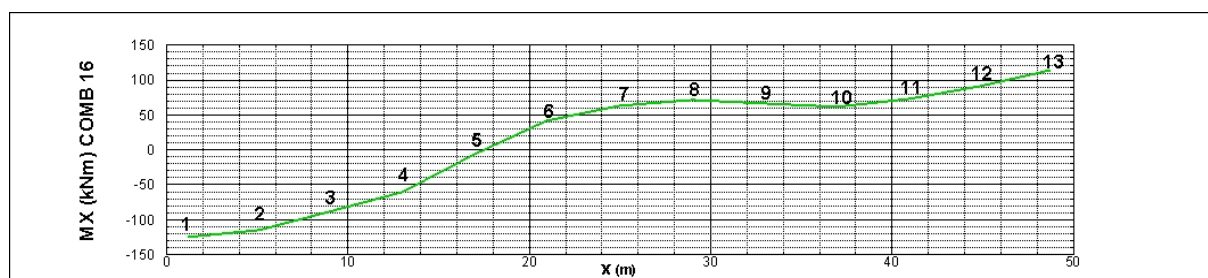


Figura 6.41 – Reações Mx para estacas de 1 a 13 para combinação 16.

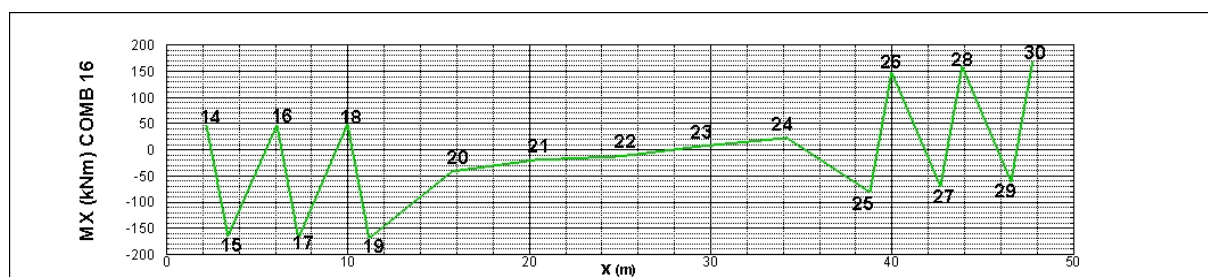


Figura 6.42 – Reações Mx para estacas de 14 a 30 para combinação 16.

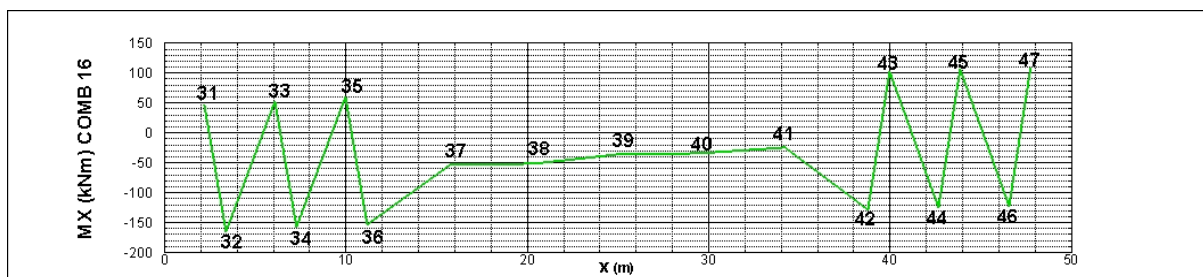


Figura 6.43 – Reações Mx para estacas de 31 a 47 para combinação 16.

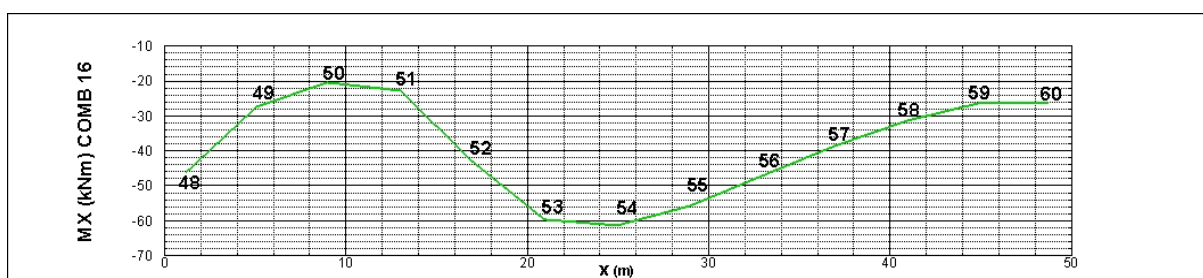


Figura 6.44 – Reações Mx para estacas de 48 a 60 para combinação 16.

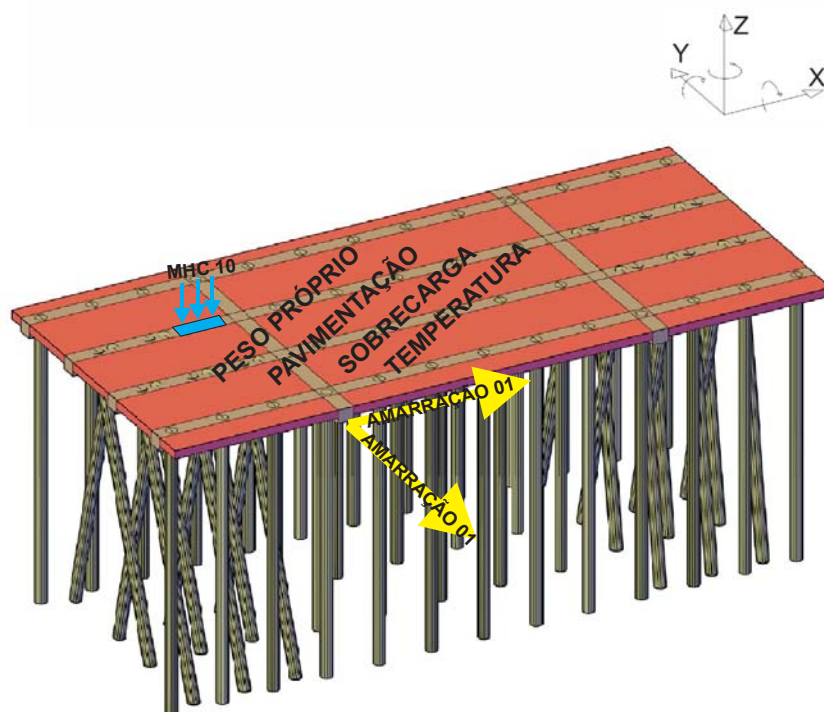


Figura 6.45 – Cargas utilizadas na combinação 92

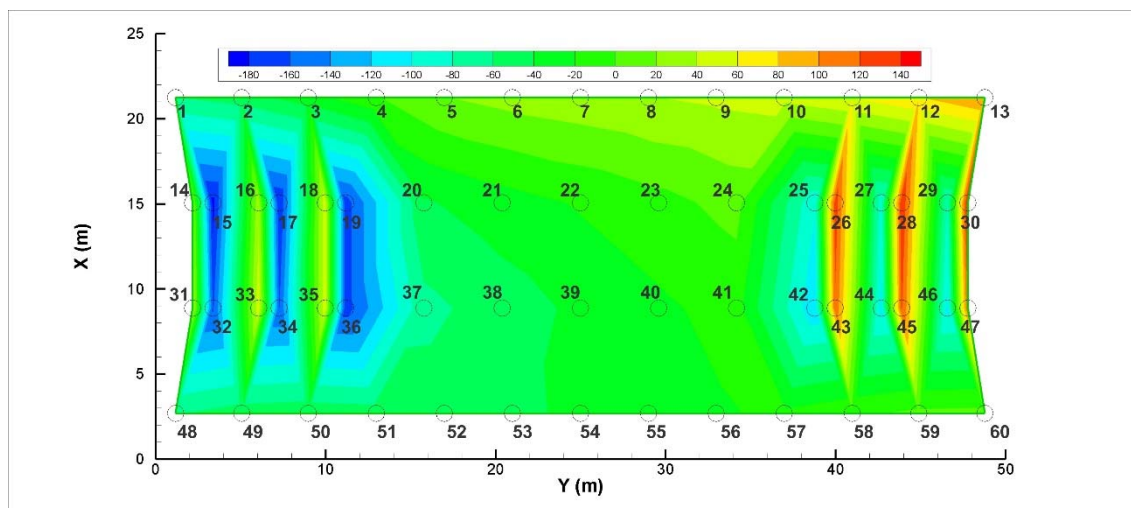


Figura 6.46 – Reações de  $M_x$  em kNm para combinação 92.

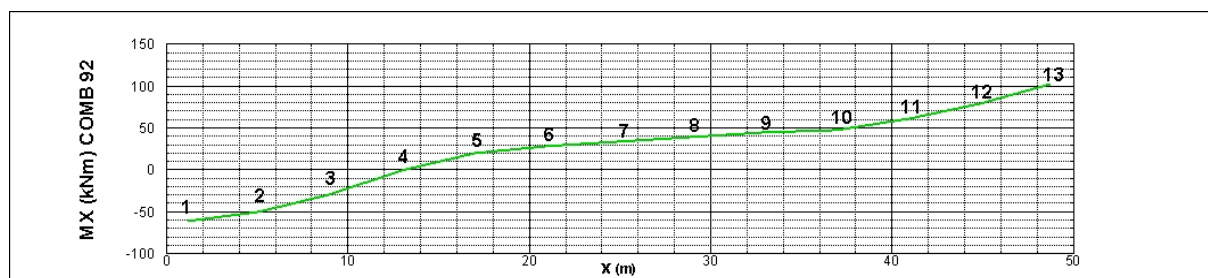


Figura 6.47 – Reações  $M_x$  para estacas de 1 a 13 para combinação 92.

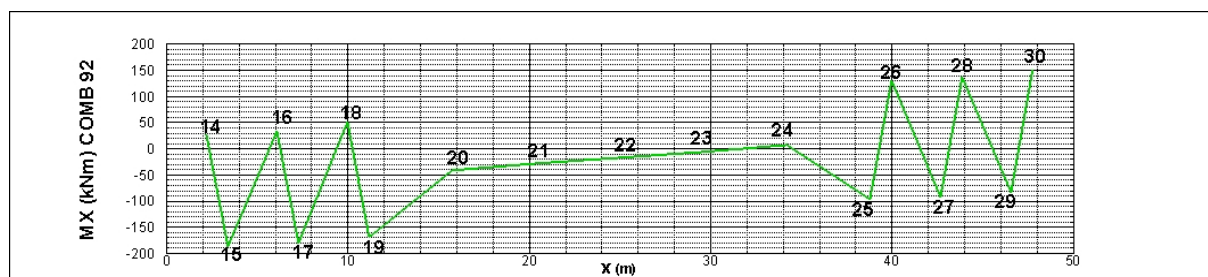


Figura 6.48 – Reações  $M_x$  para estacas de 14 a 30 para combinação 92.



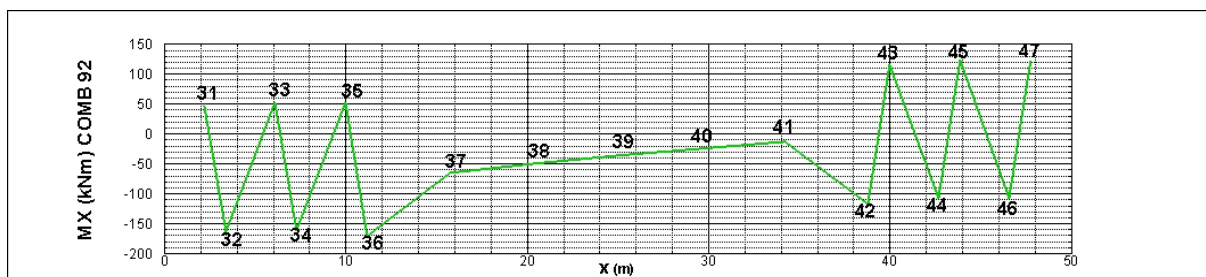


Figura 6.49 – Reações Mx para estacas de 31 a 47 para combinação 92.

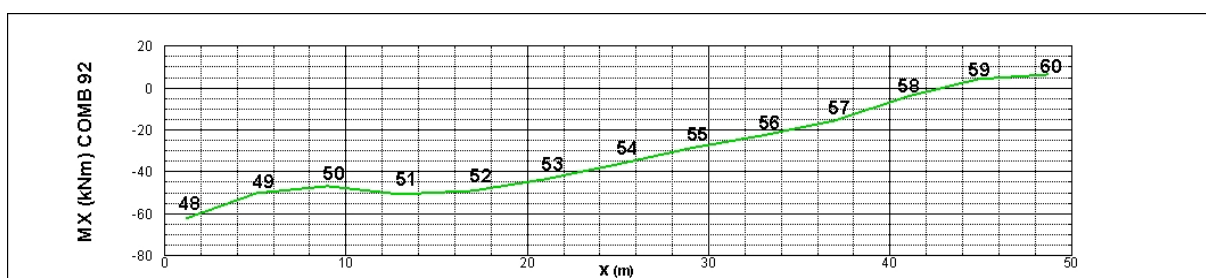


Figura 6.50 – Reações Mx para estacas de 48 a 60 para combinação 92.

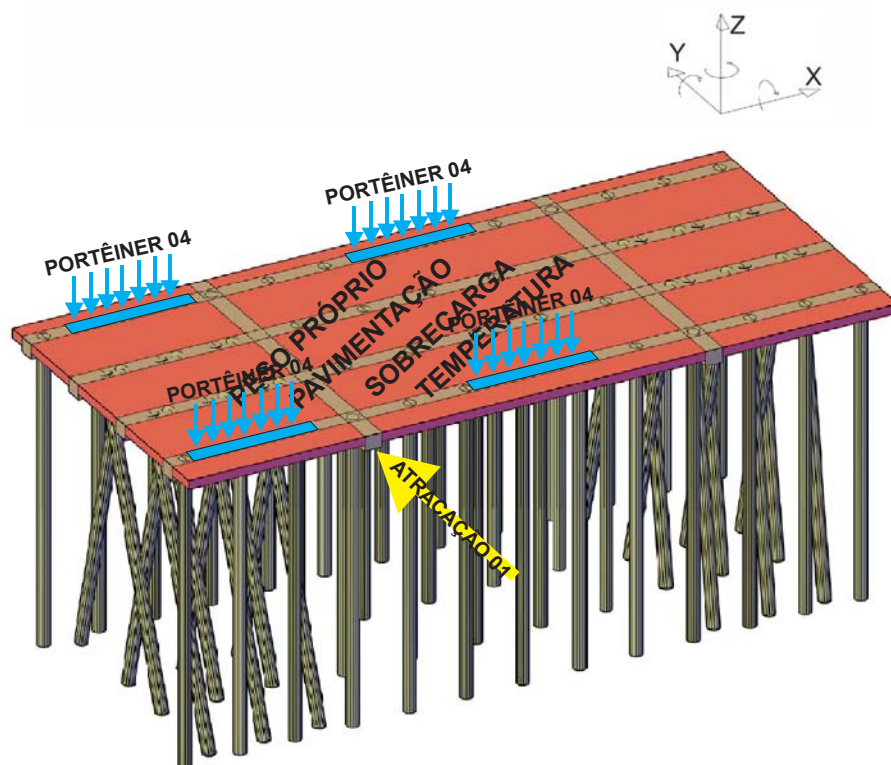


Figura 6.51 – Cargas utilizadas na combinação 117.

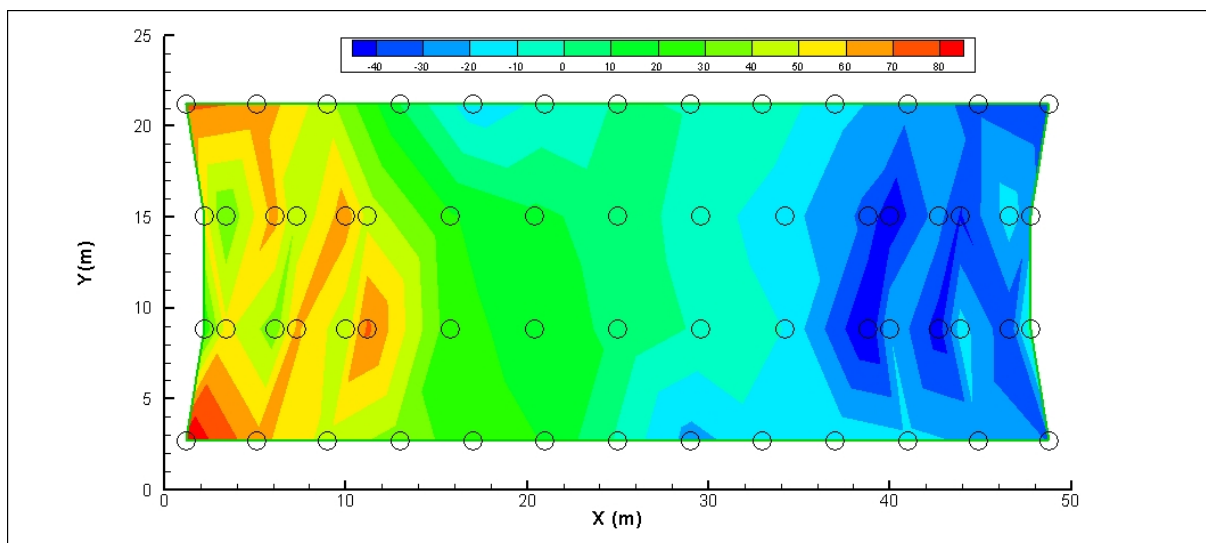


Figura 6.52 – Reações de My em kNm para combinação 117.

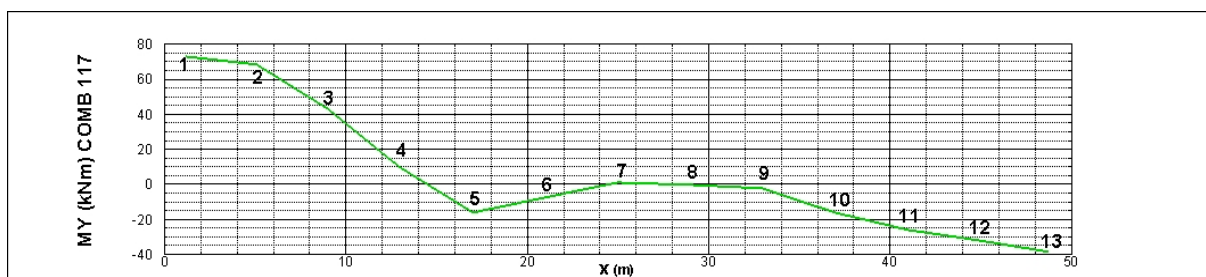


Figura 6.53 – Reações My para estacas de 1 a 13 para combinação 117.

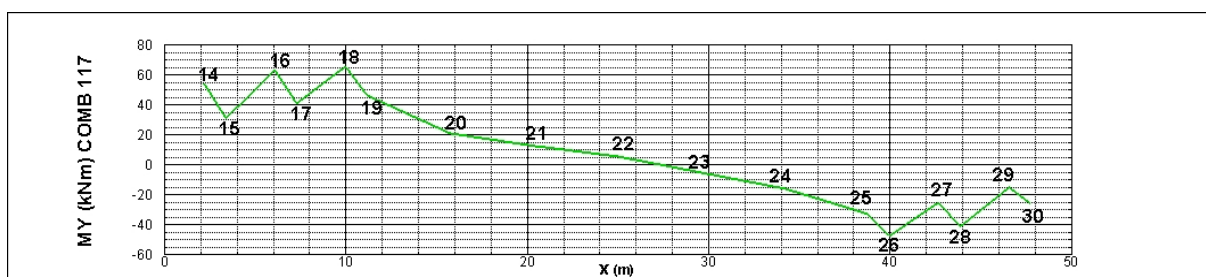


Figura 6.54 – Reações Mx para estacas de 14 a 30 para combinação 117.



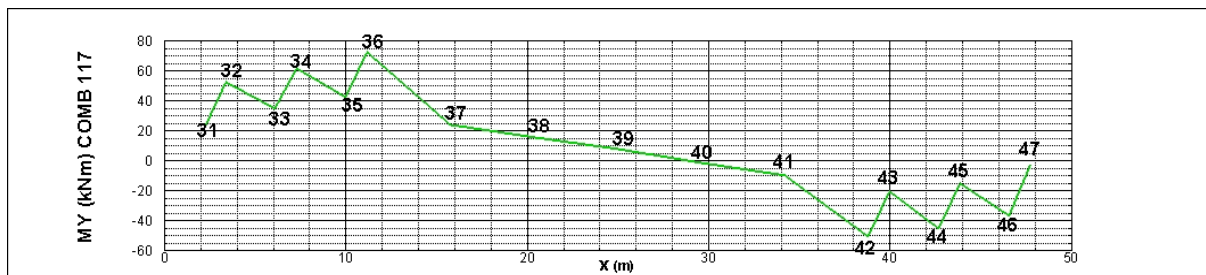


Figura 6.55 – Reações Mx para estacas de 32 a 47 para combinação 117.

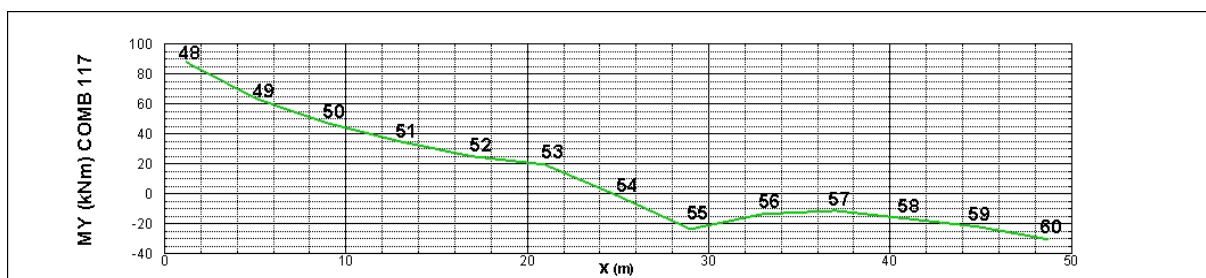


Figura 6.56 – Reações Mx para estacas de 48 a 60 para combinação 117.

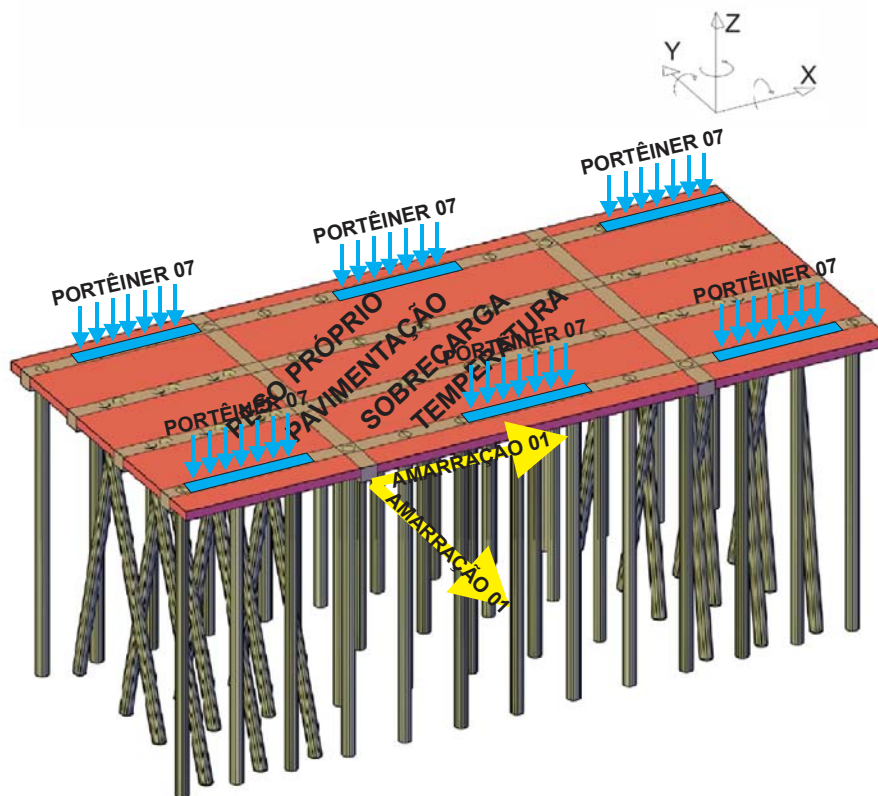


Figura 6.57 – Cargas utilizadas na combinação 82.

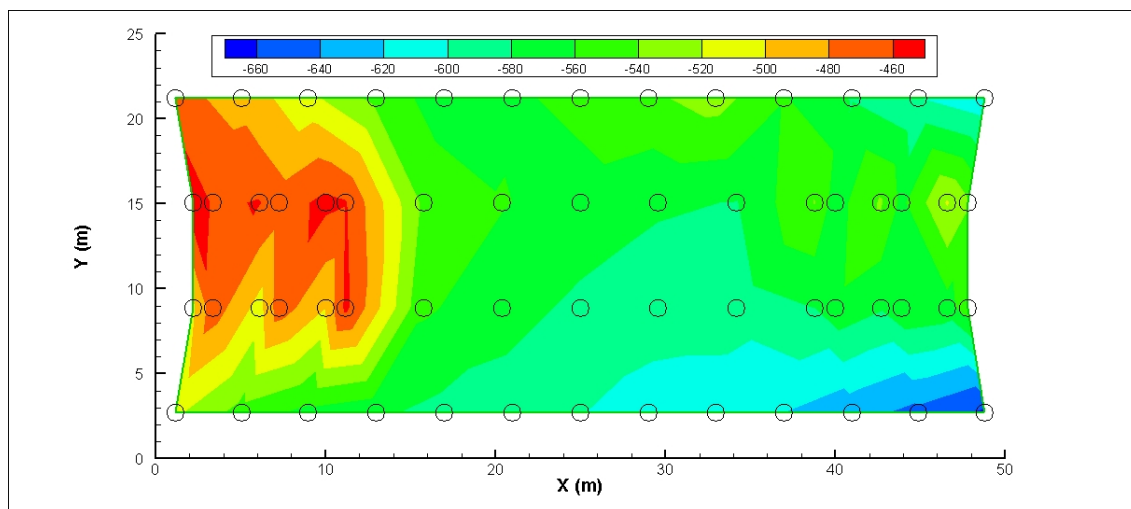


Figura 6.58 – Reações de My em kNm para combinação 82.

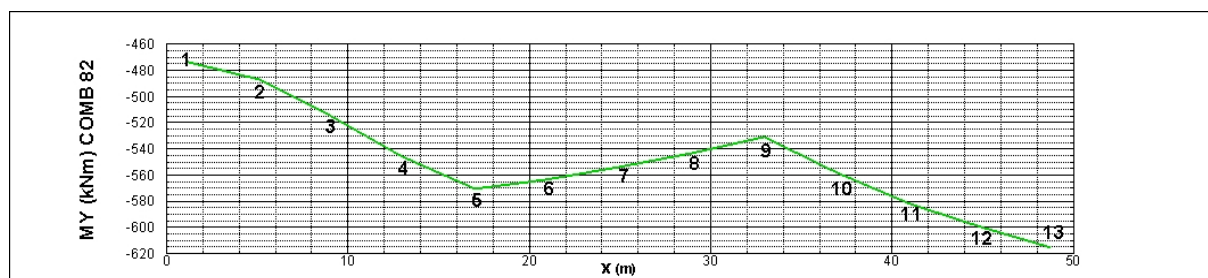


Figura 6.59 – Reações My para estacas de 1 a 13 para combinação 82.

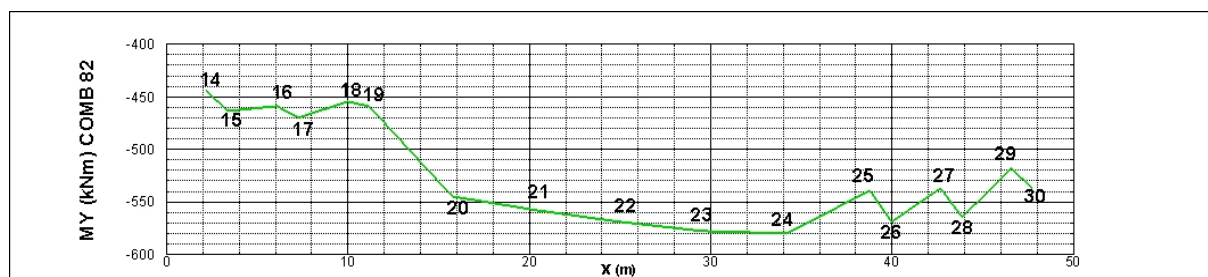


Figura 6.60 – Reações My para estacas de 14 a 60 para combinação 30.

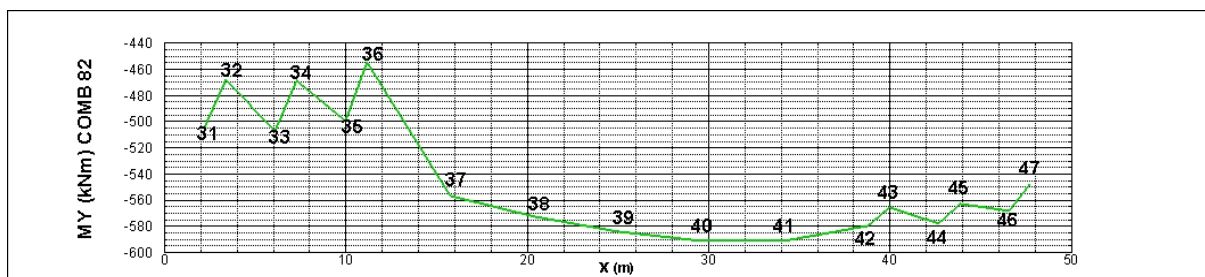


Figura 6.61 – Reações My para estacas de 31 a 47 para combinação 82.

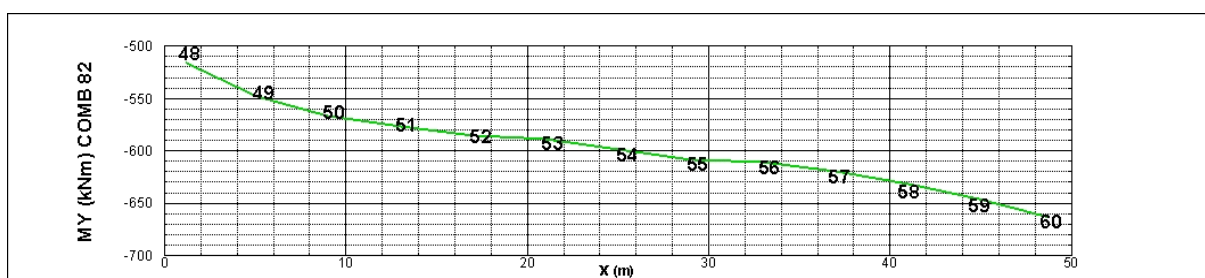


Figura 6.62 – Reações My para estacas de 48 a 60 para combinação 82.

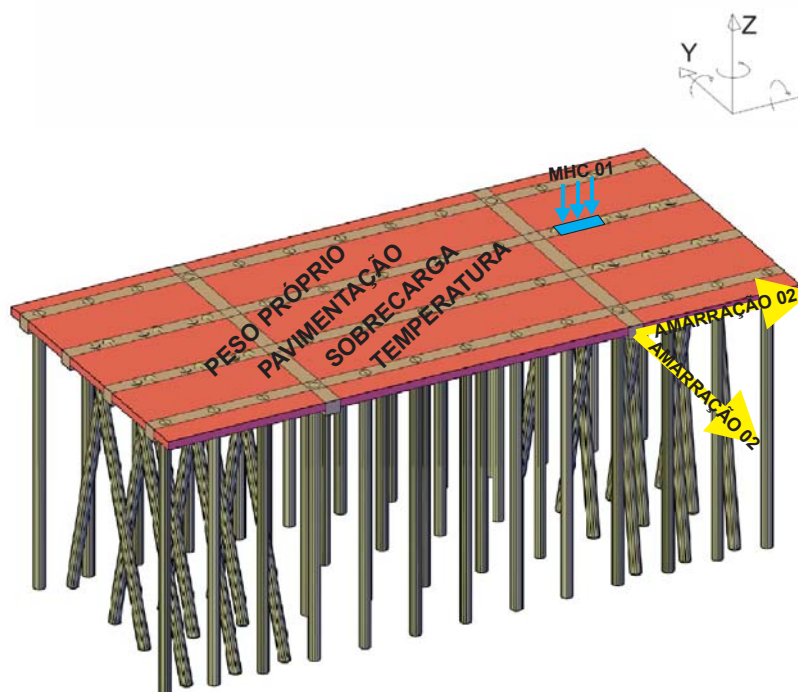


Figura 6.63 – Cargas utilizadas na combinação 102.

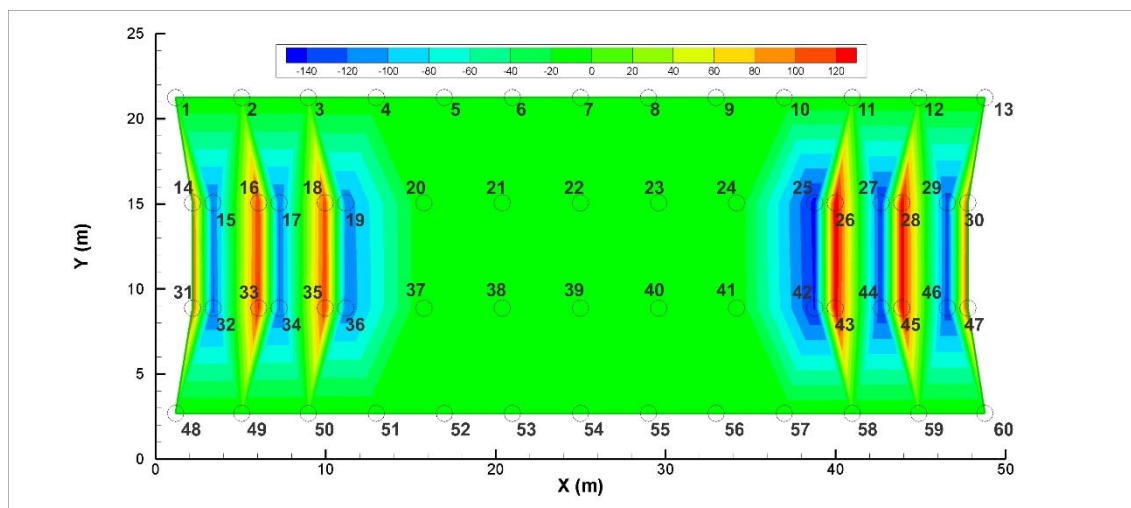


Figura 6.64 – Reações de  $M_z$  em kNm para combinação 102.

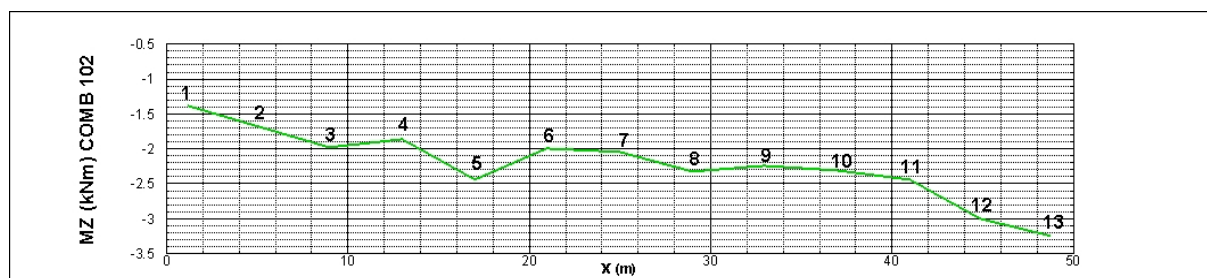


Figura 6.65 – Reações  $M_z$  para estacas de 1 a 13 para combinação 102.

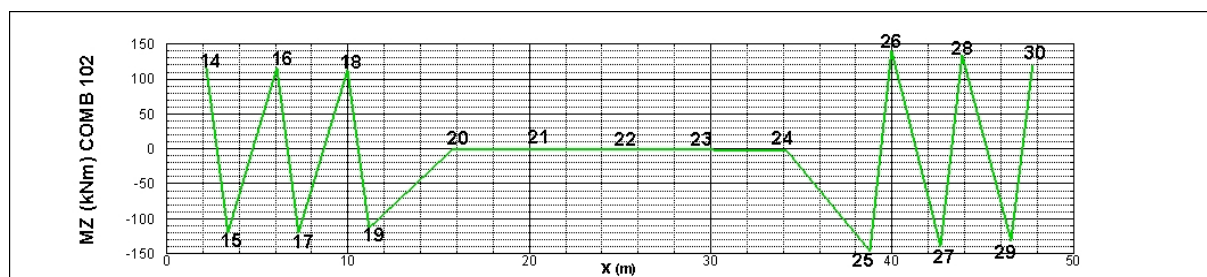


Figura 6.66 – Reações  $M_z$  para estacas de 14 a 30 para combinação 102.

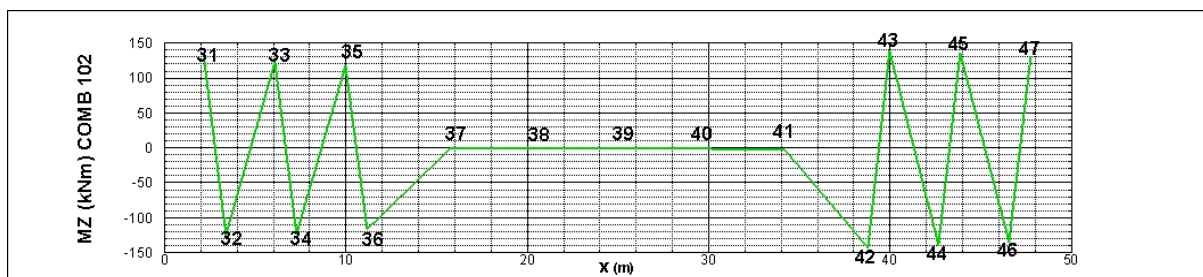


Figura 6.67 – Reações Mz para estacas de 31 a 47 para combinação 102.

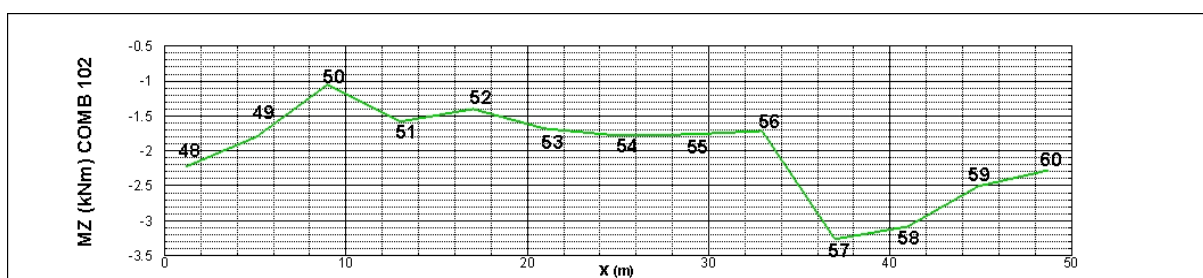


Figura 6.68 – Reações Mz para estacas de 48 a 60 para combinação 102.

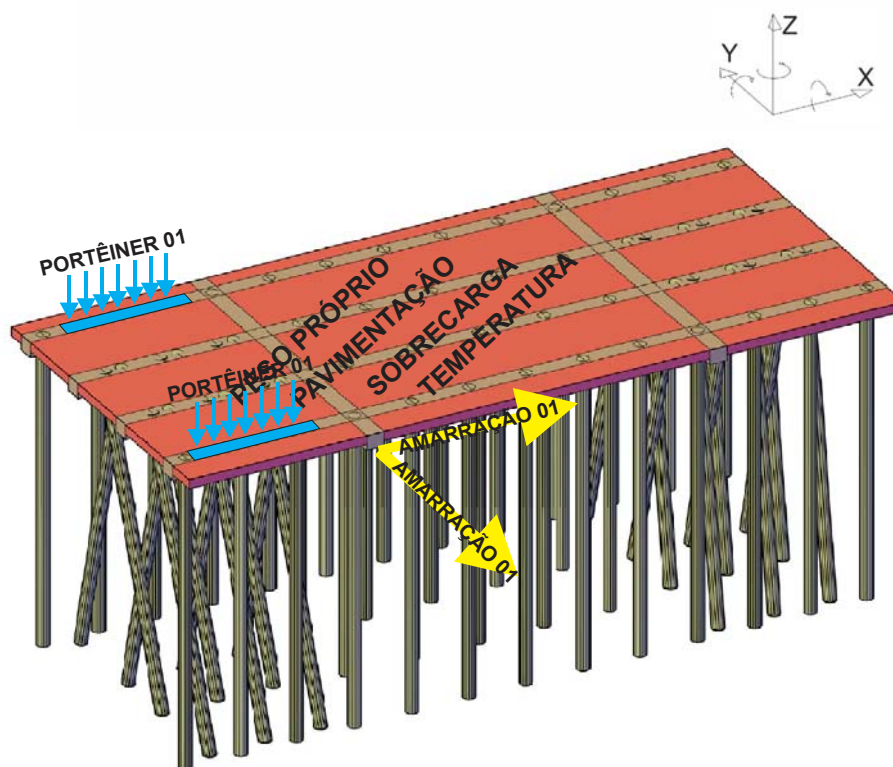


Figura 6.69 – Cargas utilizadas na combinação 76.

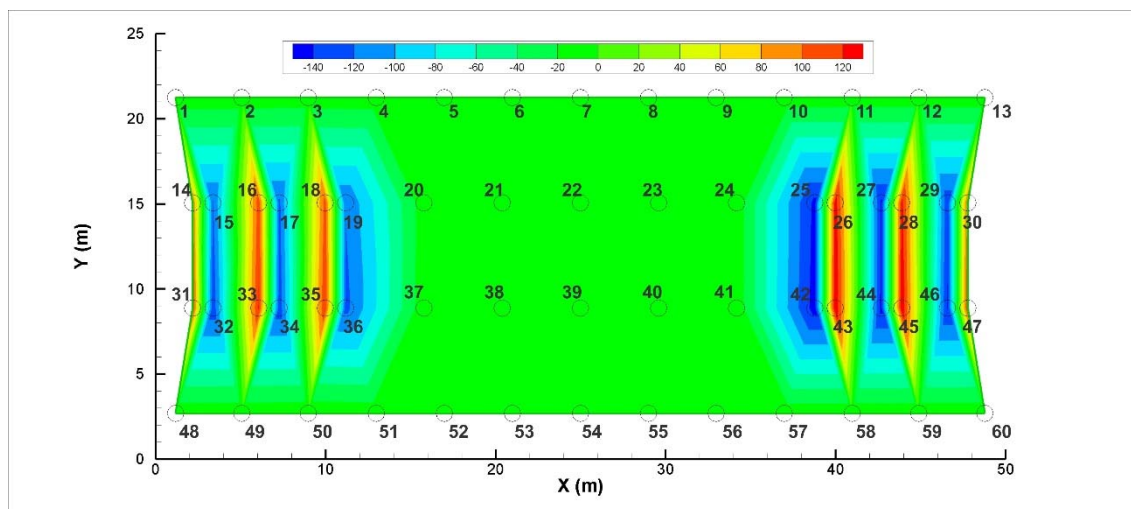


Figura 6.70 – Reações de  $M_z$  em kNm para combinação 76.

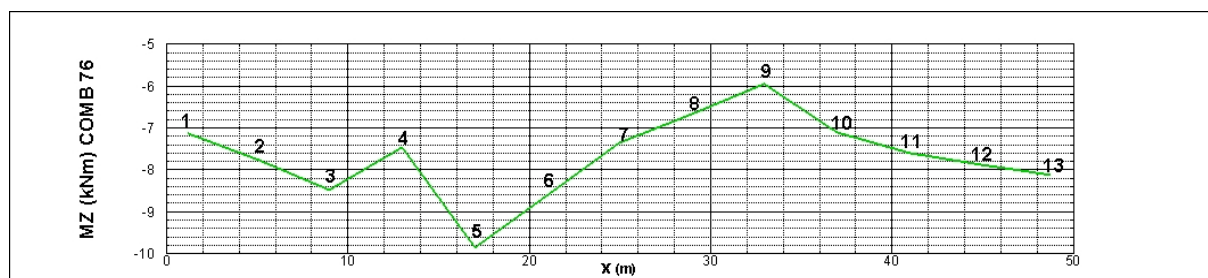


Figura 6.71 – Reações  $M_z$  para estacas de 1 a 13 para combinação 76.

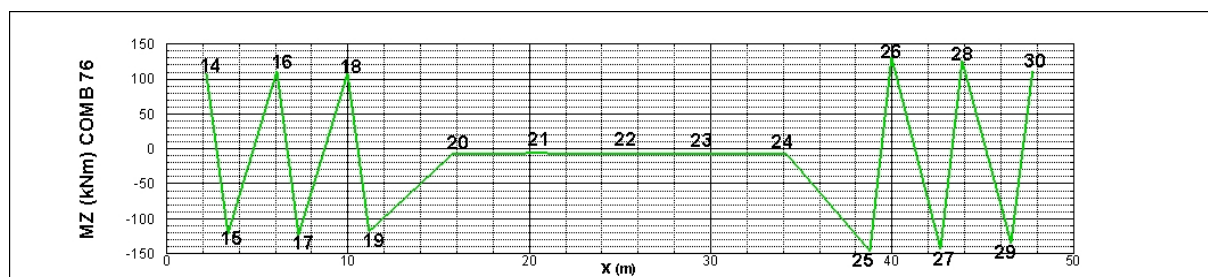


Figura 6.72 – Reações  $M_z$  para estacas de 14 a 30 para combinação 76.



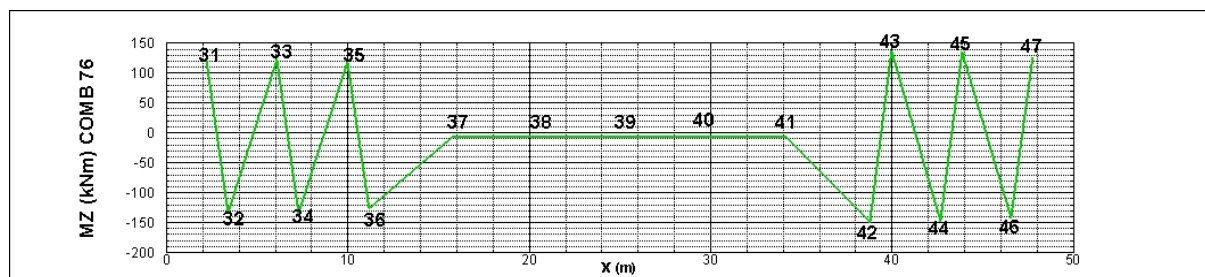


Figura 6.73 – Reações Mz para estacas de 31 a 47 para combinação 76.

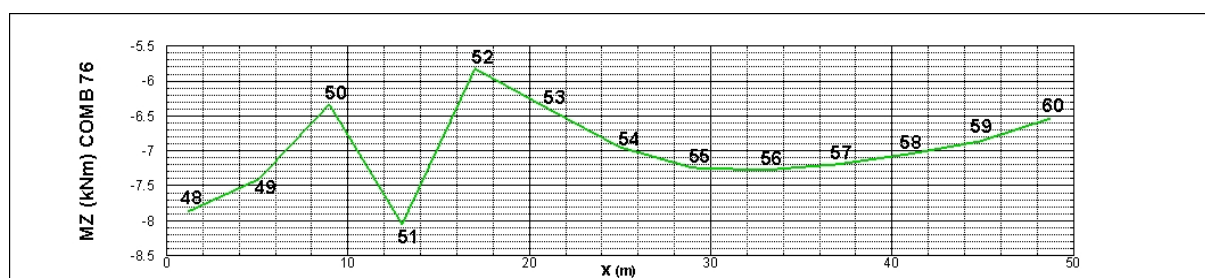


Figura 6.74 – Reações Mz para estacas de 48 a 60 para combinação 76.

#### h) Combinações de relevância para o dimensionamento

Para analisar quais seriam as principais combinações em relação ao dimensionamento da estrutura, se confrontou o momento fletor com o esforço normal e o momento torçor com o esforço cortante das estacas mais carregadas das 12 combinações analisadas.

Analisando a Figura 6.75 a combinação mais relevante é a 177, onde apresenta o Fz máximo da estrutura, seguida pelas combinações 37 (Fy máx), 91 (Fx mín) e 84 (Fy mín). Estas combinações serão as principais para o dimensionamento das estacas.

Já analisando a Figura 6.76, destaca-se a combinação 102 para Mz máximo, de onde provavelmente sairá o dimensionamento da armadura transversal das estacas.

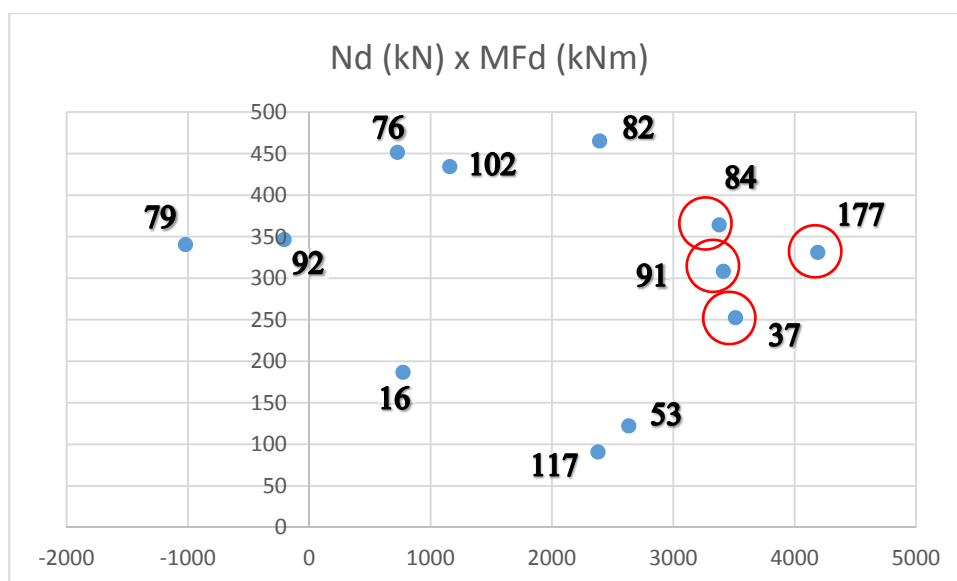


Figura 6.75 – Gráfico apresentando Esforço Normal x Momento Fletor das estacas de maior esforço das 12 combinações analisadas.

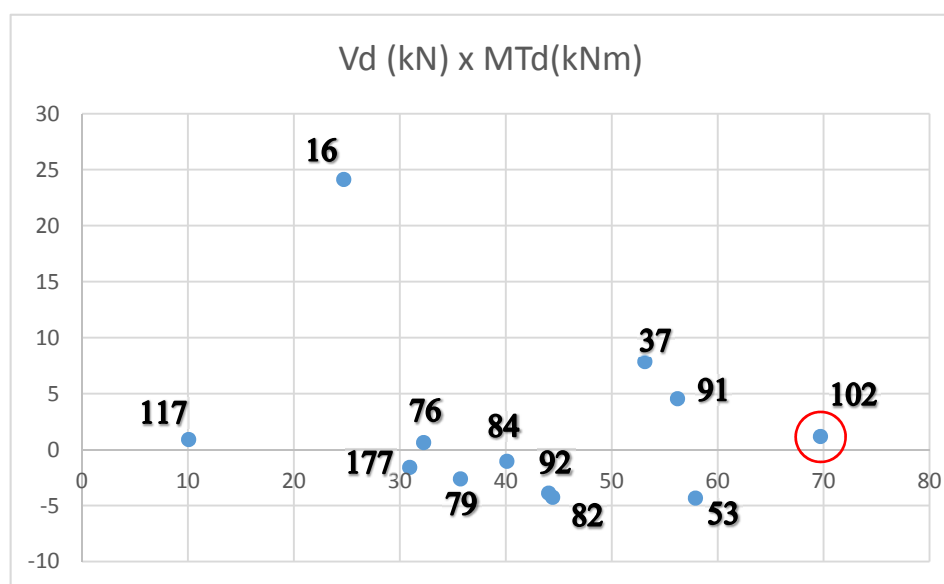


Figura 6.76 – Gráfico apresentando Esforço Cortante x Momento torçor das estacas de maior esforço das 12 combinações analisadas.



## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve o objetivo de determinar a distribuição das cargas sobre as estacas de um cais de contêineres de paramento aberto, demonstrando os caminhos e dificuldades percorridos para se determinar os carregamentos, onde aplicá-los e, se utilizando de diversas combinações de esforços nas situações mais desfavoráveis, verificar a distribuição de cargas nas fundações.

Realizou-se um estudo detalhado sobre obras de acostagem e em relação aos cais de contêineres e concluiu-se que são de suma importância, uma vez que o contêiner, além de automatizar a movimentação de carga gerando produtividade, movimenta considerável parcela da economia não só no país como no mundo.

Para fatores ambientais, ficou claro a complexidade do estudo, visto que não basta apenas desenvolver um projeto, deve-se conhecer a região de forma que para determinar os esforços, depende do tipo de canal, profundidade do canal, velocidade do vento e corrente da região, tipo de manobra de acostagem, tamanho do navio, entre outros.

Concluiu-se que a proteção das defensas do cais é de suma importância tanto para a segurança do cais, como para segurança do navio, uma vez que nem o navio pode introduzir a força gerada pela energia cinética da acostagem diretamente sobre o cais e nem a defesa deve ser capaz de devolver uma força considerável para o casco do navio quando voltar a geometria original. Já os esforços de amarração ficam prejudicados pela falta de informação da geometria completa do navio pelas bibliografias e fabricantes.

Também ficou clara a dificuldade de trabalhar com bibliografias nacionais, visto que estão desatualizadas em relação à evolução dos canais, portos e navios porta-contêineres. A própria norma de ações em estruturas portuárias é datada de 1987. Quando calculada a energia de atracação para o método da PIANC e, posteriormente pelo método da norma brasileira, se confirmou a defasagem da norma brasileira. Este fator demonstra o descaso com um dos modais de transportes mais importantes do país movimentando mais de 90% do comércio exterior brasileiro.

Nos resultados apresentados pela análise numérica da estrutura, concluiu-se que existe um equilíbrio entre as estacas verticais e inclinadas, de forma que as estacas verticais ficam responsáveis principalmente por absorverem as ações verticais, enquanto que as estacas inclinadas ficam responsáveis por absorverem as ações transversais ao cais, sempre na direção de maior rigidez.

Percebe-se que as estacas da borda do cais são as mais carregadas e que, a linha de estacas da borda do cais com o mar tem o maior esforço de reação vertical, em função da carga gerada pela lança do guindaste Portêiner.

Também é importante salientar que o fato de a carga vertical sempre se opor às transversais quando decompostas na situação de cortante da estaca, fazendo com que estes esforços fiquem pequenos, comprova que o principal esforço aplicado a estas estacas é o normal, podendo-se, desta forma, desenvolver estacas de grandes comprimentos, fundamental para este tipo de estrutura.

Desta forma conclui-se que foi alcançado o objetivo do trabalho e que este trabalho serve como base para diversos outros sugeridos no próximo item.

## **7.2 RECOMENDAÇÕES**

O assunto aqui abordado, apresenta uma deficiência de bibliografia técnica tanto nacional como internacional. Sabendo da importância e responsabilidade econômica que nossos cais têm no país, deveria se estudar amplamente no Brasil, de forma a atualizar as normas brasileiras e dar suporte bibliográfico para que os engenheiros brasileiros possam se instruir e desenvolver estrutural e tecnologicamente os canais e cais do país, o que seria de suma importância na economia brasileira.

Portanto, algumas recomendações para futuras pesquisas da área seriam:

- Estudar a confiabilidade de uma estrutura de cais de contêineres;
- Estudar a redistribuição de esforços frente a recalques diferenciais através de interação solo-estrutura;
- Estudar a possibilidade de manutenção da funcionalidade do cais frente à ruptura de elementos de fundação causadas por impacto de navios;

- Estudar o comportamento de cais de paramento aberto modelado apenas com estacas verticais e apenas com estacas inclinadas de forma a verificar a eficiência do equilíbrio gerado pela mistura dos tipos;

- Estudar o comportamento da superestrutura do cais frente as ações aplicadas a uma estrutura como esta;

- Estudar a estrutura completa através de modelos de pórtico e grelha;

- Simular numericamente a laje da superestrutura com a geometria real, usando elementos finitos em três dimensões,

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: “Ações e Segurança nas Estruturas” – NBR 8681; 2004.
- [2] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: “Ações em Estruturas Portuárias, Marítimas ou Fluviais – Procedimento” – Rio de Janeiro – NBR 9782; 1987.
- [3] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: “Forças devido ao vento em edificações” – NBR 6123; 1988.
- [4] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: “Cargas para Cálculo em Estruturas de Edificações” – NBR 6120; 1980.
- [5] ACHE TUDO NA REGIÃO. Nota: Dados retirados. In:  
[http://www.achetudoeregiao.com.br/RS/lagoa\\_dos\\_patos.htm](http://www.achetudoeregiao.com.br/RS/lagoa_dos_patos.htm). Acesso em dez/2012;
- [6] ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. Obras Portuárias, Blucher, São Paulo, SP, Brasil; 2014
- [7] ALONSO, U.. DIMENSIONAMENTO DE FUNDAÇÕES PROFUNDAS, Blucher, São Paulo, Brasil; 1989
- [8] ANSYS, “User’s Manual (version 12.1)”, Swanson Analysis System Inc., Houston , USA; 2009.
- [9] AZAMBUJA, J. L. F. Dissertação de Mestrado. Hidrovia da Lagoa Mirim: Um marco de desenvolvimento nos caminhos do Mercosul. UFRGS. Porto Alegre; 2005.
- [10] AZEVEDO, A., Método dos elementos finitos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal; 2003.
- [11] BSI - British Standard: “Marine Structures”; 2000
- [12] DAVISSON, M. T.; ROBINSON, K. E., Bending and buckling of partially embedded piles. Conference on soil mechanics and foundation engineers. Montreal, Canadian. 1965
- [13] FANTI, F. D., Dissertação de Mestrado: Concepção, Métodos Construtivos e Dimensionamento de Terminais para Contêineres, USP, São Paulo; 2007.
- [14] FENDER DESINGN. “Trelleborg Marine Systems”. Section 12, Trellerborg. In:  
[www.trellerborg.com/marine](http://www.trellerborg.com/marine). Acesso em jan/2015;
- [15] FENDER TEAM, “Manual para projeto de defesa”. Fender Team AG. Alemanha; 2013
- [16] FENDERING AND MOORING SYSTEMS - BS 6349-4; 1994.

- [17] FENTEK FENDERING MARINE, “Fentek Catalogue”. Hamburg, Germany; 2000
- [18] JCRS. Jornal do Comércio. Tecon Rio Grande aposta na qualidade para superar concorrência. In: <http://jcrs.uol.com.br/site/noticia.php?codn=87669>. Acesso em dez/2012;
- [19] LEAL. M., Dissertação de mestrado em engenharia civil. “Dimensionamento de Defensas Marítimas”. Universidade do Porto. Porto, Portugal; 2010.
- [20] LIEBHERR; “Technical Description”. Ship To Shore Gantry Cranes. Ireland; 2014
- [21] MARTHA, L. F., Ftool, Um programa gráfico-interativo para ensino de comportamento de estruturas. Versão educacional 3.00, versão Lisboa. Lisboa, Portugal; 2012.
- [22] MASON, J., Obras Portuárias, Campus, Rio de Janeiro, Brasil; 1982
- [23] Memória de cálculo da ampliação do Tecon;
- [24] MOAVENI, S. Finite Element Analysis (Theory and Application with ANSYS), Pretice Hall, New Jersey, USA; 1999
- [25] PE DESENVOLVIMENTO. Complexo Industrial Portuário de SUAPE. Nota: Dados retirados. In: <http://pedesenvolvimento.com/2012/04/30/novo-terminal-de-containers-de-suape-custara-r-650mi-veja-modelo-3d/>. Acesso em dez/2012;
- [26] PIANC – International Association Navigation – Guidelines for the Design of Dender; 2002
- [27] REDE GLOBO/G1. Ciência e Saúde. Geologia. Amazonas é o maior do mundo, diz IBGE, São Paulo. 2007 In: <http://g1.globo.com/Noticias/Ciencia/0,,MUL53141-5603,00.html>. Acesso em dez/2012;
- [28] REDE GLOBO/Globo Mar. Globo Mar visita a maior lagoa costeira da américa do sul: A lagoa dos Patos. Temporada 2011. Por Juliana Briggs. Rio Grande. 2011. In: <http://g1.globo.com/platb/globomar/2011/06/03/lagoa-dos-patos-recebe-agua-do-mar%20-%20>. Acesso em dez/2012;
- [29] SEP/PR. Sistema Portuário Nacional. Secretaria de Portos da Presidência da República. Brasil. In: <http://www.portosdobrasil.gov.br/sistema-portuario-nacional>. Acesso em dez/2012.
- [30] SIANO, B., Obras Marítimas: exemplos de cálculo. 1 ed. Rio de Janeiro. Portobras; 1983.
- [31] SUPORTE DO OFFICE, In: <https://suporte.office.com>.

- [32] TCP. Terminal de Contêineres do Paranaguá. In:  
<http://tcp.com.br.magicwebdesign.com.br/> . Acesso em dez/2012
- [33] TECON. Página Eletrônica do Terminal de Contêineres. Terminal de Contêineres de Rio Grande. In: [www.tecon.com.br](http://www.tecon.com.br). Acesso em jan/2015.
- [34] TECPLOT, "Data Format Guide is for use with Tecplot 360 (Version 2006)", USA; 2006
- [35] TEREX. "Mobile Harbour Crane". In: [www.terexcranes.com](http://www.terexcranes.com). Acesso em Jan/2015
- [36] THORESEN, C., Port Designer's Handbook, Third edition, ICE Publishing, London;
- [37] TQS Inf. Ltda, 2011. Manuais do TQS versão 15. São Paulo, Brasil. 2014
- [38] TRANSVIAS. Porto de Santos cresce no ranking mundial. In:  
<http://www.transvias.com.br/3307/noticias/Porto-de-Santos-cresce-no-ranking-mundial>. Acesso em dez/2012;
- [39] TSINKER. G., Planning, construction, maintenance, and security. John Wiley & Sons. New Jersey; 2004

## ANEXOS

## ANEXO A – COMBINAÇÕES DE CARGA

Tabela A.1 Combinações de carga.

[illegible]

[illegible]



[illegible]

[illegible]

[illegible]

## ANEXO B – REAÇÕES DAS ESTACAS PARA 12 COMBINAÇÕES

Tabela B.1 Reações referentes a combinação 53.

ESTACA / REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
1	2,96	-8,82	1627,65	76,58	28,78	2,14
2	1,91	-7,31	1781,71	63,70	19,07	1,83
3	1,32	-6,44	1875,02	58,37	12,64	1,37
4	0,51	-6,65	1961,59	59,21	4,58	1,17
5	-0,47	-8,33	1981,65	70,74	-4,74	0,59
6	-1,06	-9,22	1956,28	76,52	-11,25	1,15
7	-1,59	-9,28	1952,05	76,33	-17,28	1,38
8	-2,19	-8,88	1936,26	72,84	-23,85	1,58
9	-2,85	-7,72	1983,05	63,96	-30,89	2,08
10	-3,81	-5,86	1945,75	49,92	-39,99	1,46
11	-4,49	-6,05	1861,05	50,75	-47,11	0,84
12	-4,90	-7,72	1809,24	62,13	-52,28	0,22
13	-5,82	-10,29	1735,74	80,00	-61,09	0,16
14	-68,23	312,74	1380,18	134,85	16,43	8,56
15	-0,89	-477,42	2025,88	-93,25	0,45	-0,07
16	-40,66	197,17	913,26	125,95	35,35	-0,42
17	1,67	-409,53	1756,37	-97,35	16,20	5,72
18	-52,42	262,30	1175,40	128,61	46,83	-5,70
19	3,87	-512,21	2165,23	-94,77	29,35	10,79
20	1,40	-2,23	2690,47	23,80	10,25	1,24
21	-0,45	-2,16	2877,70	22,62	-5,59	1,37
22	-1,37	-1,94	2892,82	20,34	-14,82	1,39
23	-2,30	-1,76	2875,73	18,36	-24,05	1,37
24	-4,08	-1,49	2691,69	15,73	-39,39	1,44
25	-6,25	-476,85	2027,73	-105,85	-56,13	-14,69
26	60,18	308,37	1355,69	117,33	-67,55	13,54
27	-2,72	-417,23	1792,86	-114,26	-33,50	-6,22
28	71,03	343,39	1493,16	111,92	-44,59	4,18
29	-0,01	-617,04	2592,53	-114,47	-17,00	-0,07
30	129,49	609,04	2559,61	118,77	-29,43	-3,30
31	-1,57	340,94	1490,94	128,19	-1,95	4,49
32	-83,59	-399,09	1711,34	-94,26	29,58	1,51
33	1,26	233,65	1064,47	132,30	15,59	-2,27
34	-70,57	-347,95	1504,64	-90,96	42,35	7,69
35	3,14	295,80	1312,00	130,01	26,51	-6,48
36	-90,65	-452,43	1926,09	-98,15	54,11	12,65
37	1,56	-0,56	2599,61	8,45	12,32	1,64

ESTACA / REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
38	-0,27	0,03	2760,53	3,48	-3,38	1,46
39	-1,13	0,29	2763,59	0,92	-12,13	1,39
40	-1,95	0,42	2758,28	-0,70	-20,68	1,32
41	-3,70	0,22	2611,32	-0,03	-35,76	1,10
42	76,93	-396,66	1707,53	-110,09	-78,31	-15,49
43	-4,97	354,97	1543,44	116,29	-46,45	14,13
44	55,06	-282,67	1251,03	-109,39	-66,29	-9,81
45	-3,00	310,84	1364,27	110,91	-34,77	9,88
46	67,09	-328,05	1439,47	-122,24	-53,82	-2,98
47	-0,20	438,35	1866,82	97,28	-17,47	3,27
48	4,32	-1,97	1930,08	17,11	41,25	0,54
49	2,82	-3,12	2169,30	24,82	28,34	0,96
50	2,14	-2,75	2280,36	21,61	21,25	1,55
51	1,28	-1,43	2400,61	11,69	12,84	1,50
52	0,24	-0,50	2386,35	4,30	3,16	1,66
53	-0,30	-0,15	2358,15	1,17	-3,03	1,43
54	-0,86	0,01	2348,42	-0,64	-9,30	1,38
55	-1,42	0,15	2358,30	-2,20	-15,56	1,35
56	-1,95	0,10	2388,56	-2,46	-21,67	1,20
57	-3,00	-0,54	2410,05	1,45	-31,40	1,21
58	-3,92	-1,62	2280,83	8,67	-40,27	0,82
59	-4,58	-1,85	2160,56	9,70	-47,22	1,52
60	-6,03	-0,56	1921,02	-0,12	-59,78	2,00

Tabela B.2 Reações referentes a combinação 91.

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
1	-44,08	1,20	1216,04	-28,79	-482,46	-6,09
2	-45,98	2,08	1475,34	-32,17	-498,16	-6,23
3	-46,70	2,03	1554,76	-28,83	-505,58	-6,76
4	-47,45	0,67	1635,66	-16,12	-513,22	-7,00
5	-48,42	-2,19	1668,12	7,46	-522,42	-7,54
6	-49,04	-3,98	1635,80	23,32	-529,11	-6,98
7	-49,58	-4,94	1623,94	33,21	-535,22	-6,76
8	-50,14	-5,55	1601,46	40,63	-541,56	-6,60
9	-50,73	-5,78	1651,81	45,25	-548,02	-6,29
10	-51,68	-5,74	1636,56	47,89	-557,09	-6,68
11	-52,46	-7,15	1572,31	61,02	-564,92	-7,11
12	-52,66	-9,15	1519,84	78,26	-568,56	-7,45
13	-52,50	-11,91	1611,75	101,00	-569,66	-7,61
14	-233,64	904,13	3707,69	34,63	-461,28	111,84
15	-44,28	11,12	106,79	-185,65	-473,07	-125,53
16	-202,06	753,37	3105,67	39,25	-463,31	111,88

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
17	-43,30	85,11	-192,71	-176,38	-468,32	-123,43
18	-199,15	755,28	3119,22	52,77	-440,49	103,26
19	-39,29	-71,67	428,63	-163,56	-442,73	-113,56
20	-47,74	3,61	2194,46	-38,39	-521,66	-7,08
21	-49,97	2,28	2401,82	-25,39	-540,10	-6,86
22	-50,94	1,35	2390,19	-15,19	-549,66	-6,78
23	-51,54	0,35	2374,97	-4,57	-556,60	-6,80
24	-52,27	-0,92	2375,41	7,97	-564,43	-6,84
25	-48,81	-537,56	2265,83	-97,07	-523,87	-137,81
26	-54,33	-26,16	24,10	131,52	-553,69	125,19
27	-48,04	-543,18	2287,10	-92,04	-520,55	-136,18
28	-60,25	-60,43	-111,23	137,33	-547,82	121,67
29	-44,75	-690,51	2872,79	-83,15	-499,86	-128,44
30	-20,66	105,48	558,96	151,98	-519,47	108,97
31	-46,03	356,91	1521,71	37,02	-492,63	116,56
32	-81,78	-173,37	836,11	-171,57	-453,98	-129,61
33	-45,39	302,25	1310,32	52,82	-490,24	115,51
34	-89,40	-214,72	995,46	-157,93	-451,15	-126,41
35	-43,43	353,40	1517,67	60,70	-478,65	111,34
36	-124,31	-392,98	1709,49	-157,41	-435,93	-119,61
37	-48,71	4,83	2018,06	-50,70	-533,39	-6,68
38	-51,21	4,27	2281,28	-43,15	-553,77	-6,85
39	-52,22	3,33	2277,61	-32,85	-563,57	-6,82
40	-52,64	2,32	2288,57	-22,16	-569,20	-6,78
41	-53,01	1,29	2399,58	-11,32	-574,40	-6,80
42	-33,44	-81,16	448,05	-116,09	-563,48	-142,66
43	-51,31	464,40	1980,72	117,23	-549,69	131,46
44	-37,93	-57,18	349,07	-107,65	-560,85	-141,13
45	-50,36	408,37	1758,21	122,87	-545,12	129,43
46	-18,03	-142,49	691,63	-107,23	-549,72	-135,68
47	-47,58	495,79	2106,06	122,69	-528,02	122,89
48	-47,35	3,51	1402,72	-56,13	-520,47	-7,29
49	-49,74	2,29	1780,80	-44,35	-539,66	-6,73
50	-50,64	2,36	1891,24	-41,97	-548,37	-5,86
51	-51,45	3,31	2014,95	-45,76	-556,42	-7,49
52	-52,45	3,75	2024,05	-45,62	-565,73	-6,73
53	-53,04	3,60	1984,90	-41,41	-572,14	-6,73
54	-53,59	3,06	1956,86	-34,44	-578,23	-6,71
55	-54,06	2,49	1953,51	-27,35	-583,76	-6,64
56	-54,45	2,08	1992,11	-21,39	-588,78	-6,58
57	-55,52	1,56	2039,51	-14,67	-598,67	-6,82
58	-56,48	0,43	1933,03	-3,51	-607,77	-6,92
59	-56,82	-0,28	1838,92	4,52	-612,38	-6,53
60	-57,15	-0,05	1802,43	5,81	-617,02	-6,24

Tabela B.3 Reações referentes a combinação 37.

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
1	-34,06	-1,94	1526,45	-1,13	-373,72	-4,42
2	-35,82	-0,40	1768,24	-9,81	-388,48	-4,60
3	-36,49	0,00	1853,22	-10,38	-395,48	-5,22
4	-37,23	-1,06	1951,24	-0,44	-403,08	-5,57
5	-38,24	-3,98	1984,13	22,96	-412,54	-6,23
6	-38,87	-5,77	1954,08	38,18	-419,30	-5,60
7	-39,40	-6,61	1943,03	46,57	-425,35	-5,35
8	-39,96	-7,01	1923,06	51,85	-431,69	-5,16
9	-40,57	-6,83	1974,29	52,89	-438,29	-4,73
10	-41,56	-6,13	1956,42	50,20	-447,61	-5,26
11	-42,34	-7,14	1871,48	59,84	-455,50	-5,68
12	-42,64	-8,88	1799,16	74,65	-459,81	-6,09
13	-42,80	-11,58	1817,34	96,34	-463,18	-6,32
14	-226,64	907,64	3727,97	50,93	-368,10	92,36
15	-35,90	-161,45	792,84	-173,71	-378,54	-101,24
16	-184,80	714,11	2953,22	51,97	-361,88	88,97
17	-34,01	-51,80	351,58	-166,56	-367,41	-96,95
18	-182,44	720,62	2984,73	64,23	-336,34	79,17
19	-29,68	-206,06	963,07	-154,69	-339,60	-86,37
20	-37,19	2,74	2664,53	-29,30	-408,11	-5,62
21	-39,49	1,66	2895,73	-18,81	-427,14	-5,43
22	-40,48	0,93	2892,57	-10,82	-436,84	-5,37
23	-41,18	0,13	2875,88	-2,34	-444,44	-5,40
24	-42,29	-0,85	2813,68	7,45	-454,98	-5,41
25	-40,40	-576,69	2424,61	-101,95	-429,05	-113,53
26	-19,07	99,84	525,97	126,75	-454,55	102,70
27	-38,93	-541,01	2281,84	-99,43	-420,95	-110,23
28	-27,69	50,55	329,40	129,75	-445,13	97,95
29	-35,45	-675,12	2815,00	-91,69	-398,83	-102,06
30	12,51	218,85	1008,94	143,50	-416,02	84,94
31	-37,23	428,62	1812,47	49,12	-393,47	93,96
32	-88,21	-247,76	1130,90	-162,55	-353,93	-103,49
33	-35,69	346,09	1490,11	65,16	-384,78	90,67
34	-89,90	-264,10	1189,79	-148,72	-346,55	-98,46
35	-33,37	406,73	1735,09	71,88	-370,68	85,66
36	-124,97	-444,38	1912,50	-149,89	-329,32	-90,94
37	-37,98	4,20	2490,77	-43,26	-417,62	-5,19
38	-40,50	3,89	2756,25	-38,23	-438,14	-5,40
39	-41,50	3,15	2755,25	-30,21	-447,86	-5,40
40	-42,03	2,34	2762,45	-21,62	-454,26	-5,39

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
41	-42,84	1,40	2796,31	-12,15	-462,68	-5,49
42	-0,34	-196,83	911,10	-117,19	-464,96	-117,48
43	-41,94	496,45	2109,13	116,82	-446,60	107,32
44	-11,49	-138,19	672,88	-108,21	-457,89	-114,31
45	-40,46	430,36	1846,39	121,80	-438,42	104,08
46	7,73	-218,42	995,68	-109,25	-444,34	-107,81
47	-37,31	533,07	2254,70	119,85	-418,69	96,64
48	-36,31	2,48	1758,49	-43,49	-401,40	-5,99
49	-38,67	1,12	2147,44	-31,32	-420,39	-5,38
50	-39,56	1,32	2272,82	-30,46	-428,99	-4,43
51	-40,40	2,52	2417,96	-36,74	-437,33	-5,88
52	-41,45	3,15	2415,65	-38,62	-446,96	-5,27
53	-42,03	3,10	2378,78	-35,78	-453,34	-5,32
54	-42,59	2,68	2354,14	-30,31	-459,48	-5,31
55	-43,07	2,22	2353,64	-24,68	-465,18	-5,27
56	-43,49	1,84	2390,01	-19,52	-470,45	-5,27
57	-44,59	1,16	2437,68	-12,29	-480,52	-5,46
58	-45,56	-0,17	2307,91	-0,34	-489,66	-5,67
59	-45,99	-0,85	2197,69	6,89	-494,99	-5,12
60	-46,72	-0,27	2081,98	5,08	-502,42	-4,73

Tabela B.4 Reações referentes a combinação 84.

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
1	-46,04	5,46	1078,96	-60,71	-505,69	-7,15
2	-48,18	4,44	1453,60	-51,66	-523,16	-7,47
3	-49,16	3,07	1577,40	-37,23	-532,40	-7,69
4	-50,03	0,97	1657,17	-19,00	-540,86	-7,53
5	-51,00	-2,06	1675,57	5,97	-550,01	-8,06
6	-51,58	-3,91	1636,42	22,53	-556,47	-7,49
7	-52,10	-4,92	1623,75	32,98	-562,49	-7,27
8	-52,68	-5,58	1600,23	40,98	-568,93	-7,11
9	-53,30	-5,87	1643,68	46,32	-575,58	-6,81
10	-54,24	-6,01	1616,89	50,42	-584,59	-7,22
11	-54,89	-8,18	1558,51	69,22	-591,54	-8,05
12	-54,91	-11,61	1552,30	96,93	-593,90	-8,59
13	-54,63	-15,73	1728,01	129,56	-594,15	-8,51
14	-179,55	652,33	2697,89	28,12	-462,90	108,33
15	-43,58	250,00	-849,28	-185,52	-477,33	-124,69
16	-188,81	690,77	2854,08	35,84	-472,30	111,42
17	-43,91	151,85	-459,26	-178,08	-481,66	-125,83



ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
18	-205,56	777,40	3206,89	50,39	-462,37	107,64
19	-41,27	-61,25	387,82	-165,87	-465,59	-119,43
20	-50,40	3,78	2216,05	-40,21	-550,20	-7,60
21	-52,62	2,37	2408,54	-26,38	-568,67	-7,38
22	-53,58	1,37	2389,98	-15,42	-578,09	-7,29
23	-54,20	0,30	2367,58	-4,04	-585,17	-7,32
24	-54,91	-1,05	2354,53	9,33	-592,86	-7,36
25	-50,73	-548,99	2310,86	-95,21	-546,30	-143,52
26	-59,39	-42,26	-39,64	133,53	-574,98	129,36
27	-48,59	-616,99	2582,13	-92,39	-533,30	-138,44
28	-44,63	13,67	186,29	140,47	-557,11	121,33
29	-44,87	-923,50	3805,42	-83,64	-509,75	-129,66
30	27,23	333,82	1474,66	157,86	-529,84	108,74
31	-47,65	321,53	1387,13	48,03	-513,52	121,14
32	-78,30	-149,23	733,75	-162,38	-476,72	-133,99
33	-47,59	299,42	1301,31	55,82	-515,12	121,41
34	-91,73	-215,31	996,49	-156,52	-476,51	-132,58
35	-45,87	358,56	1537,97	59,21	-505,20	117,56
36	-128,66	-402,29	1747,37	-159,22	-461,78	-126,48
37	-51,41	5,03	2020,49	-52,75	-562,64	-7,20
38	-53,93	4,38	2283,29	-44,27	-583,19	-7,37
39	-54,94	3,35	2277,44	-33,07	-592,99	-7,34
40	-55,37	2,25	2286,16	-21,49	-598,62	-7,30
41	-55,70	1,13	2397,59	-9,75	-603,59	-7,32
42	-37,93	-71,02	407,12	-114,87	-589,27	-149,45
43	-53,73	462,27	1972,23	118,06	-576,11	137,66
44	-40,24	-56,63	348,55	-109,86	-586,25	-147,27
45	-52,59	414,63	1780,65	119,21	-570,23	135,39
46	-15,40	-163,23	780,19	-116,19	-573,34	-140,55
47	-49,43	527,51	2226,62	112,63	-550,45	127,87
48	-50,08	3,98	1410,80	-60,92	-550,27	-7,75
49	-52,57	2,73	1799,33	-48,74	-570,19	-7,25
50	-53,50	2,67	1900,73	-45,22	-579,15	-6,41
51	-54,29	3,51	2015,96	-47,97	-587,04	-8,02
52	-55,27	3,89	2023,64	-47,14	-596,18	-7,25
53	-55,86	3,68	1984,79	-42,29	-602,59	-7,24
54	-56,41	3,08	1956,89	-34,66	-608,69	-7,23
55	-56,88	2,45	1953,64	-26,92	-614,20	-7,16
56	-57,27	1,98	1992,44	-20,31	-619,23	-7,10
57	-58,36	1,41	2038,53	-12,94	-629,27	-7,34
58	-59,34	0,16	1924,26	-0,77	-638,52	-7,46
59	-59,64	-0,67	1822,02	8,38	-642,90	-7,05
60	-59,89	-0,48	1794,82	10,20	-646,88	-6,72

Tabela B.5 Reações referentes a combinação 177.

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
1	-32,25	10,71	839,27	-82,48	-371,10	-1,20
2	-33,62	10,89	2473,09	-83,07	-383,10	-1,87
3	-37,58	8,46	3727,55	-65,04	-413,53	-2,82
4	-42,46	5,17	3772,61	-40,91	-450,50	-1,83
5	-46,14	-4,74	2362,82	30,64	-478,82	-5,87
6	-44,37	-14,05	895,37	97,83	-468,61	-4,15
7	-42,07	-16,98	569,00	119,51	-454,46	-1,84
8	-39,85	-16,21	916,47	114,70	-440,90	-0,01
9	-37,17	-7,65	2302,26	54,53	-424,16	2,19
10	-41,25	1,66	3708,56	-11,15	-455,34	-1,47
11	-44,70	2,54	3962,97	-16,41	-482,09	-2,04
12	-47,47	1,23	3724,48	-6,19	-504,02	-3,07
13	-50,33	-1,99	2676,71	17,83	-526,54	-3,35
14	-105,57	342,73	1487,41	92,21	-349,40	90,51
15	-34,18	144,06	-451,70	-125,25	-374,92	-92,84
16	-122,42	421,05	1793,74	80,50	-357,10	91,43
17	-34,18	58,25	-101,19	-137,78	-377,08	-92,96
18	-148,02	549,07	2301,09	73,12	-352,38	87,89
19	-32,23	-120,85	620,64	-147,30	-365,86	-88,16
20	-39,93	3,55	1843,47	-32,43	-435,16	-1,99
21	-41,43	3,08	1963,48	-28,27	-448,50	-0,98
22	-42,55	3,84	1978,96	-32,81	-459,16	-1,68
23	-43,35	2,60	1941,16	-23,09	-467,51	-2,59
24	-43,49	1,90	2007,66	-17,06	-471,10	-1,87
25	-41,85	-388,62	1682,12	-125,35	-446,80	-115,49
26	-29,96	55,65	339,40	102,57	-468,65	109,91
27	-41,07	-360,08	1563,95	-117,25	-443,61	-113,28
28	-34,46	28,71	234,53	108,56	-463,86	107,15
29	-38,75	-449,22	1917,77	-111,48	-429,71	-107,68
30	-4,08	157,02	751,94	117,18	-443,62	98,44
31	-37,27	197,62	904,55	85,78	-397,17	99,40
32	-84,21	-227,37	1035,22	-129,63	-366,92	-100,05
33	-36,60	167,33	784,25	87,93	-394,73	97,60
34	-86,22	-240,36	1086,26	-127,38	-364,46	-98,17
35	-35,02	229,84	1035,31	90,46	-385,93	93,63
36	-111,89	-373,38	1618,30	-127,05	-351,17	-92,84
37	-40,00	1,88	1631,39	-24,08	-436,90	-1,12
38	-41,64	1,37	1823,56	-19,59	-451,30	-2,64
39	-42,90	-0,34	1856,80	-6,55	-462,95	-1,70
40	-43,61	0,85	1827,32	-14,16	-470,69	-0,76
41	-43,37	1,17	1971,09	-15,48	-471,74	-2,28
42	-43,03	2,69	113,68	-124,18	-476,96	-115,95

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
43	-42,45	467,36	1988,44	102,18	-454,33	112,04
44	-52,43	51,59	-79,74	-126,98	-473,93	-114,16
45	-41,70	429,53	1834,93	99,26	-451,35	110,14
46	-42,65	11,30	84,46	-131,45	-468,08	-110,57
47	-39,94	496,03	2097,90	94,87	-441,36	105,80
48	-32,58	-2,29	2431,27	-0,33	-376,89	-2,28
49	-37,05	-4,45	3773,18	15,72	-410,85	-1,95
50	-39,63	-5,01	4043,11	20,31	-431,51	-1,24
51	-40,98	-4,74	4149,16	18,99	-443,45	-1,49
52	-41,80	-3,61	4123,67	11,66	-451,70	-1,42
53	-41,96	-3,75	4080,35	13,46	-455,21	-2,02
54	-43,29	-4,06	4078,69	16,46	-467,10	-1,62
55	-44,54	-3,82	4053,92	15,48	-478,42	-1,12
56	-44,44	-3,32	4104,02	12,58	-480,20	-1,49
57	-45,39	-3,66	4202,73	15,88	-489,38	-2,73
58	-46,96	-3,31	4093,44	14,66	-502,86	-2,33
59	-49,14	-2,59	3815,44	10,56	-520,63	-1,76
60	-52,11	-0,61	2694,68	-2,55	-543,90	-1,57

Tabela B.6 Reações referentes a combinação 79.

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
1	-44,09	15,56	460,04	-134,61	-496,61	-7,29
2	-45,51	14,32	1863,38	-122,57	-508,30	-7,89
3	-48,82	10,99	2898,22	-95,59	-533,47	-8,59
4	-52,76	7,14	2939,33	-64,83	-563,06	-7,55
5	-55,66	-1,97	1788,88	3,53	-585,29	-10,89
6	-54,16	-10,47	605,94	67,49	-576,40	-9,39
7	-52,57	-13,88	330,02	95,08	-566,72	-7,51
8	-52,15	-15,32	403,78	108,57	-565,37	-6,70
9	-51,71	-12,00	724,22	87,99	-563,93	-4,37
10	-53,21	-7,28	972,82	57,40	-576,16	-6,83
11	-54,15	-8,23	995,93	67,44	-584,52	-7,53
12	-54,30	-10,13	982,77	84,18	-587,17	-7,77
13	-53,71	-12,66	1125,43	105,43	-584,59	-8,01
14	-137,56	454,03	1872,36	7,06	-468,78	107,92
15	-43,39	438,19	-1656,17	-127,04	-480,37	-123,92
16	-163,50	567,94	2326,06	6,99	-485,02	113,29
17	-44,42	286,21	-1044,98	-130,16	-489,05	-126,41
18	-184,72	673,15	2745,67	8,14	-481,15	110,94
19	-42,55	77,88	-209,34	-131,74	-477,77	-121,68
20	-51,57	5,04	1395,29	-50,09	-560,87	-7,76
21	-52,81	3,77	1514,43	-37,30	-571,58	-6,68

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
22	-53,61	3,64	1555,05	-32,61	-579,13	-7,24
23	-53,93	1,14	1589,25	-11,04	-583,31	-8,26
24	-53,72	-1,75	1817,92	13,30	-583,71	-7,56
25	-50,44	-473,17	1957,61	-44,61	-542,60	-143,61
26	-69,98	-95,73	-288,46	107,71	-563,96	127,57
27	-49,87	-496,67	2046,03	-31,61	-540,35	-141,81
28	-74,41	-122,89	-392,62	118,72	-558,31	124,55
29	-46,60	-643,06	2628,22	-23,00	-519,20	-133,62
30	-35,34	39,45	261,25	129,90	-526,84	112,07
31	-48,28	205,33	878,99	8,33	-522,05	123,71
32	-59,11	-54,06	310,94	-124,58	-494,19	-136,01
33	-48,68	200,73	862,21	14,31	-526,39	124,62
34	-73,65	-123,45	586,96	-118,85	-496,13	-135,94
35	-47,32	240,62	1024,19	21,77	-518,52	121,13
36	-104,52	-281,35	1217,07	-113,50	-482,61	-130,60
37	-52,54	3,89	1180,75	-44,46	-572,97	-7,11
38	-54,06	2,55	1401,34	-31,07	-585,60	-8,29
39	-55,18	0,59	1433,48	-13,33	-595,44	-6,97
40	-55,19	1,86	1431,73	-18,71	-597,34	-5,96
41	-54,31	2,51	1779,55	-19,65	-592,99	-7,05
42	-50,77	-4,71	106,16	-88,81	-575,09	-145,91
43	-52,76	408,29	1704,83	63,74	-567,76	135,14
44	-50,27	-4,82	106,92	-86,24	-573,36	-145,12
45	-52,05	363,87	1527,43	67,21	-564,44	133,24
46	-29,35	-94,89	467,35	-83,58	-560,97	-140,02
47	-49,02	450,18	1873,65	72,17	-545,20	125,24
48	-48,00	1,67	1783,40	-43,30	-540,15	-7,80
49	-51,96	-0,43	2915,88	-25,11	-569,85	-7,42
50	-54,05	-1,34	3120,75	-15,55	-586,35	-6,71
51	-54,96	-1,67	3229,71	-10,05	-594,51	-8,06
52	-55,64	-1,19	3241,05	-9,83	-600,89	-7,29
53	-56,11	-1,48	3206,21	-4,37	-605,78	-7,37
54	-58,70	-1,26	2925,75	-2,63	-625,73	-6,56
55	-61,17	0,55	2063,64	-12,34	-644,76	-5,96
56	-59,02	2,83	1241,29	-25,41	-631,19	-6,14
57	-58,28	4,09	1137,46	-31,15	-627,52	-7,18
58	-58,65	4,09	1075,48	-27,96	-631,71	-6,85
59	-58,73	4,03	1036,78	-24,34	-633,85	-6,88
60	-58,40	4,34	1083,15	-23,44	-633,14	-6,62

Tabela B.7 Reações referentes a combinação 16.

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
1	4,67	-3,52	817,86	38,87	48,48	1,57
2	4,66	-4,21	1051,53	43,06	46,15	0,89
3	3,83	-6,59	1428,54	59,35	37,97	0,53
4	2,26	-8,63	1558,59	73,20	24,49	1,40
5	0,83	-11,97	1366,93	96,52	12,05	-0,24
6	0,54	-14,93	1108,86	117,04	7,67	0,52
7	0,74	-15,25	1058,53	118,68	6,84	1,78
8	1,92	-13,03	1307,68	102,05	12,91	3,44
9	3,47	-6,46	2323,09	54,48	21,58	4,11
10	0,39	-0,38	3369,38	10,33	-2,63	1,88
11	-2,34	1,25	3517,20	-2,00	-24,35	1,86
12	-4,79	0,84	3302,91	0,25	-43,96	0,78
13	-7,86	-1,54	2333,23	16,67	-67,98	0,36
14	-32,54	151,53	761,60	181,71	46,51	3,57
15	2,11	-372,00	1576,36	-43,27	28,45	8,32
16	-20,73	111,16	592,33	167,13	64,55	-4,77
17	4,66	-374,08	1592,77	-58,37	43,88	14,85
18	-45,59	236,48	1086,88	154,86	69,65	-8,88
19	6,39	-516,17	2168,22	-71,97	53,62	19,09
20	3,40	-5,06	2702,64	43,88	32,14	1,22
21	2,10	-4,38	2885,25	38,23	20,19	2,83
22	0,47	-2,36	2941,86	22,98	5,93	1,61
23	-1,46	-3,23	2735,06	28,43	-10,49	0,70
24	-2,70	-1,93	2296,88	18,30	-21,93	2,36
25	-4,68	-369,43	1598,17	-106,51	-37,62	-11,23
26	44,56	226,69	1028,82	116,11	-49,68	9,34
27	-2,51	-260,09	1159,26	-104,11	-24,92	-5,59
28	36,26	178,38	835,85	115,82	-39,21	4,71
29	-0,46	-303,10	1329,53	-101,63	-12,74	-0,75
30	61,69	286,14	1269,67	120,32	-22,83	-2,26
31	-0,50	364,47	1575,34	111,03	13,44	3,37
32	-80,48	-389,59	1686,09	-117,05	49,30	5,25
33	2,87	246,03	1099,67	106,79	34,40	-5,82
34	-66,02	-332,55	1458,07	-117,90	64,48	11,36
35	4,90	310,91	1359,64	107,05	46,21	-11,10
36	-87,21	-445,51	1909,54	-118,14	79,64	17,12
37	3,52	2,22	2639,39	-11,63	34,01	1,96
38	2,26	2,24	2783,91	-12,57	22,35	0,37
39	0,74	0,81	2818,50	-3,19	8,89	1,54
40	-1,04	2,02	2624,62	-12,67	-6,39	2,31
41	-2,25	0,85	2228,37	-5,07	-17,65	0,62
42	61,53	-314,83	1378,70	-107,81	-58,27	-9,76

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
43	-2,82	272,62	1213,29	114,08	-24,03	8,50
44	40,01	-201,79	928,14	-110,97	-45,80	-4,51
45	-1,12	228,90	1035,99	109,07	-14,40	4,31
46	48,05	-230,72	1047,43	-117,98	-35,66	0,61
47	1,29	332,19	1446,00	103,07	0,04	-1,99
48	5,60	4,20	1395,14	-26,89	58,27	0,65
49	4,71	3,06	1534,01	-19,28	49,68	1,09
50	4,15	2,90	1604,07	-18,76	43,47	1,32
51	3,38	3,47	1700,48	-23,38	35,65	1,59
52	2,37	4,65	1687,56	-32,71	26,17	2,19
53	1,86	5,48	1619,12	-39,35	20,26	1,84
54	1,55	5,37	1608,58	-39,32	15,79	1,32
55	2,20	4,04	1822,47	-30,57	18,10	0,59
56	3,17	0,59	2682,65	-6,66	22,63	-0,19
57	0,88	-3,29	3545,15	20,35	4,12	1,55
58	-1,63	-4,04	3621,79	25,11	-16,08	1,14
59	-4,04	-3,40	3395,56	19,93	-35,46	2,09
60	-7,26	-0,77	2379,39	0,50	-60,58	2,52

Tabela B.8 Reações referentes a combinação 92.

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
1	-44,52	5,42	1068,22	-60,81	-489,14	-7,06
2	-46,54	4,32	1439,19	-49,86	-505,70	-7,52
3	-47,24	1,86	1616,05	-29,13	-512,96	-8,05
4	-48,30	-1,57	1790,29	-1,45	-522,75	-7,46
5	-49,76	-4,02	1762,06	19,39	-535,44	-7,56
6	-50,22	-4,70	1644,46	27,48	-540,97	-7,00
7	-50,54	-5,01	1606,87	32,92	-545,60	-7,01
8	-51,06	-5,44	1590,81	39,22	-551,58	-6,98
9	-51,66	-5,67	1649,04	44,06	-558,15	-6,69
10	-52,63	-5,69	1636,70	47,28	-567,35	-7,09
11	-53,42	-7,17	1572,62	61,08	-575,22	-7,52
12	-53,60	-9,30	1520,61	78,94	-578,80	-7,86
13	-53,42	-12,06	1616,56	102,30	-579,74	-8,02
14	-176,18	643,75	2663,05	26,84	-446,55	104,23
15	-42,01	254,09	-865,12	-186,89	-460,83	-120,36
16	-187,69	695,31	2871,72	34,51	-452,50	106,07
17	-41,47	131,07	-375,29	-180,12	-459,18	-119,29
18	-220,31	865,42	3558,92	50,13	-431,01	98,10
19	-37,03	-203,33	957,81	-169,71	-430,65	-108,32
20	-50,88	4,00	3145,83	-42,44	-547,71	-7,47
21	-52,68	2,62	2653,22	-28,81	-563,20	-7,28

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
22	-52,28	1,61	2391,51	-17,86	-563,01	-7,20
23	-52,54	0,53	2357,58	-6,44	-567,46	-7,22
24	-53,25	-0,83	2374,12	6,88	-575,16	-7,26
25	-49,69	-538,52	2269,76	-97,42	-533,48	-140,57
26	-56,03	-29,77	9,62	131,36	-563,98	127,35
27	-48,93	-547,19	2303,08	-91,91	-530,29	-138,98
28	-62,18	-65,11	-129,81	137,66	-558,13	123,82
29	-45,61	-697,89	2902,08	-82,57	-509,35	-131,16
30	-22,43	101,21	542,21	152,82	-529,44	110,96
31	-46,11	328,36	1414,10	46,99	-497,11	117,12
32	-73,62	-134,01	673,39	-163,79	-460,60	-129,85
33	-45,94	310,98	1346,40	53,32	-497,92	117,25
34	-88,21	-206,16	961,79	-160,48	-459,14	-127,96
35	-43,87	390,77	1662,80	51,64	-485,58	112,75
36	-130,33	-418,41	1817,60	-170,19	-442,22	-121,43
37	-50,21	6,76	2202,06	-65,70	-548,12	-7,28
38	-52,69	5,14	2331,78	-50,36	-568,37	-7,57
39	-53,39	3,60	2268,32	-35,59	-576,01	-7,30
40	-53,71	2,45	2279,13	-23,70	-580,90	-7,18
41	-54,06	1,39	2402,75	-12,40	-585,99	-7,20
42	-35,90	-73,96	419,50	-116,78	-573,94	-145,61
43	-52,35	469,92	2002,64	116,85	-560,85	133,86
44	-39,88	-52,51	330,50	-107,96	-571,41	-144,13
45	-51,39	412,34	1774,09	122,90	-556,32	131,84
46	-19,45	-140,27	682,79	-107,15	-560,18	-138,66
47	-48,60	498,81	2118,23	123,10	-539,06	125,24
48	-48,50	4,09	1416,64	-62,14	-533,00	-7,63
49	-50,98	2,87	1794,26	-50,22	-552,85	-7,12
50	-51,92	2,88	1883,61	-47,19	-561,88	-6,23
51	-52,65	3,82	1987,08	-50,77	-569,38	-7,90
52	-53,59	4,10	2004,14	-49,28	-578,22	-7,22
53	-54,19	3,82	1974,59	-43,92	-584,70	-7,16
54	-54,76	3,21	1953,04	-36,34	-590,87	-7,11
55	-55,23	2,54	1953,73	-28,90	-596,47	-7,03
56	-55,62	2,19	1992,86	-22,65	-601,53	-6,97
57	-56,70	1,66	2040,95	-15,65	-611,45	-7,22
58	-57,67	0,50	1933,82	-4,07	-620,57	-7,32
59	-57,99	-0,26	1839,66	4,42	-625,12	-6,93
60	-58,31	-0,07	1806,52	6,21	-629,60	-6,64

Tabela B.9 Reações referentes a combinação 117.

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
1	8,20	1,13	939,42	7,38	72,85	2,11
2	7,93	1,53	2210,12	3,75	68,64	1,39
3	4,70	-0,45	3344,72	17,15	43,43	0,66
4	0,28	-2,60	3414,55	31,68	9,72	1,55
5	-3,04	-9,73	2186,26	81,91	-16,16	-1,59
6	-1,54	-16,50	939,35	129,45	-7,90	-0,12
7	0,02	-18,43	658,03	142,42	0,92	1,71
8	0,13	-18,31	720,14	140,61	-0,61	2,62
9	0,20	-12,88	997,84	100,98	-2,45	5,10
10	-1,40	-5,74	1153,03	49,08	-16,08	2,31
11	-2,46	-4,30	1157,78	38,01	-25,90	1,96
12	-3,02	-4,25	1109,51	36,84	-32,11	1,47
13	-3,64	-5,22	1069,32	43,06	-38,81	1,17
14	-15,14	75,15	450,91	173,96	53,77	0,96
15	2,55	-345,83	1477,69	-52,32	30,86	9,90
16	-11,18	67,18	409,02	155,35	63,61	-5,20
17	4,31	-358,10	1536,43	-70,35	40,85	14,27
18	-34,14	181,75	858,90	139,98	65,62	-8,39
19	5,46	-477,17	2021,26	-86,66	46,60	17,02
20	1,88	-2,19	2171,27	24,71	20,78	1,50
21	1,05	-1,45	2024,27	18,52	12,24	2,62
22	0,50	-0,09	1991,19	7,84	5,64	1,88
23	-0,67	-1,08	1932,28	13,87	-5,31	1,00
24	-1,81	-1,83	1776,09	18,27	-16,09	1,70
25	-3,88	-316,52	1381,08	-96,14	-32,79	-8,61
26	34,05	173,65	821,39	124,98	-47,62	8,04
27	-2,50	-233,78	1049,82	-96,20	-25,47	-5,15
28	28,47	141,21	691,17	123,22	-41,10	4,90
29	-0,69	-274,01	1209,98	-95,67	-15,00	-0,83
30	52,98	245,86	1111,38	125,51	-26,15	-1,40
31	0,70	272,65	1216,43	127,43	21,35	0,12
32	-73,02	-358,94	1553,71	-97,94	52,39	7,90
33	2,97	189,48	883,55	126,24	34,75	-5,95
34	-62,25	-315,81	1380,40	-97,22	61,94	12,16
35	4,44	243,93	1102,84	128,25	42,66	-9,90
36	-79,04	-404,88	1734,88	-94,99	72,30	16,31
37	2,12	-1,37	2075,97	15,36	23,77	2,08
38	1,37	-1,88	1929,72	18,06	15,75	0,79
39	0,62	-2,70	1862,36	22,93	7,74	2,15
40	-0,34	-0,35	1746,59	5,19	-1,71	2,92
41	-1,16	0,84	1619,94	-4,32	-10,22	1,78
42	49,33	-250,33	1125,18	-115,13	-51,04	-6,45



ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
43	-2,27	217,03	985,94	105,58	-20,45	7,48
44	33,92	-171,25	809,25	-116,38	-45,21	-3,58
45	-1,22	193,53	890,68	102,52	-15,26	5,00
46	41,46	-199,38	924,46	-121,92	-36,99	0,67
47	0,96	293,86	1289,85	98,13	-2,46	-0,68
48	9,84	-2,20	2380,42	20,53	88,19	0,86
49	6,69	-4,03	3406,37	32,87	63,65	1,17
50	4,63	-4,64	3643,13	36,50	46,73	1,39
51	3,29	-4,84	3746,05	37,22	34,90	1,85
52	2,20	-4,39	3663,17	33,04	24,82	1,81
53	1,78	-4,76	3562,40	34,95	19,53	1,50
54	-0,85	-4,20	3284,11	30,14	-1,47	2,31
55	-3,68	-2,06	2424,46	14,02	-23,83	2,75
56	-1,96	0,01	1540,11	-1,65	-13,99	2,35
57	-1,28	0,76	1332,25	-7,83	-11,46	1,80
58	-1,70	0,73	1261,79	-8,42	-16,69	1,73
59	-2,14	1,24	1216,59	-12,86	-22,06	2,13
60	-3,00	2,76	1123,60	-24,52	-30,43	2,46

Tabela B.10 Reações referentes a combinação 82.

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
1	-41,95	14,39	737,65	-124,68	-473,67	-7,09
2	-43,56	13,38	2157,92	-114,28	-487,40	-7,72
3	-47,01	10,14	3211,68	-87,99	-514,19	-8,48
4	-51,18	6,26	3263,95	-57,07	-546,11	-7,48
5	-54,37	-3,03	2110,40	12,61	-571,04	-10,89
6	-53,04	-11,59	897,62	76,91	-563,93	-9,31
7	-51,25	-14,69	626,35	102,30	-553,54	-7,22
8	-49,55	-14,66	906,71	105,20	-543,74	-5,55
9	-47,48	-8,15	2048,60	61,93	-531,39	-3,55
10	-50,99	-1,12	3197,38	14,86	-558,59	-6,56
11	-53,93	-1,27	3401,24	19,10	-581,75	-7,06
12	-56,10	-3,38	3216,34	37,23	-599,45	-8,02
13	-58,09	-7,26	2459,93	68,05	-615,82	-8,32
14	-146,65	503,28	2112,84	47,67	-444,44	104,68
15	-41,94	368,57	-1334,89	-165,31	-463,27	-119,75
16	-168,92	601,57	2503,47	46,50	-458,87	109,02
17	-42,69	225,39	-758,65	-168,90	-470,62	-121,64
18	-191,97	716,35	2961,61	48,05	-454,36	106,19
19	-40,63	2,61	134,57	-170,12	-458,60	-116,49
20	-50,04	4,88	1824,04	-48,51	-544,59	-7,68
21	-51,64	3,61	1945,14	-35,71	-558,66	-6,63

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
22	-52,76	3,53	1951,24	-31,40	-569,25	-7,12
23	-53,54	1,61	1906,39	-14,09	-577,48	-7,79
24	-53,62	0,14	1968,39	0,10	-580,69	-6,96
25	-50,17	-477,14	2026,86	-101,89	-539,30	-142,67
26	-69,73	-92,59	-243,91	127,30	-569,46	128,63
27	-49,59	-494,34	2090,05	-88,90	-537,48	-141,02
28	-74,89	-123,25	-361,59	139,00	-564,66	125,48
29	-46,52	-640,59	2670,05	-77,38	-518,28	-133,62
30	-37,05	34,65	277,00	154,67	-536,88	113,40
31	-46,82	275,33	1201,41	46,11	-504,56	119,76
32	-65,44	-91,76	505,17	-164,88	-467,80	-131,66
33	-46,97	258,58	1136,46	52,78	-507,78	120,10
34	-78,96	-157,25	765,27	-158,59	-469,13	-131,05
35	-45,45	307,74	1335,42	60,06	-499,42	116,30
36	-113,09	-331,35	1460,60	-154,15	-455,10	-125,31
37	-51,05	4,17	1593,47	-47,02	-556,94	-6,96
38	-52,87	2,92	1804,51	-34,33	-572,49	-8,18
39	-54,10	0,59	1833,79	-14,00	-583,84	-7,19
40	-54,73	0,82	1808,42	-11,97	-590,97	-6,19
41	-54,38	0,34	1972,20	-4,87	-591,09	-7,26
42	-50,79	-6,08	144,18	-109,83	-579,92	-146,55
43	-52,68	412,31	1773,77	119,58	-565,75	135,07
44	-52,29	3,92	104,95	-108,10	-578,17	-145,42
45	-51,93	365,15	1584,59	121,53	-562,73	133,15
46	-32,18	-83,20	455,32	-108,54	-568,36	-140,60
47	-49,31	447,89	1913,89	121,82	-546,84	126,56
48	-45,71	1,90	2098,48	-46,33	-515,97	-7,78
49	-49,93	-0,34	3261,29	-27,19	-548,17	-7,35
50	-52,17	-1,21	3486,88	-17,95	-566,43	-6,55
51	-53,34	-1,38	3606,54	-13,64	-577,07	-7,94
52	-54,22	-0,89	3592,79	-13,56	-585,50	-7,23
53	-54,42	-1,43	3539,46	-6,34	-589,15	-7,49
54	-55,53	-2,24	3526,47	2,71	-599,21	-7,08
55	-56,55	-2,63	3509,15	8,63	-608,65	-6,61
56	-56,54	-2,72	3561,81	12,43	-610,84	-6,81
57	-57,52	-3,35	3631,95	20,06	-620,05	-7,09
58	-58,88	-3,45	3520,25	24,00	-632,01	-6,94
59	-60,56	-3,24	3292,96	25,67	-646,21	-6,54
60	-62,68	-1,80	2457,84	18,56	-663,47	-6,30

Tabela B.11 Reações referentes a combinação 102.

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
1	-46,49	1,58	1101,61	-19,37	-510,25	-1,39
2	-48,59	1,59	1463,00	-19,19	-527,36	-1,69
3	-49,53	0,87	1575,57	-12,87	-536,33	-1,98
4	-50,38	-0,54	1653,15	-2,08	-544,65	-1,86
5	-51,34	-2,91	1672,42	15,63	-553,72	-2,44
6	-51,94	-4,20	1628,10	25,67	-560,22	-2,00
7	-52,40	-4,84	1608,71	31,02	-565,71	-2,05
8	-52,74	-5,62	1610,66	37,49	-570,37	-2,33
9	-53,16	-6,54	1741,50	44,99	-575,59	-2,24
10	-54,61	-6,55	1775,19	46,00	-588,10	-2,31
11	-55,59	-6,12	1611,69	44,14	-597,26	-2,44
12	-55,52	-6,63	1499,79	48,89	-598,96	-3,00
13	-55,25	-8,41	1578,92	62,77	-599,30	-3,25
14	-157,28	542,94	2273,53	63,85	-458,69	115,80
15	-44,17	94,61	-240,02	-152,13	-480,30	-120,47
16	-163,97	573,55	2395,06	62,98	-463,05	116,36
17	-43,94	45,86	-44,64	-152,15	-480,74	-120,29
18	-184,37	678,89	2819,97	70,47	-452,18	111,78
19	-41,25	-132,57	666,17	-146,63	-464,37	-113,83
20	-49,62	2,64	2181,76	-27,76	-542,03	-1,89
21	-51,91	2,02	2385,14	-22,46	-561,02	-1,78
22	-52,55	1,80	2391,52	-19,94	-568,21	-1,87
23	-51,75	1,47	2628,45	-16,58	-565,16	-2,16
24	-51,97	0,77	3347,59	-10,46	-569,37	-2,49
25	-53,88	-605,39	2546,35	-121,87	-566,70	-146,96
26	-19,29	161,24	766,08	109,93	-586,20	140,39
27	-51,32	-461,47	1970,34	-119,94	-551,12	-140,81
28	-38,81	55,33	341,76	109,36	-569,47	133,30
29	-47,65	-543,81	2298,11	-116,11	-527,77	-131,92
30	-4,31	198,21	917,04	117,31	-541,90	121,54
31	-46,67	222,41	1002,49	81,66	-498,92	123,90
32	-107,75	-294,40	1303,84	-132,16	-468,74	-125,72
33	-45,84	191,66	880,32	83,82	-495,25	122,14
34	-110,55	-311,97	1374,10	-131,40	-464,84	-123,17
35	-43,97	269,36	1189,19	81,28	-484,35	117,99
36	-140,39	-464,76	1990,14	-139,92	-450,07	-117,23
37	-49,61	3,77	2001,64	-39,36	-543,32	-1,37
38	-52,22	3,95	2271,11	-39,79	-564,64	-1,72
39	-53,18	3,79	2264,96	-37,71	-574,21	-1,80
40	-53,28	4,02	2336,24	-38,33	-577,60	-1,74
41	-53,53	4,66	2607,54	-41,78	-582,11	-2,22
42	-46,95	-23,04	229,23	-148,42	-582,40	-142,64

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
43	-52,68	595,46	2492,58	86,60	-562,09	138,60
44	-62,29	53,33	-82,05	-136,88	-577,85	-140,56
45	-51,50	530,56	2236,05	93,09	-555,97	136,30
46	-52,26	13,62	77,88	-137,64	-568,82	-135,63
47	-49,30	601,94	2519,22	90,11	-542,72	131,42
48	-47,31	1,01	1425,96	-25,95	-519,87	-2,23
49	-49,66	0,08	1797,61	-18,56	-538,77	-1,80
50	-50,61	0,53	1903,97	-20,97	-547,87	-1,05
51	-51,46	2,05	1997,60	-31,17	-556,21	-1,58
52	-52,39	3,12	2004,83	-38,02	-565,22	-1,40
53	-53,05	3,37	1978,09	-39,60	-572,34	-1,69
54	-53,73	3,41	1950,46	-38,45	-579,59	-1,79
55	-54,31	3,40	1933,27	-37,59	-586,22	-1,76
56	-54,67	3,63	1959,14	-38,32	-591,34	-1,72
57	-55,70	3,66	2031,52	-37,56	-601,11	-3,26
58	-56,75	2,78	1947,38	-29,81	-610,84	-3,09
59	-57,17	2,39	1854,29	-25,88	-616,11	-2,51
60	-57,59	2,83	1796,28	-27,87	-621,33	-2,28

Tabela B.12 Reações referentes a combinação 76.

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
1	-42,93	14,48	732,56	-125,28	-484,43	-7,15
2	-44,54	13,48	2154,04	-114,95	-498,20	-7,77
3	-47,93	10,33	3205,97	-89,23	-524,52	-8,49
4	-51,88	6,75	3290,66	-60,40	-554,85	-7,47
5	-54,82	-0,35	2282,95	-6,42	-578,05	-9,87
6	-53,65	-6,50	1229,59	40,76	-572,12	-8,63
7	-52,57	-9,06	989,00	62,23	-566,69	-7,37
8	-52,57	-9,83	1006,29	70,92	-569,04	-6,68
9	-52,86	-8,72	1205,21	66,20	-573,36	-5,96
10	-54,12	-7,52	1335,95	60,69	-584,64	-7,11
11	-55,07	-8,86	1304,03	73,55	-593,64	-7,60
12	-55,27	-10,95	1273,01	91,68	-597,33	-7,89
13	-54,88	-13,73	1398,62	114,71	-596,78	-8,13
14	-147,91	505,01	2119,70	47,50	-454,42	107,06
15	-42,86	374,13	-1357,12	-165,29	-473,33	-122,32
16	-170,29	603,55	2511,49	46,63	-469,15	111,50
17	-43,62	230,67	-779,96	-168,44	-480,75	-124,27
18	-193,48	719,37	2974,29	49,18	-463,86	108,42
19	-41,35	2,96	132,30	-168,43	-467,27	-118,61
20	-50,27	3,83	1957,31	-40,91	-550,07	-8,18
21	-52,03	1,42	2300,36	-19,94	-565,30	-6,81

ESTACA/REAÇÃO	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
22	-53,61	1,10	2414,84	-13,88	-579,16	-7,25
23	-54,72	-1,19	2374,88	6,21	-589,67	-8,15
24	-55,06	-2,93	2377,08	22,32	-594,71	-7,14
25	-51,63	-546,89	2294,52	-81,45	-553,04	-146,62
26	-61,43	-50,53	-64,01	148,59	-581,17	130,09
27	-50,66	-551,75	2309,29	-70,00	-548,60	-143,92
28	-67,65	-87,48	-208,01	158,27	-574,13	126,33
29	-47,12	-707,11	2927,29	-61,27	-526,22	-135,20
30	-24,91	90,77	509,92	170,34	-541,15	112,92
31	-47,77	270,09	1180,66	46,48	-514,91	122,25
32	-67,26	-95,99	521,83	-164,34	-478,04	-134,26
33	-47,91	253,93	1118,11	53,25	-518,04	122,58
34	-81,10	-163,27	789,04	-158,01	-479,03	-133,51
35	-46,24	308,14	1337,07	60,20	-508,60	118,51
36	-116,96	-346,63	1522,04	-154,60	-463,27	-127,11
37	-51,30	5,07	1773,26	-53,38	-562,62	-6,53
38	-53,37	5,42	2182,37	-52,06	-579,92	-7,79
39	-54,96	3,76	2305,55	-36,43	-593,90	-7,24
40	-55,84	3,87	2300,95	-33,49	-602,76	-6,36
41	-55,80	3,17	2428,66	-24,80	-605,13	-7,35
42	-38,37	-70,47	412,57	-129,02	-595,20	-149,61
43	-53,89	474,42	2012,36	102,51	-578,03	138,01
44	-43,20	-42,72	301,39	-125,47	-590,36	-147,49
45	-52,80	415,66	1777,64	105,99	-572,66	135,26
46	-21,32	-136,12	675,54	-123,48	-576,96	-141,70
47	-49,51	514,91	2175,15	110,16	-552,17	126,66
48	-46,78	1,89	2104,12	-46,21	-527,58	-7,88
49	-51,10	-0,29	3280,17	-27,45	-560,50	-7,41
50	-53,78	-0,83	3502,57	-20,60	-581,85	-6,33
51	-56,24	-0,07	3424,90	-22,80	-601,67	-8,06
52	-58,54	3,29	2558,95	-43,27	-620,17	-5,82
53	-57,61	6,07	1665,76	-59,79	-615,75	-6,39
54	-56,88	6,77	1430,77	-61,47	-612,79	-6,95
55	-57,06	6,43	1427,64	-55,79	-616,28	-7,24
56	-57,42	5,67	1501,19	-47,11	-621,08	-7,27
57	-58,49	4,97	1550,77	-38,78	-630,95	-7,20
58	-59,41	4,37	1460,01	-31,34	-639,74	-7,04
59	-59,70	4,12	1385,21	-26,41	-644,01	-6,86
60	-59,65	4,56	1396,09	-26,36	-645,90	-6,53