

**Projeto Estrutural de uma Jaqueta para Plataforma de Manutenção de  
Aeronaves na Bacia de Campos**

Augusto Antunes dos Santos

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF

Campos dos Goytacazes – RJ

Agosto - 2006

# **Projeto Estrutural de uma Jaqueta para Plataforma de Manutenção de Aeronaves na Bacia de Campos**

Augusto Antunes dos Santos

“Projeto Final em Engenharia Civil apresentado ao laboratório de Engenharia Civil de Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Civil.”

Orientador: Prof. Jean Marie Désir

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF

Campos dos Goytacazes – RJ

Agosto - 2006

# Projeto Estrutural de uma Jaqueta para Plataforma de Manutenção de Aeronaves na Bacia de Campos

Augusto Antunes dos Santos

“Projeto Final em Engenharia Civil apresentado ao laboratório de Engenharia Civil de Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Civil.”

Aprovada em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

Comissão Examinadora:

---

Prof. Gines Arturo Santos Falcon

---

Prof. Sergio Luis González Garcia

---

Prof. Jean Marie Désir

## Dedicatória

À minha esposa, que esteve sempre ao meu lado durante toda a minha jornada da graduação.

## Agradecimentos

A Deus, aos meus pais Odorico Baptista dos Santos e Regina Célia Antunes dos Santos pelo apoio e incentivo aos meus estudos, a todos os meus amigos, em especial José Roberto, Diego Borçoi, Rodrigo de Brito, Maikon, Cristiano Miller, Marcos e Filipe Sodré, ao professor e orientador Jean Marie Désir pelos conselhos, compreensão e a dedicação, não só durante o projeto final, como em toda a graduação. Aos professores e funcionários de LECIV especialmente a Tibana, Dylmar, Gines e Sergio. A toda a equipe do ST/EIS-UNBC Petrobrás principalmente aos integrantes do setor Estruturas Oceânicas e Navais. E a todos que de certa forma ajudaram na elaboração deste trabalho.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS, SINAIS E UNIDADES.....	x
Introdução .....	1
1.1 Objetivo e Justificativa .....	4
1.2 Descrição do problema .....	5
1.2.1 Cargas atuantes .....	7
2. Determinação das cargas.....	8
2.1 – Determinação das cargas devido às ondas e correntes .....	8
2.1.1 Período de onda aparente (Taap) .....	9
2.1.2 Determinação do período de onda aparente .....	10
2.2 Equação de Morison .....	13
2.3 Teoria de Airy .....	15
2.4 Vento .....	16
2.5. Empuxo vertical exercido pela água do mar sobre os elementos.....	18
2.6. Cargas Permanentes .....	18
3. Análise estrutural.....	19
3.1 Resumo das cargas de onda e vento .....	21
3.2 Determinação das forças de reação do convés.....	22
3.3 Análise estrutural da jaqueta .....	25
3.3.1 Peso Próprio .....	26
3.3.2 Reações de apoio .....	26
3.3.3 Deslocamento dos elementos .....	27
3.3.4 Verificação dos elementos .....	29
CONCLUSÕES .....	31
BIBLIOGRAFIA .....	32
ANEXOS .....	33

## RESUMO

A importância da exploração petrolífera na região Norte-Fluminense é a principal motivação para a escolha do “Projeto de uma jaqueta para Plataforma de Manutenção de Aeronaves na Bacia de Campos” como proposta de projeto final. A jaqueta é um sistema offshore de sustentação para a área de extração e produção de petróleo. Foi desenvolvida uma metodologia de trabalho que consistiu na organização de um conjunto de procedimentos para a realização do dimensionamento da jaqueta. Além disso, utilizaram-se recursos computacionais como ferramentas de apoio para automatizar estes procedimentos. Numa primeira etapa, foi feita uma pesquisa dos tipos de geometrias mais comuns em estrutura offshore, para definir o objeto deste estudo. Após, determinou-se às solicitações devidas às ondas, correntes marinhas, vento, peso próprio, sobrecarga e por fim procedeu-se à verificação dos elementos estruturais definidos na etapa de pré-dimensionamento de acordo com as exigências normativas vigentes.

**PALAVRAS CHAVE:** Estruturas de aço, Jaqueta, Análise estrutural, Estruturas Offshore.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Plataforma fixa .....	1
Figura 2 - Plataforma Semi-submersível .....	2
Figura 3 - Plataforma de perfuração.....	2
Figura 4 - Unidade FPSO .....	3
Figura 5 - TLP.....	3
Figura 6 - Partes de uma plataforma fixa.....	4
Figura 7 - Vistas da jaqueta .....	5
Figura 8 - Vista superior da plataforma.....	6
Figura 9 - Vista frontal da plataforma .....	7
Figura 10 - Vista lateral da plataforma .....	7
Figura 11 - Variação do Doppler devido a uma corrente fixa .....	10
Figura 12 – Efeito de Ekman .....	12
Figura 13 - Forças de arraste e de inércia.....	13
Figura 14 - Esquema de onda típica.....	15
Figura 15 - Características da aeronave.....	19
Figura 16 - Combinações analisadas.....	20
Figura 17 - Pontos de aplicação das cargas de onda .....	22
Figura 18 - Mapa de carregamento do convés .....	23
Figura 19 - Modelo do convés em elementos finitos .....	24
Figura 20 - Elementos utilizados .....	25
Figura 21 – Apoios.....	27
Figura 22 - Deslocamento máximo. Carregamento Sudoeste.....	28
Figura 23 - Deslocamento máximo. Carregamento Sudeste .....	28
Figura 24- Resumo das seções determinadas .....	30

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ondas centenárias para a Bacia de Campos .....	10
Tabela 2 - Velocidade das correntes nas principais direções .....	11
Tabela 3 - Relação onda x Taap .....	13
Tabela 4 - Velocidade de vento para um período de retorno de 100 anos.....	18
Tabela 5 - Resumo das cargas variáveis.....	21
Tabela 6 -Reações de apoio do convés.....	24
Tabela 7 - Classificação dos perfis .....	26
Tabela 8 - Reações de apoio da jaqueta para as direções sudeste e sudoeste.....	26
Tabela 9 - Resumo das resistências e solicitações das seções.....	29

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS, SINAIS E UNIDADES.

TLP	Tension leg platform;
MODU	Mobile offshore drilling unit ;
FPSO	Floating Production, storage and offloading;
Taap	Período de onda aparente;
$V_i$	Velocidade de corrente;
F	Vetor de força hidrodinâmico;
$F_D$	Vetor de força de arraste;
$F_I$	Vetor de força de inércia;
$C_d$	Coefficiente de arraste;
$C_m$	Coefficiente de inércia;
W	Peso de água;
G	Aceleração gravitacional;
A	Área projetada normal ao eixo de cilindro;
V	Volume deslocado do cilindro;
D	Diâmetro efetivo de membro cilíndrico circular ;
U	Componente do vetor de velocidade da água normal ao eixo do membro;
U	Valor absoluto de U;
$\delta U/\delta t$	Componente do vetor aceleração local da água normal ao eixo axial do elemento;
L	Comprimento de onda;
$\omega$	Frequência da onda;
c	Celeridade;
k	Número de onda;
d	Profundidade da lamina d'água;
Fv	Força de vento;
$\rho$	Densidade de massa do ar;
u	Velocidade do vento ;
$C_s$	Coefficiente de forma;
s	Distância do fundo do mar até a altura em que se deseja calcular as velocidades e as acelerações;

x	Distância entre ponto considerado como início da onda e o ponto onde deseja-se os valores de acelerações e velocidade;
H	Altura total da onda, da crista até o cavado;
Hs	Altura significativa da onda;
E	Força de empuxo;
w	Densidade da água;
V	Volume deslocado pelo elemento;
K	Parâmetro de flambagem;
Ag	Área bruta;
Al	Área líquida;
$d_y$	Tensão de escoamento do aço;
$f_v$	Tensão de ruptura do aço;
$\emptyset$	Diâmetro;
b	Largura;
t	Espessura;
l	Comprimento real;
$\lambda$	Parâmetro de esbeltez;
r	Raio de giração;
E	Módulo de elasticidade;
I	Momento de inércia;
Md	Momento fletor de cálculo;
Mnresx	Resistência nominal ao momento fletor;
Nd	Força normal de cálculo;
Ncry	Carga crítica;
Ncrz	Carga crítica;
Z	Módulo de resistência plástico;
V	Força cortante;
Vd	Força cortante de cálculo;
$F_{v_{n,m}}$	Força onda elemento vertical;
$F_{i_{n,m}}$	Força onda elemento inclinado;
$F_{h_{n,m}}$	Força onda elemento horizontal;
n	Distância x do ponto de incidência da onda até o elemento;
m	Elevação;
N	Newton;

Pa	Pascal;
Kgf	Kilograma força;
m	Metro;
cm	Centímetro;
in	Polegadas.

## Introdução

Os Sistemas *Offshore* compreendem unidades marinhas de exploração, produção e/ou armazenamento de petróleo. Eles podem ser fixos (não flutuantes), tais como: jaquetas, plataforma auto-elevatórias, torre estaiada, torre Gamma, torre Roseau, torre Delta, ou flutuantes, tais como: Plataformas semi-submersíveis, plataformas de pernas tensionadas (TLP) e navios ancorados como descritos a seguir.

- Plataforma fixa - Inicialmente a extração de petróleo offshore no Brasil era efetuada em lâmina d'águas com profundidades variando de 100m a 500m. Para isto foram utilizadas plataformas fixas (figura 1) apoiadas no leito marinho. Como estas plataformas são fixadas no fundo e são estruturas relativamente rígidas, os efeitos dinâmicos e os efeitos não lineares devido aos carregamentos de onda, vento e correnteza não se apresentam de forma muito significativa.



Figura 1 - Plataforma fixa

À medida que foram sendo descobertos novos reservatórios de petróleo em lâminas d'água mais profundas (500m a 1000m), para compor novas alternativas na exploração de petróleo em águas profundas, foram introduzidos os sistemas flutuantes ancorados no fundo do mar por meio de cabos.

- Plataforma semi-submersível - As semi-submersíveis (figura 2) são plataformas com estruturas flutuantes largamente empregadas para produção e perfuração. Consistem de dois flutuadores compartimentados em tanques com finalidades de oferecer lastro e flutuação à plataforma. Estes flutuadores são denominados de “pontoons”, os quais apóiam as colunas, também chamadas de pernas, e que por sua vez sustentam os conveses. Sua profundidade pode ser alterada através do bombeio de água para o tanque de lastro



Figura 2 - Plataforma Semi-submersível

As Semi-submersíveis podem ser empregadas tanto em produção quando perfuração. As plataformas Semi-submersíveis de perfuração (figura 3) são geralmente denominadas de MODU (*Mobile Offshore Drilling Unit*).



Figura 3 - Plataforma de perfuração

• Navios FPSO - Navios do tipo FPSO (Floating Production, Storage and Offloading) (figura 4), são navios adaptados a extrair, armazenar e exportar petróleo, estando estes também ancorados ao fundo do mar por meio de cabos.



Figura 4 - Unidade FPSO

• TLP - A TLP (*tension leg platform*) (figura 5) consiste numa estrutura similar à semisubmersível, sendo mantida na locação através de tirantes (pernas) que são ancorados no fundo através de estacas e tracionadas no topo pela força resultante entre peso e empuxo. Seu casco é semelhante ao casco da plataforma Semi-submersível.

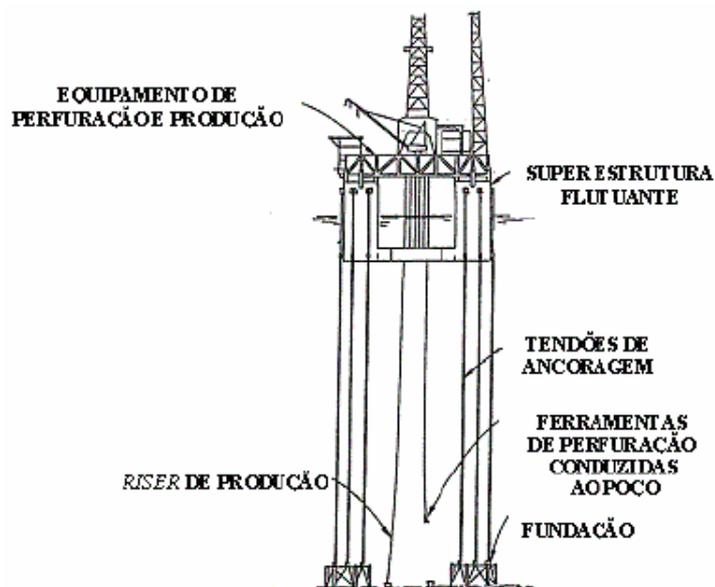


Figura 5 - TLP

- Spar-buoy - O sistema Spar consiste de um único cilindro vertical de aço de grande diâmetro, ancorado, operando com um calado de profundidade constante de cerca de 200 metros, o que gera apenas pequenos movimentos verticais.

Uma jaqueta consiste em uma estrutura de sustentação para a plataforma, sendo a maior parte dessa estrutura submersa. A interface entre os módulos da plataforma e a jaqueta é feita através de uma estrutura chamada Cellar Deck ou convés conforme é mostrado na figura 6.

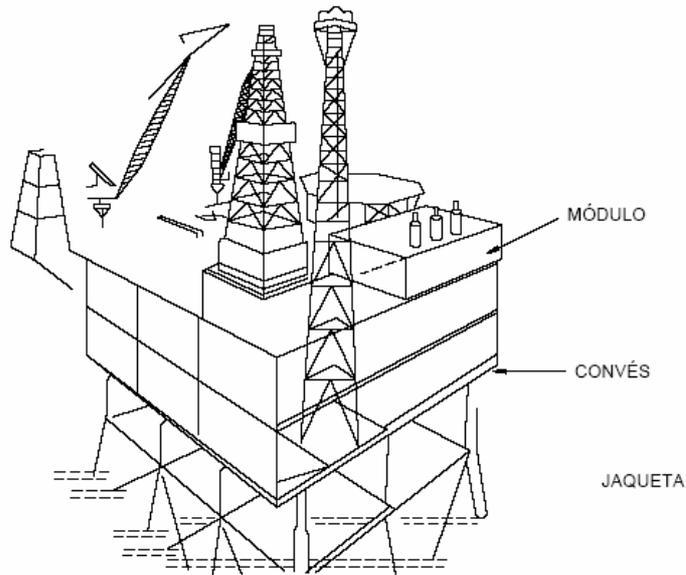


Figura 6 - Partes de uma plataforma fixa

### 1.1 Objetivo e Justificativa

Considerando a importância econômica e social da produção de petróleo na região do norte fluminense e a necessidade de formação de recursos humanos com competência para trabalhar com este tipo de estrutura, julga-se relevante o aprimoramento dos conhecimentos do engenheiro civil para atuar neste setor. Desta forma, objetiva-se o cumprimento do requisito para a conclusão do curso de graduação através do dimensionamento de uma jaqueta de uma plataforma fixa para manutenção de aeronaves.

## 1.2 Descrição do problema

A estrutura da jaqueta consiste em elementos de aço tubulares unidos por soldas em suas junções. A estrutura apresenta uma parte submersa sob uma lamina d'água de 42 m e 9,5 m acima do nível médio do mar. É composta por 8 pernas e elementos horizontais, verticais e inclinados para o travamento da estrutura (contraventamentos). A figura 7 ilustra a geometria da estrutura.

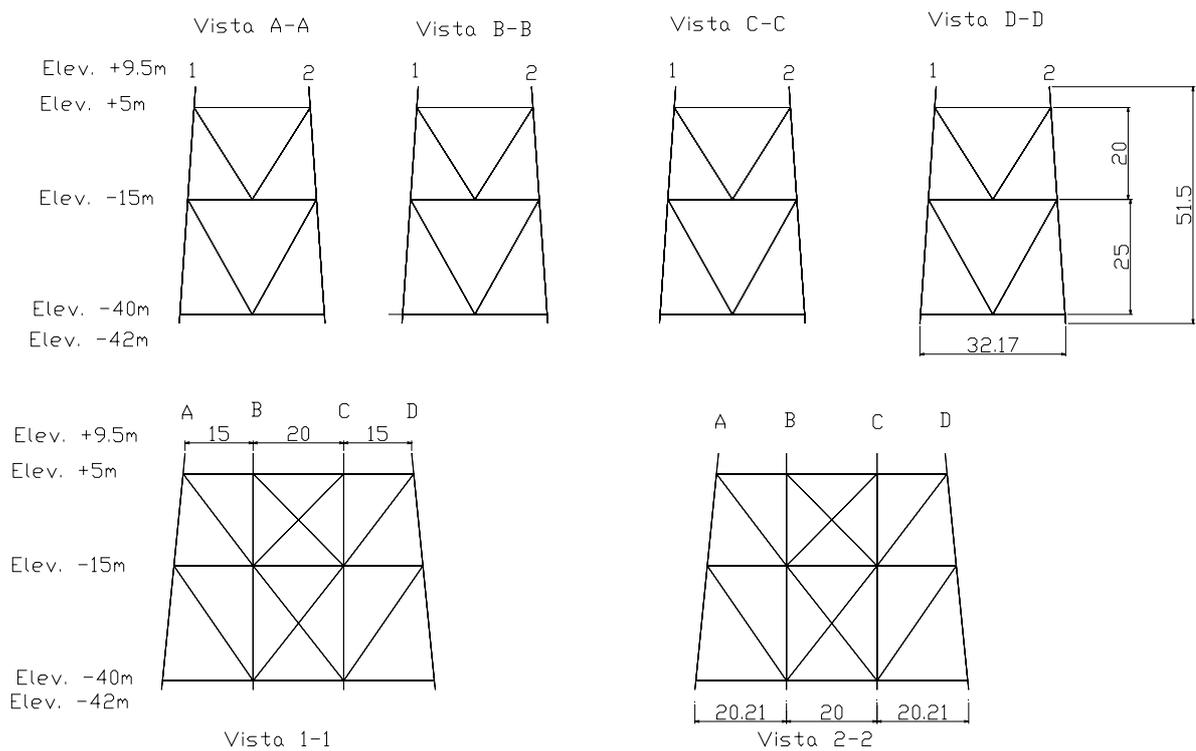


Figura 7 - Vistas da jaqueta (unidades em metros)

Como o projeto de uma unidade de reparos em aeronaves e estruturas offshore envolve inúmeras variáveis, a fim de simplificar a execução do presente

trabalho, foram consideradas apenas as variáveis indispensáveis. Desta forma, foram feitas as considerações necessárias para os seguintes constituintes da plataforma:

- Alojamento
- Dois helipontos
- Convés inferior e superior
- Guindaste
- Oficina
- Aeronaves modelo Superpuma
- Estação de tratamento de dejetos para embarcações marítimas
- Capacidade máxima de pessoas – 60

As figuras de 8 a 10 mostram os croquis de como seria o layout da plataforma:

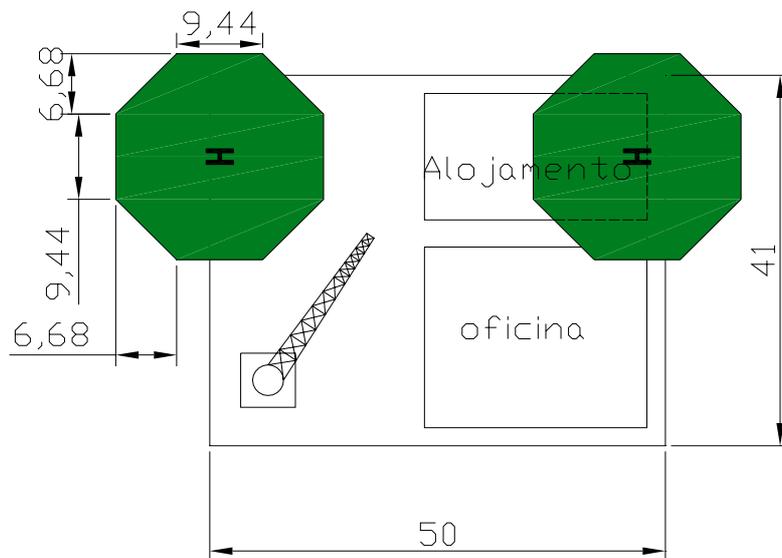


Figura 8 - Vista superior da plataforma (unidades em metros)

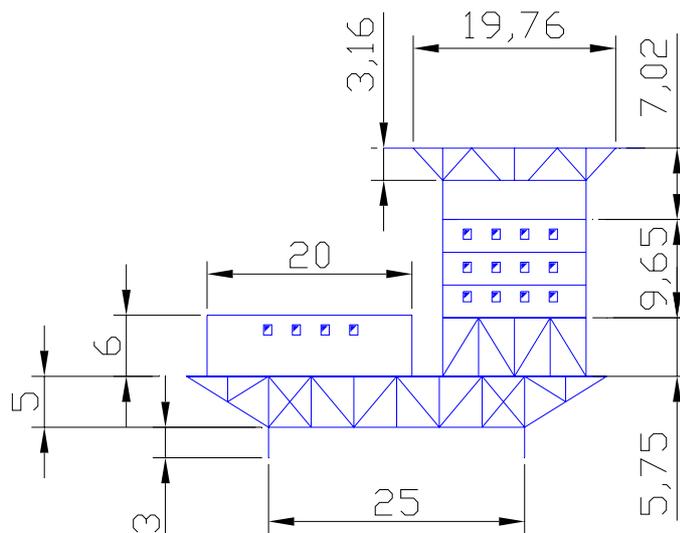


Figura 9 - Vista frontal da plataforma (unidades em metros)

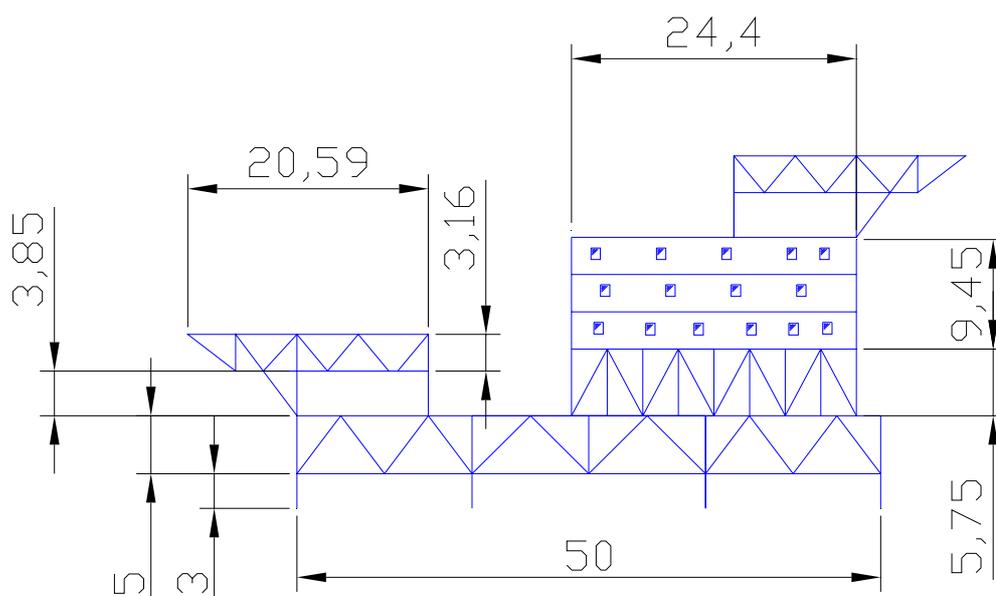


Figura 10 - Vista lateral da plataforma (unidades em metros)

### 1.2.1 Cargas atuantes

Neste tipo de estrutura dois tipos de cargas devem ser consideradas necessariamente: as cargas permanentes e as cargas devido a ondas, ventos e correntes marinhas.

As cargas permanentes são o peso próprio da estrutura e dos módulos, os equipamentos e os sistemas elétrico e hidráulico.

## 2. Determinação das cargas

- Considerações gerais

As estruturas das plataformas devem ser dimensionadas para suportar as condições mais severas impostas pelo meio-ambiente combinadas com as condições críticas de operação. Sendo assim, será considerada como condição extrema para a determinação dos esforços impostos por ondas, correntezas e ventos em uma direção principal (Norte, Sul, Leste, Oeste, etc) e para um período de retorno estipulado em 100 anos, como determina a norma API RP2A-WSD.

Através de dados Meteoceanicos obtidos por medições nas plataformas da Bacia de Campos, adotar-se-á como base para o presente projeto, valores mais próximos à localização proposta para a fixação da plataforma.

Para um melhor entendimento afirma-se que é adotada como direção para os ventos e ondas como sendo a direção para a qual irão, por exemplo, vento norte, vento indo à direção norte e para as correntes marinhas adota-se o oposto, corrente sul, originária do sul e seguindo para o norte, ou seja, “ vento e onda vão para..., e correntes vem de ...”.

### 2.1 – Determinação das cargas devido às ondas e correntes

A carga de onda em uma plataforma é de natureza dinâmica. Para as profundidades atuais de projeto, estas cargas podem, no entanto, ser representadas adequadamente pela sua equivalente estática.

A maioria das teorias de ondas normalmente utilizadas em projeto de estruturas offshore consideram três parâmetros básicos: profundidade da água, altura e período da onda. Sendo assim, o processo de obtenção das cargas devido a uma onda, inicia-se com a especificação da altura e do período de onda de projeto, da profundidade de água de tormenta (profundidade da lâmina d'água para as condições mais adversas do mar) e do contorno atual (topografia do solo no fundo do mar, por questões de simplificação adota-se plano). De forma a obter tais valores, fazem-se necessários os passos seguintes.

### 2.1.1 Período de onda aparente ( $T_{aap}$ )

Sabendo-se que uma corrente na direção da onda tende a aumentar a duração da onda, enquanto uma corrente no sentido contrário tende a encurtar a duração da onda, é necessário, inicialmente, calcular o período de onda aparente (causado pela corrente marinha) para que se possa determinar a força transmitida a um objeto quando há o encontro entre a onda e o objeto. Para o caso simples de uma propagação de onda em uma linha de corrente uniforme, o período de onda aparente pode ser visto por um observador que se move com a corrente e pode ser estimado pela figura 11 nos quais  $T$  é o período de onda atual (como visto por um observador estacionário).  $V_i$  é a componente da corrente na direção da onda,  $d$ , é profundidade de água de tormenta (incluindo onda de tormenta e maré), e  $g$  é a aceleração de gravidade.

A figura 11 provê estimativas aceitáveis para o período de onda aparente  $T_{aap}$  para  $d/g.T^2 > 0.01$ . Para valores menores de  $d/g.T^2$ , a equação  $(T_{aap}/T) = 1 + V_i\sqrt{gd}$  pode ser usada.

$$\begin{cases} \frac{T_{aap}}{T} = \frac{d}{g}T^2, & \text{se } d/g.T^2 \geq 0.01 \\ \frac{T_{aap}}{T} = 1 + V_i\sqrt{gd}, & \text{se } d/g.T^2 < 0.01 \end{cases}$$

Ou seja, caso o valor de  $d/g.T^2$  seja maior ou igual a 0.01 usa-se a primeira equação, caso contrário deve-se utilizar a segunda equação.

A figura 11, ilustra 4 curvas para cálculo do período de onda aparente que podem ser usadas para valores de  $d/g.T^2$  variando de 0.01 a 0.1

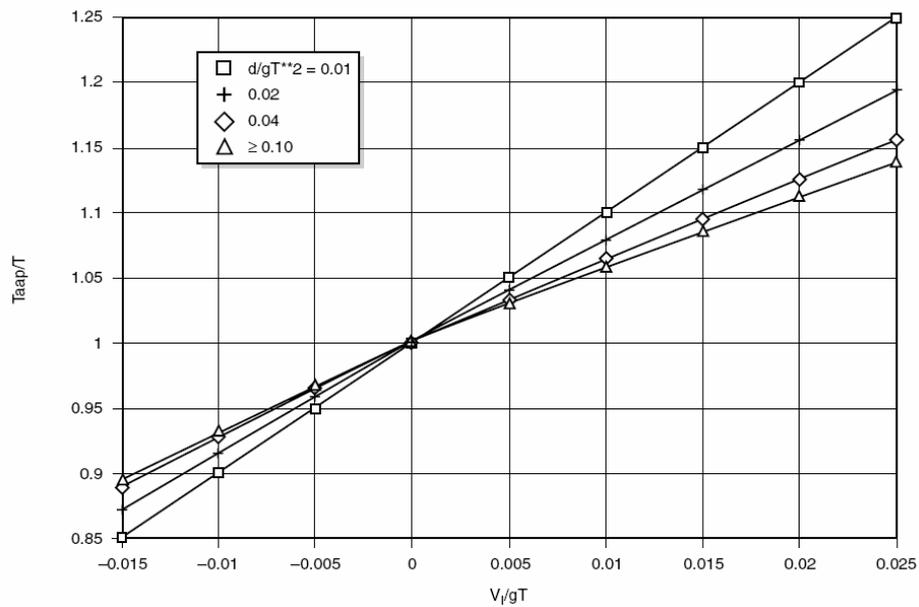


Figura 11 - Variação do Doppler devido a uma corrente fixa

### 2.1.2 Determinação do período de onda aparente

Considerando a lâmina de 40m d'água na região em que estaria fixada a estrutura e onde a maré máxima é de 2 m, pode-se afirmar que a profundidade de projeto será:

$$d = 40 + 2 = 42 \text{ m} \quad \text{sendo } d \text{ a altura da lamina d'água}$$

A tabela 1 apresenta os valores das alturas significantes das ondas e seus respectivos períodos para cada direção:

Tabela 1 – Ondas centenárias para a Baía de Campos

Direção	Hs: Altura (m)	T: Período (s)
Norte	5.01	9.56
Nordeste	5,17	9,77
Leste	4.87	10.40
Sudeste	6.53	11.63
Sul	7.10	14.35
Sudoeste	7.84	15.55
Oeste / Nordeste	3.88	8.51

Observando a tabela anterior obtém-se que a onda na direção Sudoeste é a principal onda atuante sobre a jaqueta. Como na direção perpendicular poderá ocorrer a incidência de outra onda, os esforços causados pela onda da direção Sudeste também serão analisados.

A tabela 2 define a velocidade das correntes até a profundidade de 42m.

Tabela 2 - Velocidade das correntes nas principais direções

Direção	Velocidade (m/s)		
	Superfície	20 m	Fundo
Norte	1.48	1.48	0
Nordeste	0.92	0.92	0
Leste	0.92	0.92	0
Sudeste	0.61	0.61	0
Sul	1.20	1.20	0
Sudoeste	1.59	1.59	0
Oeste	1.32	1.32	0
Noroeste	1.32	1.32	0

As correntes marinhas são causadas por diversos fatores, tais como: marés, ventos, quedas de pressão barométrica e diferenças de densidade entre diferentes regiões do mar. A velocidade da corrente varia com a profundidade e, pode inclusive mudar de direção, sendo normalmente maior o seu valor na superfície. Para as direções anteriormente mostradas na tabela, não houve variação na direção da corrente marinha em função da profundidade. Com a intenção de esclarecer melhor alguns conhecimentos, afirma-se que a corrente sofre o efeito da força de Coriolis, e que se obtém um perfil de corrente devida ao vento de espiral (espiral de Ekman), deduzido matematicamente a partir do coeficiente de arraste do vento sobre a superfície do mar e do coeficiente de atrito turbulento da água. Este efeito (efeito de Ekman) é sentido com maior intensidade a partir de 18° de latitude e acontece não só na superfície como também no fundo. A figura 12 ilustra uma espiral de Ekman a partir do vento, para o hemisfério norte, para o hemisfério sul (Bacia Campos) o desvio se dá ao contrario do indicado na figura 12, sendo assim, a corrente fica a esquerda do vento.

As forças combinadas de ondas e correntes dependem naturalmente das respectivas direções e sentido de movimento das partículas fluidas. Numa aproximação, esta combinação será tomada como máxima quando a direção da corrente coincidir com a das ondas.

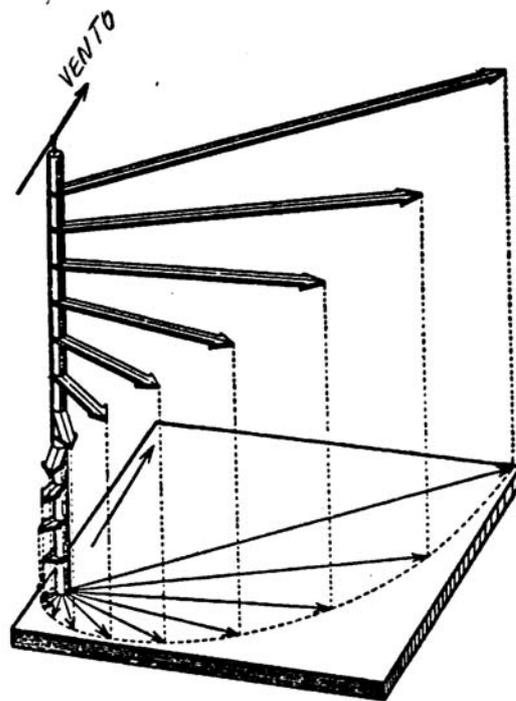


Figura 12 – Efeito de Ekman

Retornando as rotinas para determinação do período de onda aparente, para se obter a curva de ajuste (figura 11), os cálculos para a direção sudeste resultarão nos seguintes valores:

$$d = 40 + 2 \therefore d = 42 \text{ m} \quad T = 11.63 \text{ s}$$

$$V_i = 1.32 \text{ m/s} \quad d/g.T^2 = 0.032$$

Aproximando o valor de  $d/gT^2$  para 0.3 obtém-se a curva de ajuste. Da mesma forma é feito para Sudoeste obtendo a curva 0.2.

Os valores de  $V_i/gT$  para as curvas são:

Sudeste = 0.012 ( $V_i$  considerado foi 1.32 m/s direção noroeste)

Sudoeste = 0.006 (Vi considerado foi 0.92 m/s direção nordeste)

Através do gráfico apresentado na figura 11 define-se a relação  $T_{app}/T$  para as duas ondas mencionadas anteriormente.

Tabela 3 - Relação onda x  $T_{app}$

Onda	$T_{app}$ (s)
Sudeste	12.21
Sudoeste	16.33

## 2.2 Equação de Morison

O cálculo da força exercida por ondas em um objeto cilíndrico depende da relação do comprimento de onda para o diâmetro do membro. Quando esta relação é grande ( $> 5$ ), o membro não modifica significativamente a onda incidente. A força de onda pode ser computada então como a soma de uma força de arraste e de uma força de inércia, conforme ilustra a figura 13.

$$F = F_D + F_I = \left( C_D \frac{w}{2g} AU|U| + C_m \frac{w}{g} V \frac{\delta U}{\delta t} \right) \text{ (equação de Morison)}$$

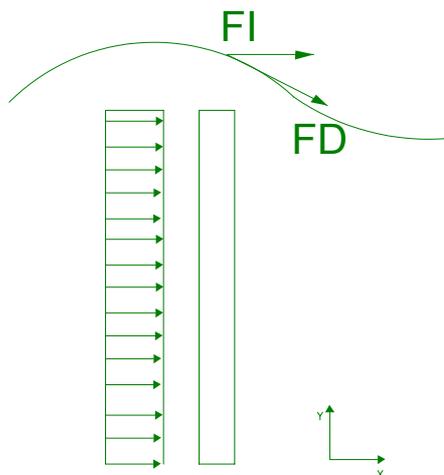


Figura 13 - Forças de arraste e de inércia

Onde:

$F$  = vetor de força hidrodinâmica por unidade de comprimento atuando normal ao eixo do membro, lb/ft (N/m),

$F_D$  = vetor de força de arraste por unidade de comprimento atuando axialmente no plano formado entre o eixo do membro e da velocidade  $U$ , lb/ft (N/m).

$F_I$  = vetor de força de inércia por unidade de comprimento normal ao eixo do elemento no plano formado entre o eixo do elemento e da aceleração  $\delta U/\delta t$

$C_d$  = coeficiente de arraste, para elemento áspero  $C_d = 1.05$  (valor tabelado).

$C_m$  = coeficiente de inércia, para elemento áspero  $C_m = 1.2$  (valor tabelado).

$w$  = densidade da água, lb/ft<sup>3</sup> (N/m<sup>3</sup>),

$g$  = aceleração gravitacional, ft/s<sup>2</sup> (m/s<sup>2</sup>),

$A$  = área projetada normal ao eixo de cilindro por unidade de comprimento (=  $D$  para cilindros), ft (m),

$V$  = volume deslocado do cilindro por unidade de comprimento ( $=\pi D^2/4$  para cilindros), ft<sup>2</sup> (m<sup>2</sup>),

$D$  = diâmetro efetivo de membro, ft (m),

$U$  = componente do vetor de velocidade (devido à onda e corrente) da água normal ao eixo do membro, ft/s (m/s),

$|U|$  = valor absoluto de  $U$ , ft/s (m/s),

$\delta U/\delta t$  = Componente do vetor aceleração local da água normal ao eixo do elemento, ft/s<sup>2</sup> (m/s<sup>2</sup>).

Considerando que o tamanho do corpo estrutural ou membro não é suficientemente grande para medir uma porção significativa de um comprimento de onda, então não são difundidas ondas incidentes. Não havendo ondas difundidas durante o contato da onda com os elementos, restringe-se a análise dos elementos apenas às ondas de Sudeste e Sudoeste.

Para a determinação das parcelas da equação de Morison deve-se utilizar uma teoria de cálculo de ondas tais como a Teoria Linear de Airy, Teoria de Stokes e a Função Stream. Para o caso exposto neste trabalho, a teoria mais indicada seria a equação de Stokes de 5ª ordem. A fim de evitar a grande complexibilidade desta teoria serão usadas as técnicas de cálculo da teoria Airy. Visto que para o mar da Bacia de Campos a teoria de Airy apresenta resultados próximos a de Stokes [8].

### 2.3 Teoria de Airy

A figura 14 ilustra uma onda típica:

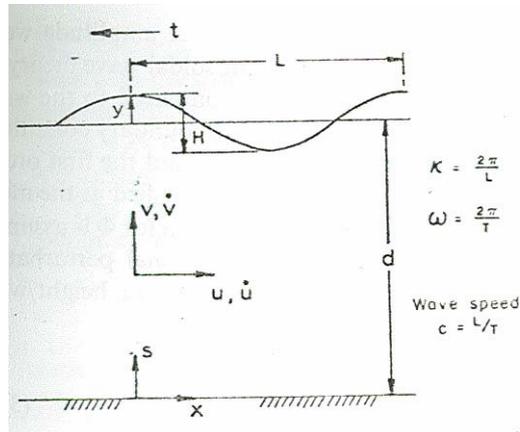


Figura 14 - Esquema de onda típica

Através da teoria definem-se alguns parâmetros e utilizando algumas simplificações pode-se adotar:

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad \text{e} \quad c^2 = \frac{g}{k} \tanh kd$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kd \quad , \quad \text{ou para águas profundas : } L = \frac{gT^2}{2\pi}$$

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

Onde:

L = Comprimento de onda

$\omega$  = freqüência da onda

c = celeridade

k = número de onda

d = profundidade da lamina d'água

g = aceleração da gravidade

As velocidades horizontal e vertical da partícula são dadas por:

$$u = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (\text{velocidade horizontal})$$

$$v = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\sinh ks}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \text{ (velocidade vertical)}$$

As acelerações horizontal e vertical da partícula são dadas por:

$$a_x = \frac{\omega^2 H}{2} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \text{ (aceleração horizontal)}$$

$$a_y = -\frac{\omega^2 H}{2} \frac{\sinh ks}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \text{ (aceleração vertical)}$$

Onde:

s = distância do fundo do mar até a altura em que se deseja calcular as velocidades e as acelerações.

x = distância entre ponto considerado como início da onda e o ponto onde deseja-se os valores de acelerações e velocidade.

H = altura total da onda, crista até o cavado.

## 2.4 Vento

Segundo a norma da API RP-2A-WSD, para condições de ventos fortes a velocidade de vento de projeto  $u(z,t)$  em (ft/s) e a altura  $z$  acima do nível do mar para um período médio  $t$ (s) (onde  $t \leq t_0$ ;  $t_0 = 3600$  s) é dada por:

$$u(z,t) = U(z) \times [1 - 0.41 \times I_u(z) \times \ln(\frac{t}{t_0})]$$

Onde a velocidade média do vento em 1 hora  $U(z)$  (ft/s) na altura  $z$  é dada por:

$$U(z) = U_0 \times [1 + C \times \ln(\frac{z}{32.8})]$$

$$C = 5.37 \times 10^{-2} \times (1 + 0.0457 \times U_0)^{1/2}$$

E onde a intensidade de turbulência na altura  $z$  é dada por:

$$I_u(z) = 0.06 \times [1 + 0.0131 \times U_o] \times \left(\frac{z}{32.8}\right)^{-0.22}$$

Onde  $U_o(z)$  (ft/s) é a velocidade média do vento em 1 hora a altura de 32.8 ft.

Para estruturas com resposta dinâmica desprezível para ventos, o vento constante “uma-hora” é apropriado para força estática total de vento na superestrutura associada à força máxima de ondas.

A força de arrasto do vento deve ser calculada por:

$$F_v = (\rho / 2) u^2 C_s A$$

Onde:

$F_v$  = força do vento,

$\rho$  = densidade de massa do ar, (slug/ft<sup>3</sup>, 0.0023668 slugs/ft<sup>3</sup> para temperatura e pressão padrão).

$u$  = velocidade do vento (ft/s)

$C_s$  = coeficiente de forma,

$A$  = área do objeto (ft<sup>2</sup>).

Valores dos coeficientes de forma:

Vigas.....	1.5
Lados de construções.....	1.5
Cilindros.....	0.5
Área projetada global de plataforma.....	1.0

Os dados tabelados para a Bacia de Campos são medidos a altura de 10 m (32.8 ft) e para um tempo de 10 min, sendo necessário fazer a correção do tempo para uma hora. Na tabela 4 abaixo são apresentadas velocidades de ventos para um período de retorno de 100 anos.

Tabela 4 - Velocidade de vento para um período de retorno de 100 anos

Direção	Velocidade (m/s)
Norte	28.54
Nordeste	29.11
Leste	25.57
Sudeste	28.05
Sul	31.24
Sudoeste	31.58
Oeste	31.88
Noroeste	25.00

## 2.5. Empuxo vertical exercido pela água do mar sobre os elementos

O empuxo é caracterizado como o esforço exercido por um líquido sobre uma superfície. O empuxo é dado pela seguinte fórmula:

$$E = w.V$$

Onde:

E = força de empuxo

w = densidade da água

V = volume deslocado pelo elemento

## 2.6. Cargas Permanentes

As cargas permanentes devido ao alojamento, ao heliponto e aos conveses, entre outras foram atribuídas a partir de trabalhos já existentes. As cargas de peso próprio da jaqueta serão geradas automaticamente pelo programa ANSYS.

O helicóptero considerado foi o Superpuma, que atualmente é o maior em operação na Bacia de Campos, e apresenta as seguintes características (figura 15):

Peso Máximo = 9350Kgf

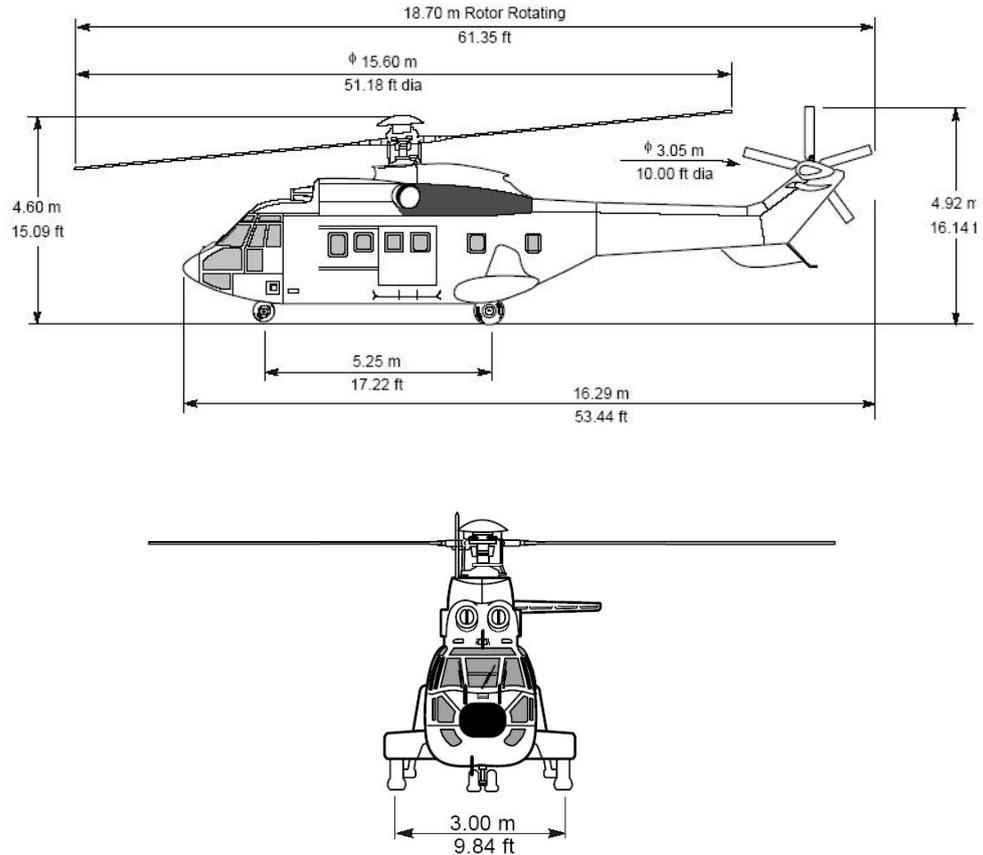


Figura 15 - Características da aeronave

### 3. Análise estrutural

Nesta etapa a estrutura foi analisada utilizando o programa anteriormente citado, realizando-se quatro combinações para as cargas no convés e combinações das cargas variáveis.

Tais combinações consistiram em variar a disposição do alojamento, heliponto, oficina e guindaste sobre o convés, de forma que estas cargas quando associados às cargas de vento, onda e correnteza nas principais direções (sudeste e sudoeste), resultassem em uma combinação que levasse a melhor distribuição dos esforços na estrutura, foi possível combinar as cargas do convés mudando o arranjo destas para definir elementos mais delgados e com isso uma redução de peso próprio e custo. No intuito de manter a estrutura simétrica e com uma distribuição mais próxima da uniforme, adotou-se para as seções, as mesmas dimensões que satisfizeram as condições das seções mais críticas.

O posicionamento da jaqueta em relação às ondas foi escolhido arbitrariamente, porém visando a incidência da onda maior (sudoeste) na direção de maior rigidez da estrutura.

O dimensionamento dos elementos foi realizado conforme a NB14/1986, sendo escolhido para cada grupo de elementos mais solicitado. A figura 16 ilustra as quatro combinações analisadas para a disposição dos módulos no convés.

Ressaltando que a análise do efeito das cargas sobre a estrutura do convés não é escopo deste trabalho, foram realizadas análises para se determinar a carga transmitida pelo convés ao topo da jaqueta.

Desta forma foi utilizada nos cálculos a primeira combinação de cada direção.

Em uma segunda etapa realizou-se a análise da estrutura da jaqueta submetida às cargas já mencionadas. Os coeficientes de majoração das cargas utilizados foram 1.5 para as cargas variáveis e 1.3 para o peso próprio.

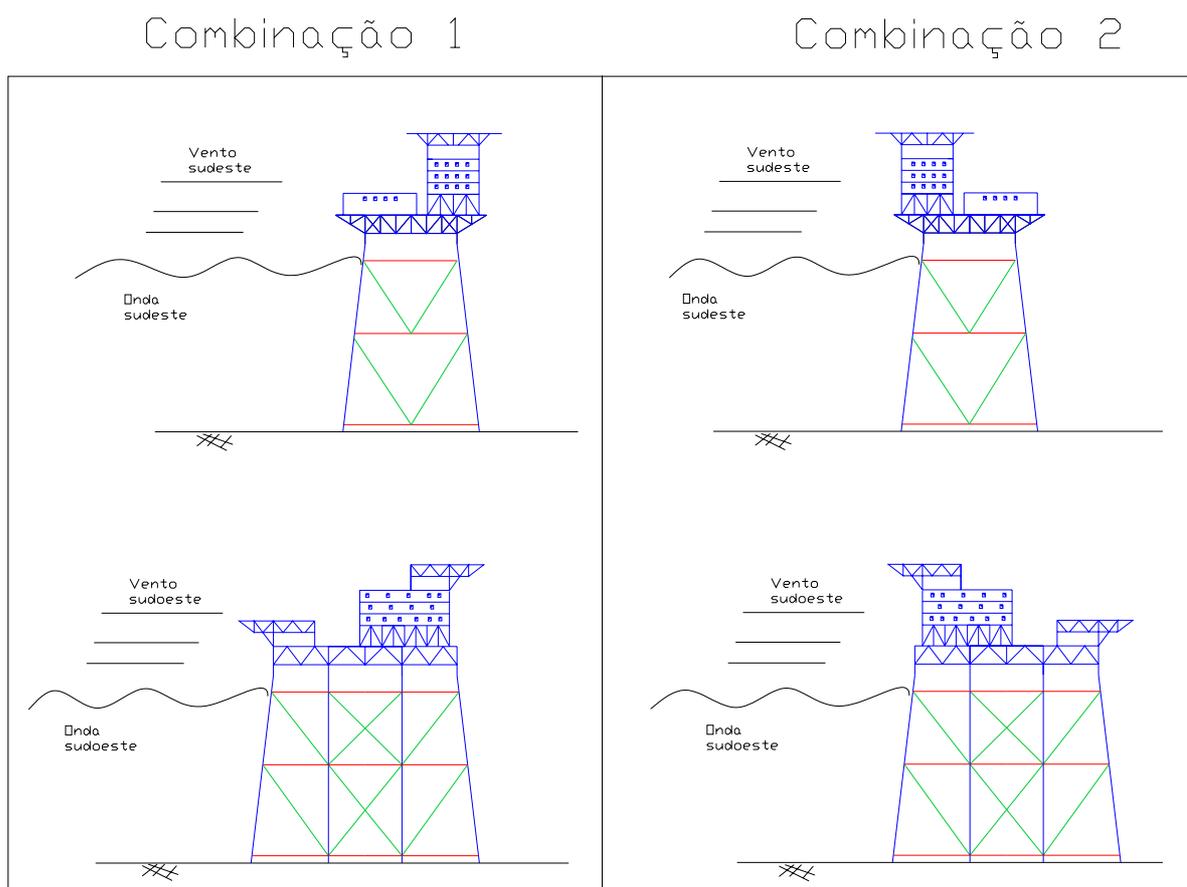


Figura 16 - Combinações analisadas

### 3.1 Resumo das cargas de onda e vento

A tabela 5 apresenta o resumo das cargas devido à onda e vento incidente na plataforma, sem coeficiente de majoração. Os pontos de aplicação das cargas são ilustrados pela figura 17. Para maior esclarecimento dos resultados, consultar o apêndice do presente trabalho.

Tabela 5 - Resumo das cargas variáveis

Onda Sudoeste (KN/m)						
FH040	FH2040	FH4040	FH6040	FH015	FH2015	FH4015
6.442	6.063	4.728	2.955	4.803	4.542	3.567
FH6015	FV0	FV60	FV20	FV40	FI040	FI015
2.262	13.891	7.079	13.273	10.651	6.022	5.155
FI2040	FI2015	FI4040	FI4015	FI6040	FI6015	Fh5
5.646	4.845	4.410	3.575	2.780	2.280	7.619
Fh6	Fh7	Fh8	Fh9	Fh10	Fh11	Fh12
7.391	6.849	6.051	5.076	4.016	5.656	5.499
Fh13	Fh14	Fh15	Fh16	FI1027	FI3027	FI5027
5.323	4720	3.819	3.043	7.254	6.544	4.607
		FI107	FI307	FI507		
		6.046	5.839	3.702		
Onda direção Sudeste(KN/m)						
Fv0	Fv31	Fh040	Fh3140	Fh015	Fh3115	Fi040
11.196	8.683	5.108	3.067	2.415	1.586	4.099
Fi015	Fi3140	Fi3115	Fh1	Fh2	Fh3	Fh4
2.794	2.521	1.8	9.556	7.426	4.655	3.765
Fi727	Fi3127	Fi77	Fi317			
4.689	3.683	2.844	2.303			
Carga devido ao vento (Pa)			Sudeste		Sudoeste	
Convés			518.125		659.308	
Suporte alojamento			567.128		724.977	
Heliponto			573.246		725.616	
Alojamento			608.431		779.99	

F = força

V = elementos na vertical

H = horizontal

I = inclinado

h = horizontal para elementos de travamento

Ex. FH040, força horizontal na posição zero para a elevação -40.

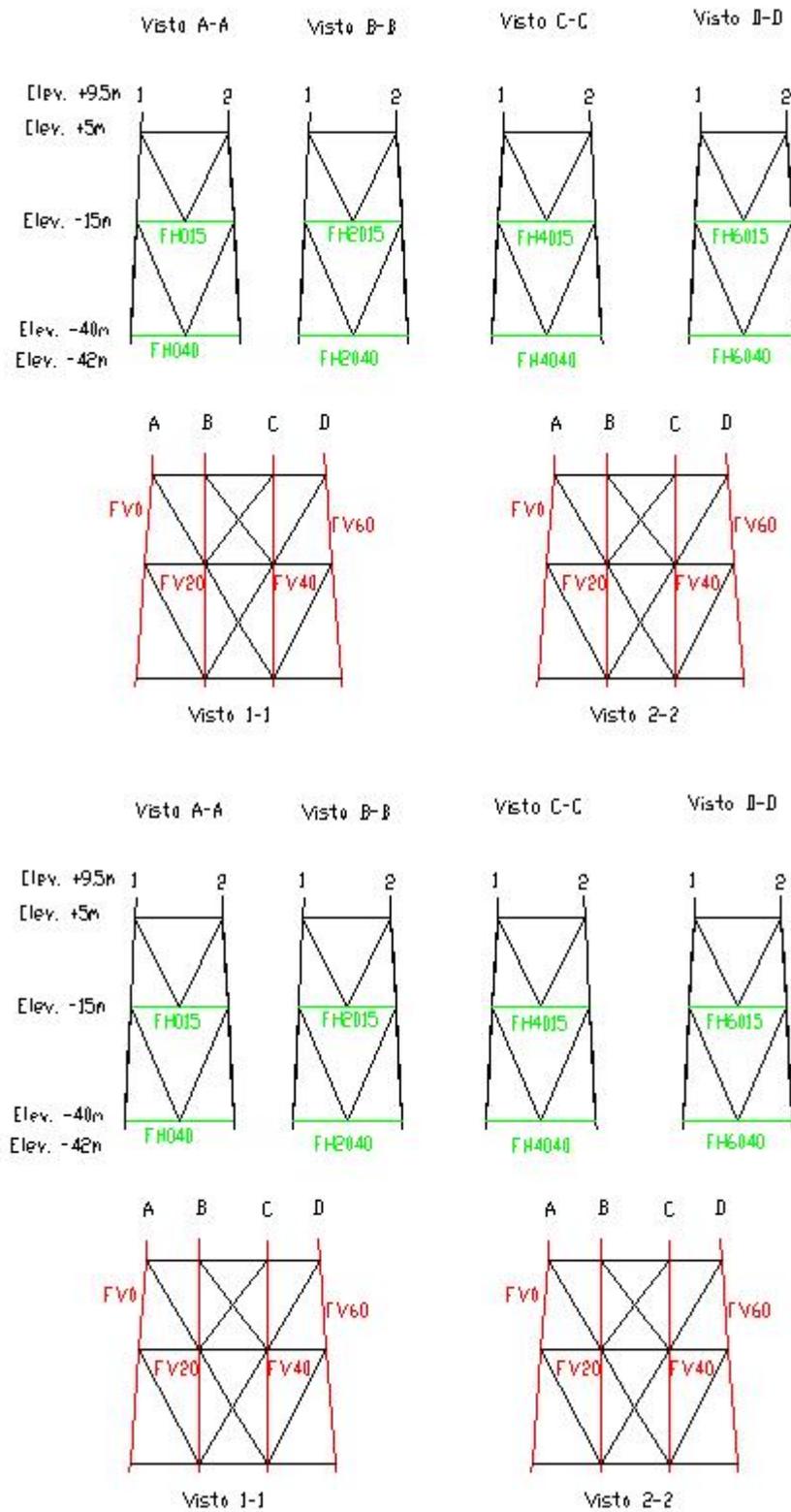


Figura 1 - Pontos de aplicação das cargas de onda

### 3.2 Determinação das forças de reação do convés

Para a modelagem do convés, foram utilizados três tipos de elementos disponíveis no ANSYS, beam, para a representação das vigas, link, para a representação dos elementos treliçados e shell para a representação das paredes

do alojamento e oficina e para o piso do convés. O heliponto, os equipamentos e guindaste, não foram representados graficamente, mas as cargas atribuídas pelas suas massas foram consideradas em forma de carregamento.

A figura 18 ilustra a seguir o mapa de carregamento utilizado para a modelagem do convés.

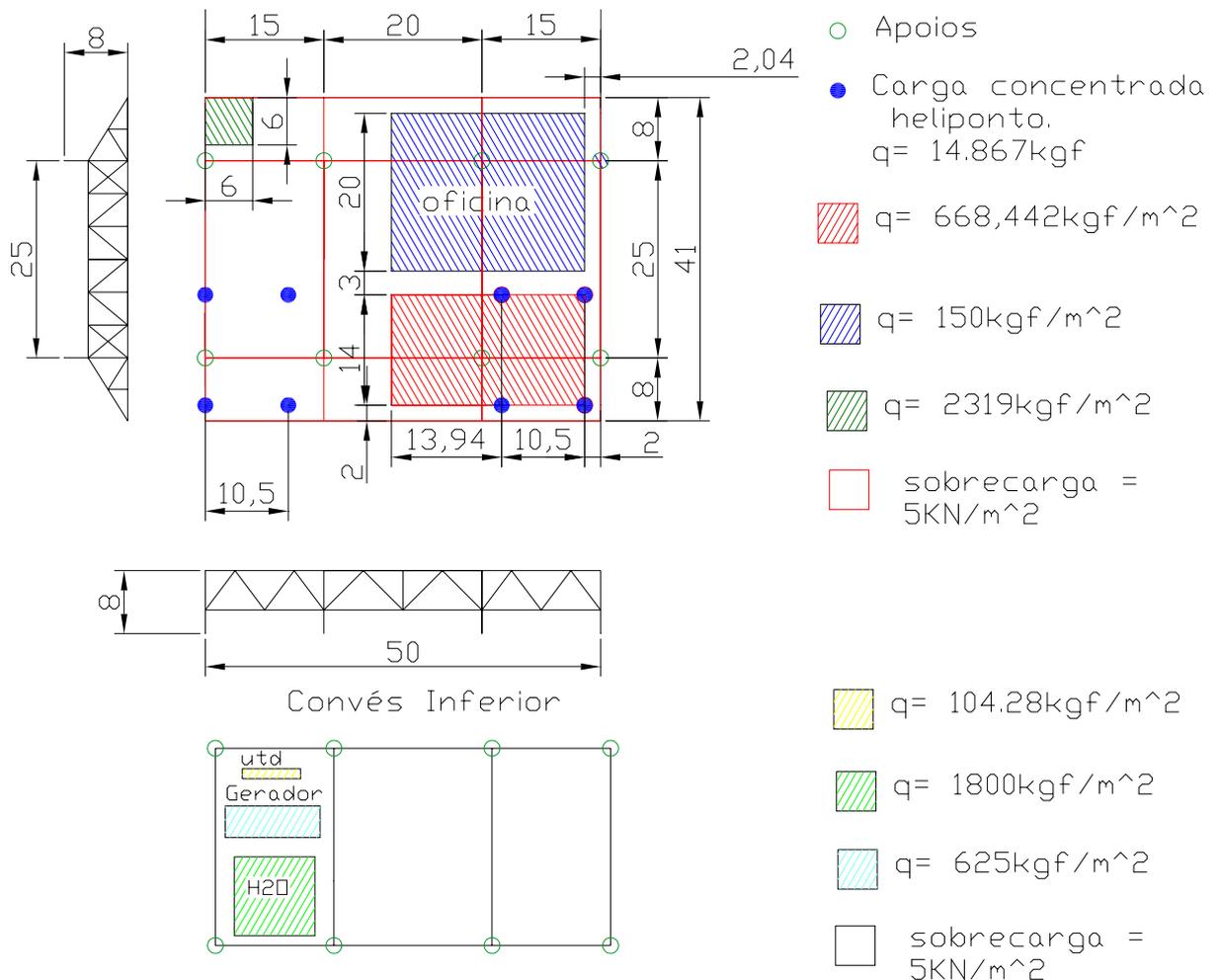


Figura 18 - Mapa de carregamento do convés

Para carga de vento, foi considerada como área vélica as áreas da oficina, alojamento e da treliça do convés. O efeito em decorrência do vento sobre a estrutura do heliponto foi desconsiderado, pois se trata de uma estrutura delgada e seria demasiadamente conservador considerar como uma área fechada (uma parede).

Devido à magnitude das forças (peso) envolvidas, não se apresenta a necessidade de avaliar efeito de sucção do vento no convés, já que necessitaria de uma força gigantesca para levantar tal estrutura.

A figura 19 apresenta o modelo utilizado para a determinação das reações do convés. Estas reações serão utilizadas para aplicação no topo da jaqueta para uma aproximação dos esforços nos elementos da jaqueta.

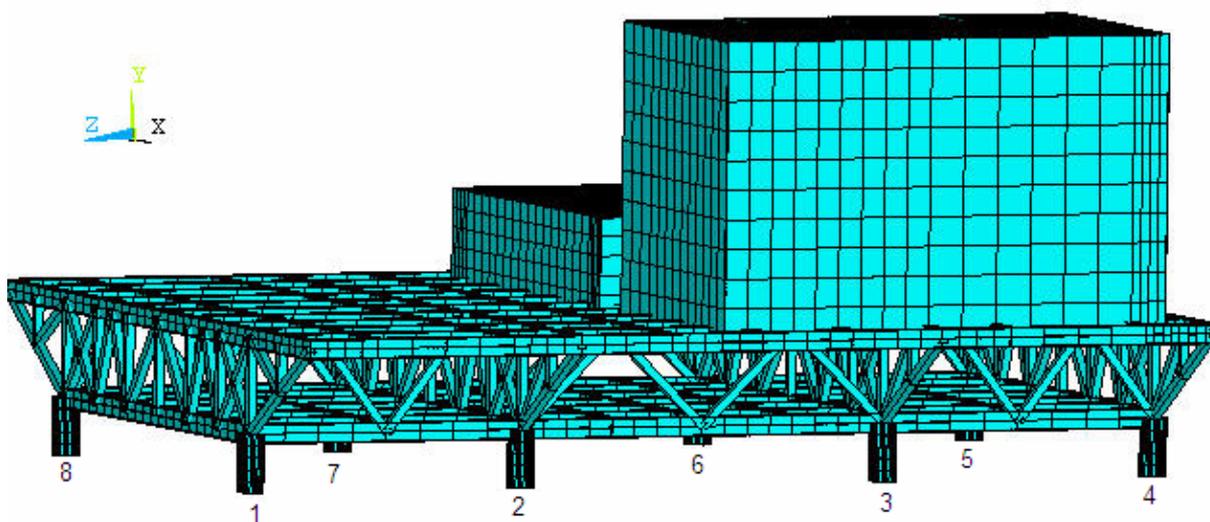


Figura 19 - Modelo do convés em elementos finitos

A tabela 7 apresenta o resultado das reações da análise do convés submetido ao vento sudeste incidindo na direção  $-x$ , os quais foram utilizados em análises posteriores.

Tabela 6 -Reações de apoio do convés

NOS	FX (kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
1	-78,1	-1993,9	187,11	-357,93	-15,25	-122,33
2	-198,93	-3356,8	820,47	-231,91	-8,33	-352,06
3	-206,26	-5244,8	-64,676	111,38	64,24	-359,38
4	-85,79	-1702,7	-144,00	310,59	19,36	-171,95
5	21,01.	-1088,2	-99,925	210,09	-9,11	5,10
6	187,66	-3666,6	-78,046	130,52	-3,12	316,82
7	163,70	-3926,5	19,366	-24,509.	1,35	253,97
8	-7,11	-2115,7	98,675	-174,32	23,84	-81,77

Observação: Os valores positivos dos momentos são considerados no sentido anti-horário

### 3.3 Análise estrutural da jaqueta

Na modelagem da jaqueta, para os elementos das pernas e vigas foi utilizado um elemento com 6 graus de liberdade, que apresenta um comportamento como o de um elemento usado para o cálculo de pórticos (beam). Para os travamentos da estrutura, tanto os membros inclinados em relação ao eixo y, como os elementos de travamento inclinados contidos no plano xz, utilizou-se um elemento com três graus de liberdade, o qual representa elemento de treliça (link). A figura 20, mostra a estrutura e os elementos utilizados.

Figura 20 - Elementos utilizados

As características dos perfis usados tanto na modelagem como na verificação são listadas na tabela 7.

Tabela 7 - Classificação dos perfis

Elemento	Diâmetro $\phi$	Espessura t	$\phi/t$	Seção
Pernas	54" $\approx$ 137,16 cm	1,75" $\approx$ 44,45 mm	30	Classe 1
Vigas	30" $\approx$ 76,2 cm	0,625" $\approx$ 15,875 mm	48	Classe 1
Contraventamentos verticais	30" $\approx$ 76,2 cm	0,625" $\approx$ 15,875 mm	48	Classe 1
Contraventamentos horizontais	30" $\approx$ 76,2 cm	0,5" $\approx$ 12,7 mm	60	Classe 3

### 3.3.1 Peso Próprio

O peso próprio da estrutura foi determinado pelo programa. O resultado obtido sem majoração é apresentado a seguir:

<b>Peso próprio total:</b>	<b>11795.2KN</b>	Densidade:	7850 kfg/m <sup>3</sup>
----------------------------	------------------	------------	-------------------------

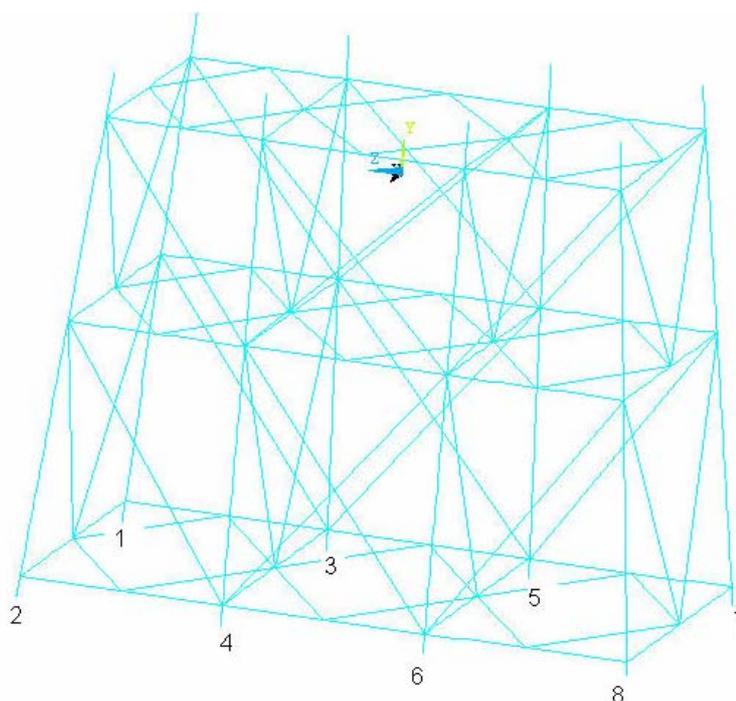
### 3.3.2 Reações de apoio

A tabela 8 abaixo mostra os resultados obtidos pela reação de apoio para os dois casos, onda sudeste e onda sudoeste.

Tabela 8 - Reações de apoio da jaqueta para as direções sudeste e sudoeste

Reações de apoio - Direção Sudoeste						
Apoios	FX (kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
1	340.78	4849.00	-1077.30	-1944.50	73.40	110.95
2	-338.33	4784.00	-1081.90	-2009.40	-75.07	-90.22
3	437.92	6555.80	-2907.10	-6433.30	846.85	123.36
4	-434.19	6470.10	-2971.50	-6603.10	-856.55	-117.89
5	278.64	3841.10	-2991.90	-6384.60	382.92	31.23
6	-289.25	4694.90	-3043.30	-6484.00	-391.05	-176.96
7	20.14	-14.82	-892.84	-2963.80	676.91	35.50
8	-15.71	399.30	-858.41	-2978.60	-668.04	-101.29

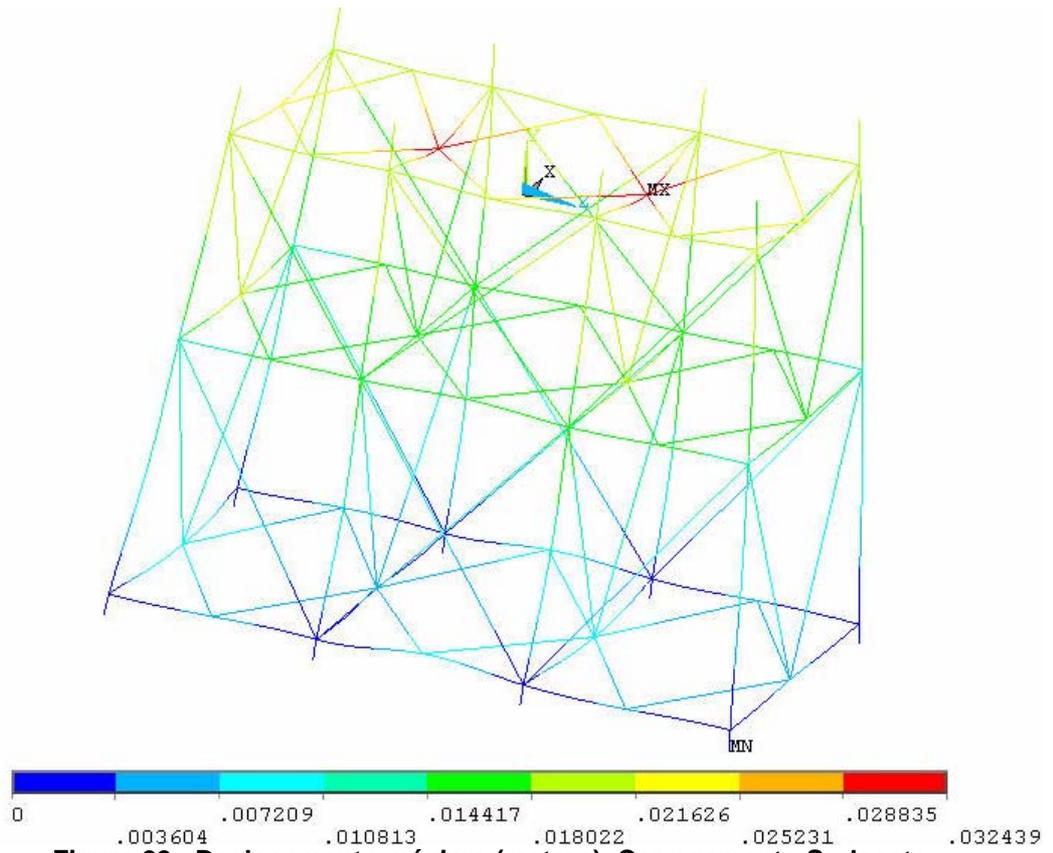
Reações de apoio - Direção Sudeste						
Apoios	FX (kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
1	-1421.00	1491.10	-163.18	0.83	748.49	4601.70
2	-1615.80	4142.50	-472.31	-155.64	267.48	3813.90
3	-1575.80	3617.80	-148.88	-470.23	-131.46	5136.90
4	-1960.10	6579.60	-183.00	-558.27	128.46	4135.40
5	-1537.60	3505.60	25.15	224.93	137.14	5013.10
6	-1961.20	7281.70	119.30	428.30	-147.12	3900.50
7	-1401.90	845.10	85.44	-38.37	-730.58	4382.20
8	-1530.90	3781.70	431.62	131.93	-256.20	3670.50



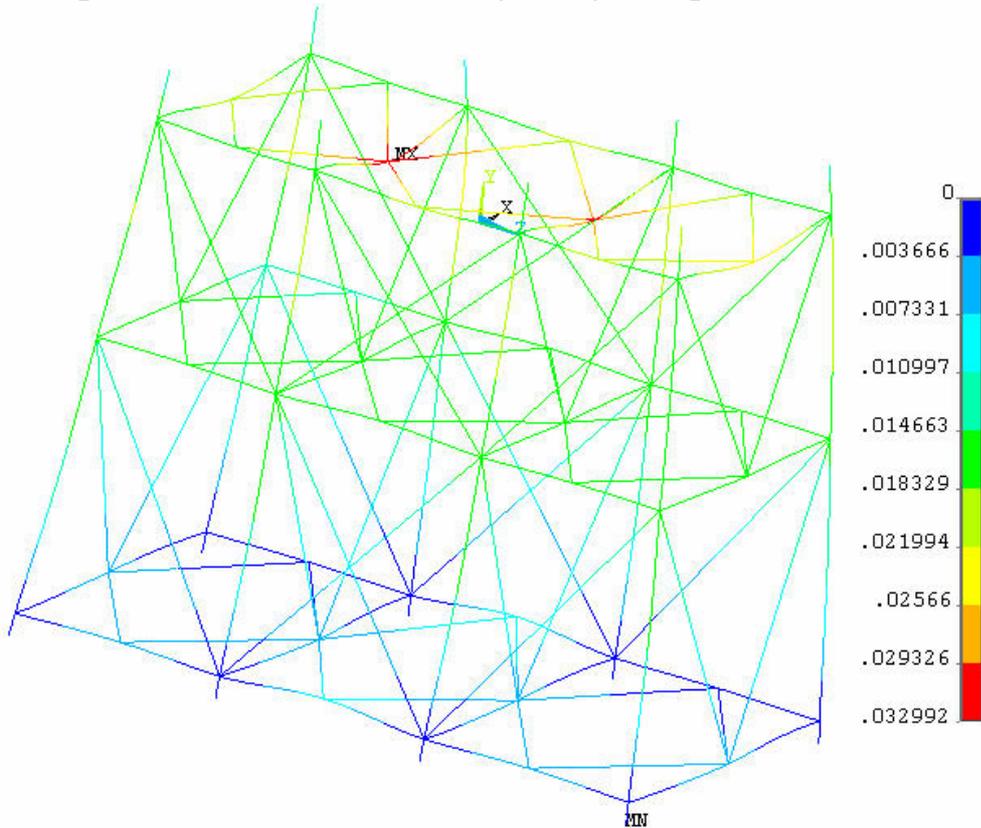
**Figura 21 – Apoios**

### 3.3.3 Deslocamento dos elementos

Os deslocamento obtidos na estrutura através das análises estão contidos em uma faixa entre 3 e 5 cm. As figuras 22 e 23, ilustram dos deslocamentos máximos na estrutura ocorridos próximos a região de maior força transmitida pelo convés.



**Figura 22 - Deslocamento máximo (metros). Carregamento Sudoeste.**



**Figura 23 - Deslocamento máximo (metros). Carregamento Sudeste**

### 3.3.4 Verificação dos elementos

Conforme as seções definidas anteriormente, estas foram verificadas quanto aos esforços aos quais foram submetidas e cumprindo os valores de resistência exigidos pela norma. Porém houve uma sobra de resistência excessiva. Desta forma, realizou-se um novo cálculo para a determinação de uma nova seção que satisfizesse as condições, tentando aproveitar melhor as propriedades da seção.

A partir da análise computacional do modelo, determinou-se qual direção de onda incidente, combinada com as outras cargas, levariam os elementos da jaqueta a maior solicitação. Os resultados indicaram que as ondas causariam solicitações diferentes para cada elemento. Devido a este fato, foi determinada, para cada elemento, qual onda resultaria as maiores solicitações. Então através dos diagramas de esforços normais, cisalhantes e momentos fletores, prosseguiu-se com a verificação dos perfis adotados no início deste trabalho em relação aos esforços. A tabela 9 ilustra os perfis utilizados para a primeira verificação, a relação esforço por resistência da seção e os perfis adotados após uma re-análise das seções..

Tabela 9 - Resumo das resistências e solicitações das seções

Elementos	Seções Iniciais			Seções finais		
	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Esforço /Resistência	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Esforço /Resistência
1	762	15.9	0.18	273	9.3	0.87
2	762	15.9	0.786	762	12.7	0.972
3	762	12.7	0.205	273	7.8	0.947
4	762	12.7	0.293	508	9.52	0.855
5	762	15.9	0.2	273	9.3	0.968
6	762	15.9	0.35	762	7.92	0.708
7	762	12.7	0.159	219.1	7.9	0.908
8	762	12.7	0.213	508	6.35	0.916
9	762	15.9	0.282	457	12.7	0.972
10	762	15.9	0.137	457	12.7	0.952
11	1371.6	44.45	0.216	762	16	0.954

É notório que para a primeira análise as dimensões arbitradas satisfazem perfeitamente a norma, porém nota-se uma faixa de resistência muito grande que não será utilizada (75% a 87% em alguns casos), ou seja, há desperdício do material utilizado. Para uma segunda verificação, admitiu-se perfis tubulares de seções variadas. Após as verificações, a porcentagem de utilização da resistência dos elementos, (tabela 9), passou a ser próximo a 90%.

Destacando que para os contraventamentos, estes devem ser dimensionados para as solicitações de compressão, que geralmente atribuem seções mais robustas, pois existirá uma onda na direção contrária, de intensidade menor, porém poderá gerar esforços inversos aos que foram determinados neste trabalho.

Para maiores detalhes sobre a verificação dos elementos, recorrer ao apêndice. A figura 24 mostra um resumo das seções escolhidas ao final dimensionamento. É necessário ressaltar, que os perfis utilizados para os cálculos são perfis comerciais.

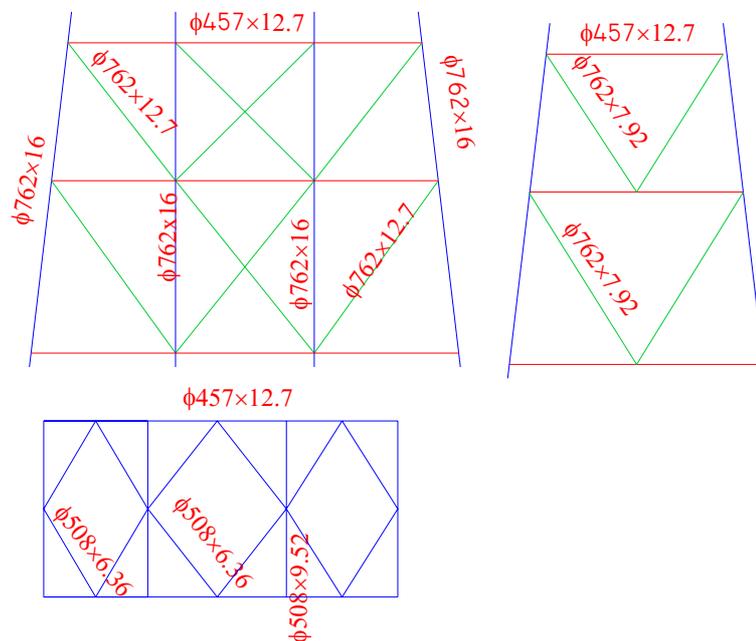


Figura 24- Resumo das seções determinadas (unidades em mm)

## **CONCLUSÕES**

O dimensionamento de uma estrutura offshore envolve inúmeras variáveis. De forma que são necessárias simplificações, utilizando critérios, para tornar possível a execução de um dimensionamento. Há uma grande deficiência em literaturas nacionais nesta área, sendo então necessário recorrer a estruturas já existentes para estabelecer pontos de partidas.

Torna-se imprescindível à utilização de um software para a análise deste tipo de estrutura, de forma otimizar o tempo para as análises e verificações.

Tendo em vista o que foi descrito anteriormente, pode-se afirmar que os critérios escolhidos satisfazem para o dimensionamento da jaqueta, cabendo ainda uma nova aferição utilizando o modelo computacional.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Antônio, B.F.C. Pinheiro – *Estruturas metálicas, cálculos, detalhes, exercícios e projetos*, São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 2001;
- [2] Hibbeler, R.C. – *Resistência dos materiais*, Rio de Janeiro, Ed. Livros técnicos e científicos, 2000;
- [3] Walter, Pfeil; Michele Pfeil – *Estruturas de aço, dimensionamento prático*, Rio de Janeiro, Ed. Livros técnicos e científicos, 2000;
- [4](API-RP2A-WSD) - Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms - *Working Stress Design*, API recommended practice 2a-wsd, 2000;
- [5] Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios – *NB-14*, Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- [6] Nelson A.F. Matos - *Predição de séries temporais para análise dinâmica de estruturas offshore*, Rio de Janeiro, Mestrado COPPE/UFRJ, 2005;
- [7] Roberto Taier; Ernani C. Araújo; Leonardo B. Godefroid - *Fadiga em plataformas offshore fixas com modelos em elementos finitos*, Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 55(3): jul. set. 2002;
- [8] Alexandre L.S. Pinho - *Redução de tensões em risers rígidos de plataformas TLP*, Rio de Janeiro, Mestrado COPPE/UFRJ, 2001;
- [9] Análise estática da jaqueta Garoupa - *Memórias de Cálculo e Relatórios*, Rio de Janeiro, Petrobrás;
- [10] Chakrabarti, S.K., *Hydrodynamics of Offshore Structure*, Computational Mechanics Publications, London, 1987.
- [11] Estefen, F. Segen, *Critérios de projeto estrutural de sistemas oceânicos*, Programa de Engenharia Oceânica – COPPE/UFRJ.
- [12] Santos, A.F., *Estruturas Metálicas – Projeto e detalhes para fabricação*, São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1977.

# ANEXOS

## A.1- Determinação das cargas no convés

Considerando que a plataforma devera operar com uma tripulação de 60 pessoas e o volume diário de consumo de água por pessoa são 200 l, o volume de água para 15 dias será:

$$\text{Vol} := 15\text{day} \cdot 200 \frac{\text{L}}{\text{day}} \cdot 60$$

$$\text{Vol} = 180\text{m}^3$$

### A.1.1 - Peso proprio do módulo de alojamento:

$$\text{Para o 1}^\circ \text{ pavimento (P1) - } P1 := 171 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \quad A := 360\text{m}^2$$

$$P1 := P1 \cdot A$$

$$P1 = 6.156 \times 10^4 \text{kgf}$$

$$\text{Para o 2}^\circ \text{ e 3}^\circ \text{ pavimento (P2 e P3) - } P2 := 175 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$P2 := P2 \cdot A$$

$$P2 = 6.3 \times 10^4 \text{kgf} \quad P3 := P2$$

$$\text{Para o 4}^\circ \text{ pavimento (P4) - } P4 := 144 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$P4 := P4 \cdot A$$

$$P4 = 5.184 \times 10^4 \text{kgf}$$

$$\text{Para o heliponto (Ph) } Ph := 45444\text{kgf}$$

Adicionando ao peso proprio da estrutura do alojamento, as cargas oriundas das instalações, revestimento e utensílios para os quatro pavimentos tem-se que:

$$Pi := (48620 + 43076 + 34310)\text{kgf}$$

$$Pi = 1.26 \times 10^5 \text{kgf}$$

$$\text{Palojtotal} := P1 + P2 + P3 + P4 + Ph + Pi$$

$$\text{Palojtotal} = 4.029 \times 10^3 \text{KN}$$

### A.1.2 - Peso da estrutura de suporte do alojamento:

$$\text{Psup} := 7712\text{KN}$$

### A.1.3 - Peso próprio do convés:

$$\text{Pconves} := 11297\text{KN}$$

A1.4 - Sobrecarga no convés:

$$S_{cconv} := 5 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \quad A_{convsuperior} := 2050\text{m}^2 \quad A_{convinferior} := 1375\text{m}^2$$

$$S_{cconv} := 5 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \cdot (2050\text{m}^2 + 1375\text{m}^2)$$

$$S_{cconv} = 1.712 \times 10^4 \text{KN}$$

A.1.5 - Peso da oficina:

$$P_{of} := 150 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \quad A_{of} := 490\text{m}^2$$

$$P_{of} := P_{of} \cdot A_{of} \quad P_{of} = 720.789 \text{KN}$$

A.1.6 - Peso Gerador de energia

$$P_{ger} := 30000 \text{kgf}$$

$$\text{Lado1} := 12\text{m} \quad \text{Lado2} := 4\text{m}$$

$$\text{Area} := \text{Lado1} \cdot \text{Lado2} \quad \Rightarrow \quad \text{Area} = 48\text{m}^2$$

A.1.7 - Peso unidade de tratamento de dejetos:

$$P_{utd} := 953 \text{kgf}$$

Dimensões da unidade de tratamento de dejetos: 1,24x7,37x1,27 m.

A.1.8 - Peso Guindaste:

$$P_{guin} := 83500 \text{kgf}$$

A.1.9 - Cálculo do esforço transmitido pelo helicoptero:

Considerando que o maior helicoptero que opera na Bacia de Campos, o Superpu - ma e, que pode haver a possibilidade de duas aeronaves pousadas na plataforma, tem-se que o esforço devido a este fato será:

$$\text{Peso da aeronave: } \Rightarrow \quad P_{aero} := 9350 \text{kgf}$$

Segundo a norma API RP 2I, para a análise estática de uma estrutura destinada a pouso de helicopteros deve-se considerar um coeficiente de impacto de 1.5. Ainda, este coeficiente estará associado apenas ao peso de uma aeronave, pois não haverá pousos simultâneos. Logo a carga total devida as duas aeronaves será de:

$$P_{totalaero} := (P_{aero} \cdot 1.5) + P_{aero}$$

$$P_{totalaero} = 2.337 \times 10^4 \text{kgf}$$

## A.2 - Cálculo da força devido a onda sudeste

### A.2.1 - Determinação do Tempo aparente de onda

Para a direção Sudeste

$$d := 40\text{m} + 2\text{m} \quad T_p := 11.63\text{s} \quad V_i := 1.32 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\frac{d}{g \cdot T_p^2} = 0.032 \quad H_s := 6.53\text{m}$$

$$\frac{V_i}{g \cdot T_p} = 0.012 \quad T_{app} := T_p \cdot 1.083 \quad T_{app} = 12.595\text{s}$$

### A.2.2 - Cálculo das velocidades e acelerações pela teoria de Airy e força pela teoria de Morison

Para a onda Sudeste obtém-se:

$$T_{app} := 12.595\text{s} \quad C_d := 1.05 \quad C_m := 1.2 \quad \rho := 1026 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

$$L := \frac{(g \cdot T_{app}^2)}{2\pi} \quad L = 247.592\text{m} \quad H_s := 6.53\text{m} \quad k := 2 \frac{\pi}{L} \quad x := 0\text{m}$$

$$w := \sqrt{g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot d)} \quad w = 0.443\text{Hz} \quad y(t) := d + H_s \cdot \cos(w \cdot t) \quad H := 2H_s$$

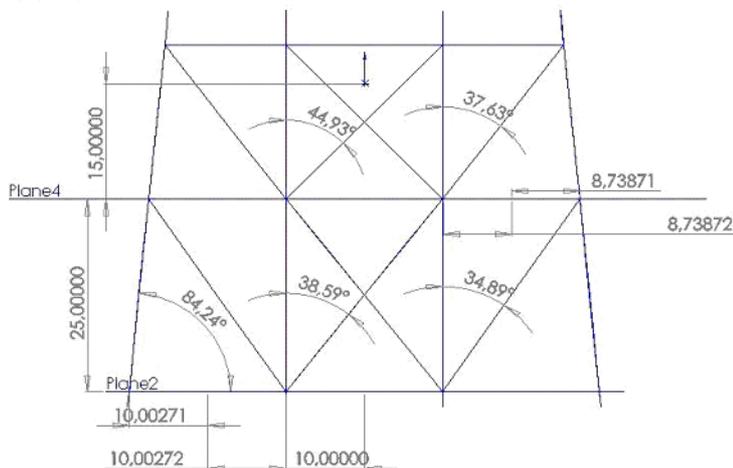
Será calculada as força de arrasto e de inércia para o período de tempo t variando de 0.595 até 12.595 segundos

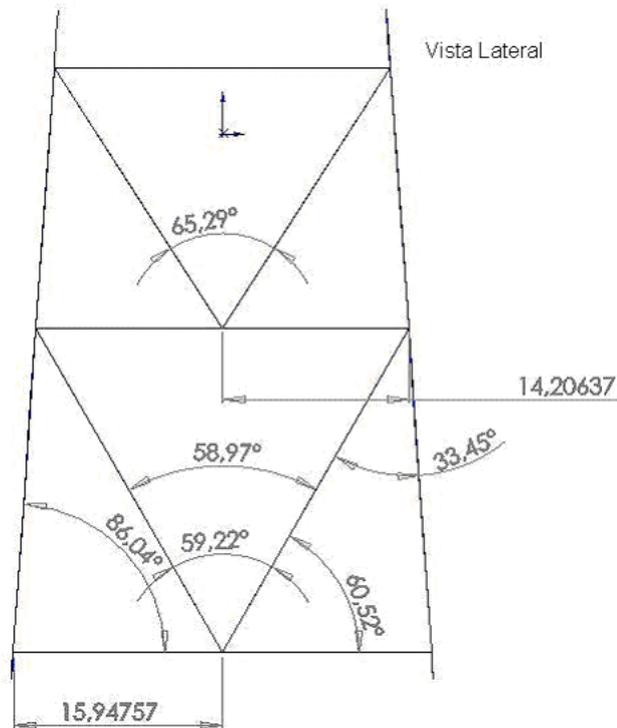
$$t := 0.595\text{s} .. T_{app} \quad y(t) := d + H_s \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$a_x(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

Vista frontal





A.2.2.1 - Para elementos verticais:

$$A := 1.372\text{m} \quad V := \frac{\pi A^2}{4}$$

Obtem-se para o periodo já mencionado as forças relacionadas na tabela abaixo:

$$F = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) =$$

11.169	$\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$
4.941	
-0.99	
-2.954	
-4.275	
-6.711	
-7.998	
-6.847	
-3.407	
0.723	
2.945	
4.71	
9.196	

Conforme pode ser visto a força maior é exercida quando a onda esta na altura máxima, sendo sua força totalmente inercial e de valor igual a 11.169kN/m.

Desta forma pode-se decompor a força em suas componentes vertical e horizontal para ser aplicada ao elemento. Esta etapa será feita mais adiante.

Para determinar a força sobre os outros elementos que estão na mesma direção, varia-se a distancia x, que corresponde a distancia horizontal entre o primeiro elemento a receber contato com a onda e o elemento no qual se deseja calcular ação da onda.

A.2.2.2 - Para elementos verticais distantes a 31.895 m:

$$t := 0s \quad x := 31.895m \quad A := 1.372m \quad V := \frac{\pi A^2}{4} \quad y(t) := d + Hs \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$F = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 8.662 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Decomposição da força de onda atuando sobre os elementos:

Conforme as vistas apresentadas anteriormente obtem-se os ângulos de inclinação dos elementos.

Para as pernas centrais obtem-se a seguinte força atuante:

$$Fv0 := \frac{11.169 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(3.96\text{deg})} \quad Fv0 = 11.196 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1} \quad x = 0$$

$$Fv31 := \frac{8.662 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(3.96\text{deg})} \quad Fv31 = 8.683 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1} \quad x = 31.895\text{m}$$

A2.2.3 - Para os membros horizontais na elevação -40m e x = 0:

$$y(t) := 40m \quad x := 0m \quad A := 0.762m \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4}$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh040 = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 5.108 \frac{1}{m} \text{ kN}$$

$$Fh040 := 5.108 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.2.2.4- Para os membros horizontais na elevação -40m e x = 31.895m:

$$y(t) := 40m \quad x := 31.895m \quad A := 0.762m \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4}$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh3140 = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 3.067 \frac{1}{m} \text{ kN}$$

$$Fh3140 := 3.067 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.2.2.5 - Para os membros horizontais na elevação -15 m e  $x = 0\text{m}$ :

$$x := 0\text{m} \quad y(t) := 15\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4}$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh_{015} = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 2.415 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$Fh_{015} := 2.415 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.2.2.6 - Para os membros horizontais na elevação -15m e  $x = 31.895$ :

$$y(t) := 15\text{m} \quad x := 31.895\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4}$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh_{3115} = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 1.586 \frac{1}{\text{m}} \text{ kN}$$

$$Fh_{3115} := 1.586 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

**Para os elementos inclinados que estão contidos no mesmo plano frontal das pernas, será adotado como simplificação para o cálculo, a profundidade (y) como sendo o ponto médio do elemento.**

A.2.2.7 - Para os membros inclinados entre a elevação -40 e -15 m e  $x = 0$ :

$$x := 0\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4} \quad y(t) := 27.5\text{m} + Hs \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fi040 \cdot \cos(3.96\text{deg}) = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 4.089 \frac{1}{m} \text{ kN}$$

$$Fi040 := \frac{4.089 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(3.96\text{deg})} \quad Fi040 = 4.099 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.2.2.8 - Para os membros inclinados entre a elevação -15 e 0 m e x = 0:

$$x := 0\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4} \quad y(t) := 15\text{m} + Hs \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fi015 \cdot \cos(3.96\text{deg}) = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 2.787 \frac{1}{m} \text{ kN}$$

$$Fi015 := \frac{2.787 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(3.96\text{deg})} \quad Fi015 = 2.794 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.2.2.9 - Para os membros inclinados entre a elevação -40 e -15 m e x = 31,895 m:

$$x := 31.895\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4} \quad y(t) := 27.5\text{m} + Hs \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fi3140 \cdot \cos(3.96\text{deg}) = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 2.515 \frac{1}{m} \text{ kN}$$

$$Fi3140 := \frac{2.515 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(3.96\text{deg})} \quad Fi3140 = 2.521 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.2.2.10 - Para os membros inclinados entre a elevação -15 e 0 m e x = 31.895m:

$$x := 31.895\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4} \quad y(t) := 15\text{m} + Hs \cdot \cos(w \cdot t)$$

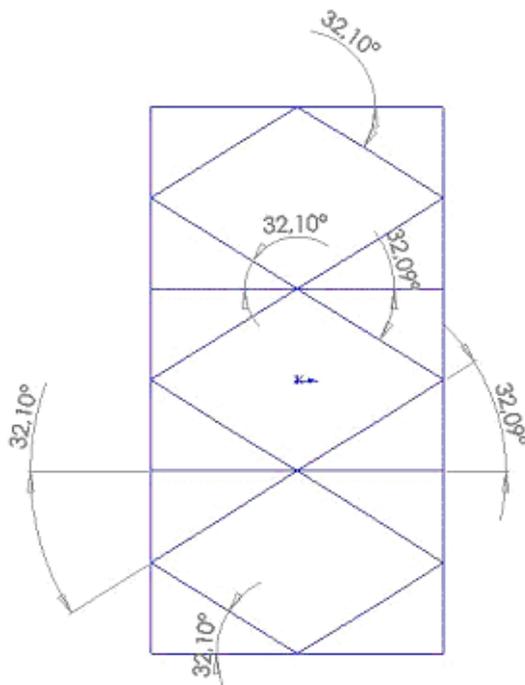
$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fi3115 \cdot \cos(3.96 \text{deg}) = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 1.796 \frac{1}{m} \text{ kN}$$

$$Fi3115 := \frac{1.796 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(3.96 \text{deg})} \quad Fi3115 = 1.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A figura abaixo mostra a vista superior na elevação - 40m.



Para a determinação da força que está agindo sobre os elementos inclinados de travamento será utilizado uma aproximação, sendo considerada a distância (x) entre o ponto de chegada da onda na estrutura e o elemento sendo a distancia média entre os pontos iniciais e finais do elemento.

A.2.2.11 - Para os elementos diagonais entre 0 e 15.948 m e na elevação -40 m:

$$t = 0 \text{ s} \quad A = 0.762 \text{ m} \quad x := 7.974 \text{ m} \quad y(t) := 40 \text{ m} \quad V = 0.456 \text{ m}^2$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh1 = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 5.078 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{h1} := \frac{5.078 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\sin(32.1 \text{deg})} \quad F_{h1} = 9.556 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Para os elementos diagonais entre 15.948 e 31.895 m e na elevação -40 m

$$t = 0 \text{ s} \quad x := 23.922 \text{ m} \quad y(t) := 40 \text{ m}$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

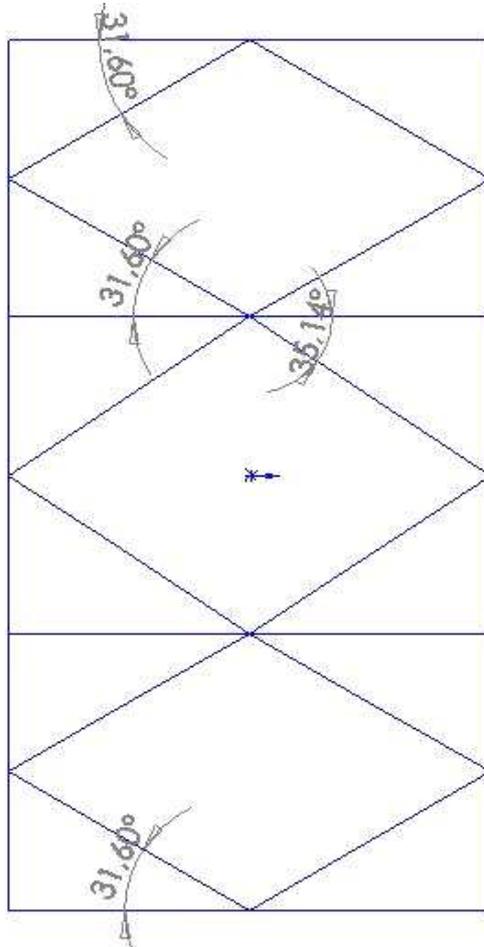
$$a_x(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

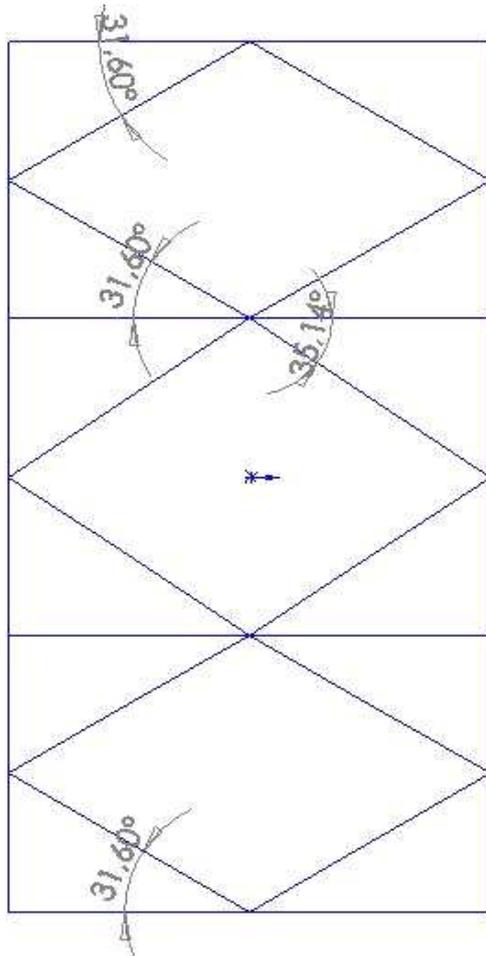
$$F_{h2} = C_d \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + C_m \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot a_x(t, x) = 3.946 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{h2} := \frac{3.946 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\sin(32.1 \text{deg})} \quad F_{h2} = 7.426 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A figura abaixo mostra a vista superior na elevação -15m.





A.2.2.12 - Para os elementos diagonais entre 0 e 15.948 m e na elevação -15 m

$$t = 0s \quad x := 7.974m \quad y(t) := 15m$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh3 = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 2.439 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$Fh3 := \frac{2.439 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\sin(31.6\text{deg})} \quad Fh3 = 4.655 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.2.2.13 - Para os elementos diagonais entre 15.948 e 31.895 m e na elevação -15 m

$$t = 0s \quad x := 23.922m \quad y(t) := 15m$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh4 = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 1.973 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$Fh4 := \frac{1.973 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\sin(31.6\text{deg})} \quad Fh4 = 3.765 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

**Para os elementos inclinados que estão contidos no plano lateral das pernas, será adotado como simplificação para o cálculo, a profundidade e a distancia (x) entre o ponto de chegada da onda na estrutura e o elemento como sendo as mesmas do ponto médio do elemento .**

A.2.2.14 - Para o elemento entre -40 m e -15m e  $0 < x < 15.948\text{m}$

$$x := 7.974\text{m} \quad A = 0.762\text{m} \quad y(t) := 27.5\text{m} + Hs \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fi727 \cdot \sin(60.52\text{deg}) = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 4.082 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$Fi727 := \frac{4.082 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\sin(60.52\text{deg})} \quad Fi727 = 4.689 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.2.2.15 - Para o elemento entre -40 m e -15m e  $15.948 < x < 31.985\text{m}$

$$x := 23.922\text{m} \quad y(t) := 27.5\text{m} + Hs \cdot \cos(w \cdot t) \quad A = 0.762\text{m}$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fi3127 \cdot \sin(60.52) = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 3.206 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{i3127} := \frac{3.206 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\sin(60.52\text{deg})} \quad F_{i3127} = 3.683 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.2.2.16 - Para o elemento entre -15 m e 0 m e  $0 < x < 15.948\text{m}$

$$x := 7.974\text{m} \quad A = 0.762\text{m} \quad y(t) := 7.5\text{m} + H_s \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$a_x(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$C_d \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + C_m \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot a_x(t, x) = 2.398 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{i77} := \frac{2.398 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\sin(57.49\text{deg})} \quad F_{i77} = 2.844 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.2.2.17 - Para o elemento entre -15 m e 0 m e  $15.948 < x < 31.895\text{m}$

$$x := 23.922\text{m} \quad A = 0.762\text{m} \quad V = 0.456\text{m}^2 \quad y(t) := 7.5\text{m} + H_s \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$a_x(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{i317} \cdot \sin(57.49\text{deg}) = C_d \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + C_m \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot a_x(t, x) = 1.942 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{i317} := \frac{1.942 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\sin(57.49\text{deg})} \quad F_{i317} = 2.303 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

### A.3 - Cálculo de forças devido a onda Sudoeste

#### A.3.1 - Determinação do Tempo aparente de onda

Para a direção Sudoeste

$$d := 40\text{m} + 2\text{m}$$

$$T_p := 15.55\text{s} \quad H_s := 7.84 \cdot \text{m} \quad V_i := 0.92 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\frac{d}{g \cdot T_p^2} = 0.018 \quad \frac{V_i}{g \cdot T_p} = 6.033 \times 10^{-3}$$

$$T_{app} := T_p \cdot 1.05 \quad T_{app} = 16.328\text{s}$$

#### A.3.2 - Cálculo das velocidades e acelerações pela teoria de Airy e força pela teoria de Morison

Usando a teoria de Airy para águas profundas, cabem algumas simplificações as quais são listadas abaixo:

$$L := \frac{(g \cdot T_{app}^2)}{2\pi} \quad k := 2 \frac{\pi}{L} \quad w := \sqrt{g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot d)}$$

Onde:

$T_{app}$  é o tempo de onda e  $g$  aceleração da gravidade.

Considerando a equação de Morison é necessário definir alguns parâmetros como:  $C_m=1.2$  ;  $C_d=1.05$  ;  $\rho = 1026$  kg por metro cúbico

Para a seguinte onda obtem-se:

$$H_s = 7.84\text{m} \quad C_d := 1.05 \quad C_m := 1.2 \quad \rho := 1026 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

$$L := \frac{(g \cdot T_{app}^2)}{2\pi} \quad L = 416.083\text{m} \quad k := 2 \frac{\pi}{L} \quad w := \sqrt{g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot d)}$$

$$w = 0.288\text{Hz} \quad y(t) := d + H_s \cdot \cos(w \cdot t) \quad x := 0\text{m} \quad H := 2H_s$$

Considerando as velocidade e acelerações das partículas da água variarão conforme a onda se desloca, analisa-se o tempo variando de 0 até o valor de  $T_{app}$ , sendo o incremento de 1.

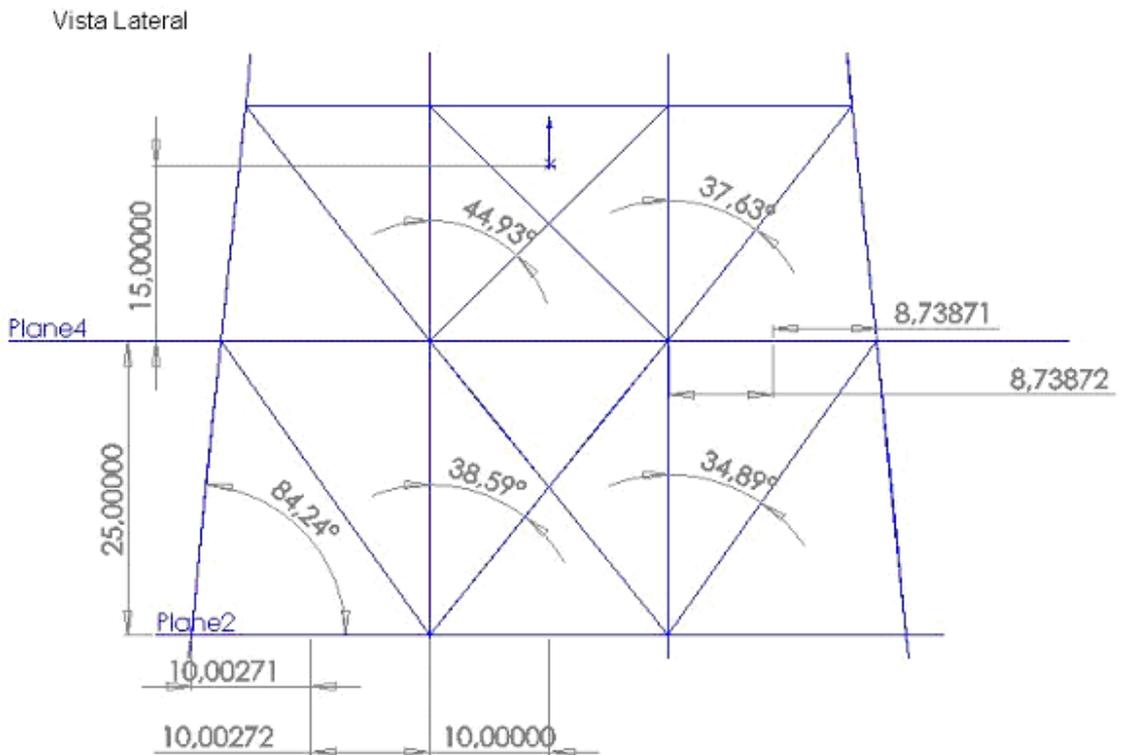
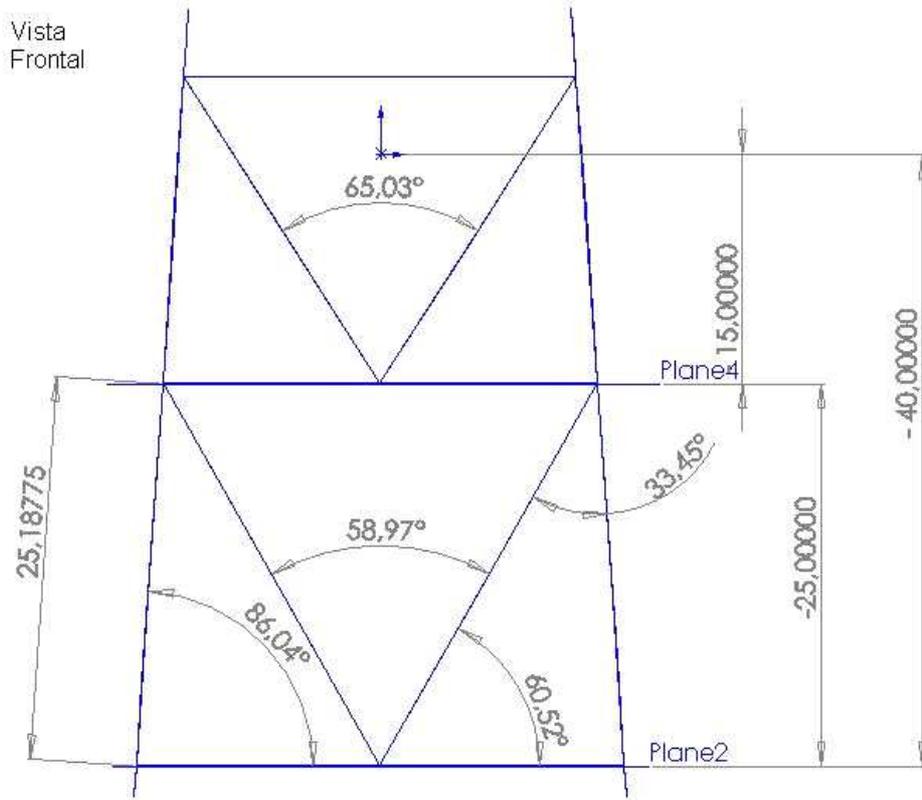
$$t := 0\text{s} .. T_{app} \quad y(t) := d + H_s \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$v(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\sinh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$a_x(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$a_y(t,x) := \frac{-w^2 \cdot H}{2} \cdot \frac{\sinh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$



A.3.2.1 - Para elementos verticais:

$$A := 1.372\text{m} \quad V := \frac{\pi A^2}{4} \quad Fv0 = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) =$$

13.821	$\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$
11.983	
8.262	
3.843	
0.102	
-1.91	
-2.358	
-3.971	
-6.458	
-8.904	
-10.456	
-10.54	
-9.008	

Conforme pode ser visto a força maior é exercida quando a onda esta na altura máxima, sendo sua força totalmente inercial e de valor igual a 13.821kN/m.

Desta forma pode-se decompor a força em suas componentes vertical e horizontal para ser aplicada ao elemento. Esta etapa será feita mais adiante.

Para determinar a força sobre os outros elementos que estão na mesma direção, varia-se a distancia x, que corresponde a distancia horizontal entre o primeiro elemento a receber contato com a onda e o elemento no qual se deseja calcular ação da onda.

OBS: Os valores calculados nos itens A.3.2.2 a A.3.2.4 serão utilizados no item A.3.2.13 para a determinação das cargas atuantes em elementos verticais.

A.3.2.2 - Para elementos verticais distantes a 20.005 m:

$$t := 0\text{s} \quad x := 20.005\text{m} \quad A := 1.372\text{m} \quad V := \frac{\pi A^2}{4} \quad y(t) := d + Hs \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 13.273 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.3 - Para elementos verticais distantes a 40.005 m:

$$x := 40.005 \cdot \text{m}$$

$$Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 10.651 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.4 -Para elementos verticais distantes a 60.010 m:

$$x := 60.010 \cdot \text{m}$$

$$Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 7.043 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.5 - Para os membros horizontais na elevação - 40m e  $x = 0$ :

$$y(t) := 40\text{m} \quad x := 0\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4}$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh040 = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x) = 6.442 \frac{1}{\text{m}} \text{ kN}$$

$$Fh040 := 6.442 \cdot \text{kN m}^{-1}$$

A.3.2.6 - Para os membros horizontais na elevação - 40m e  $x = 20.005$ :

$$y(t) := 40\text{m} \quad x := 20.005\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4}$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh2040 = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x) = 6.063 \frac{1}{\text{m}} \text{ kN}$$

$$Fh2040 := 6.063 \cdot \text{kN m}^{-1}$$

A.3.2.7 - Para os membros horizontais na elevação -40m e  $x = 40.005\text{m}$ :

$$y(t) := 40\text{m} \quad x := 40.005\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4}$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh4040 = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x) = 4.728 \frac{1}{\text{m}} \text{ kN}$$

$$Fh4040 := 4.728 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.8 -Para os membros horizontais na elevação -40 m e x = 60.010 m:

$$y(t) := 40\text{m} \quad x := 60.010\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4}$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh6040 = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 2.955 \frac{1}{\text{m}} \text{ kN}$$

$$Fh6040 := 2.955 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.9 - Para os membros horizontais na elevação -15 m e x = 0 m:

$$x := 0\text{m} \quad y(t) := 15\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4}$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh015 = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 4.803 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$Fh015 := 4.803 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.10 - Para os membros horizontais na elevação -15 m e x = 20.005 m

$$y(t) := 15\text{m} \quad x := 20.005\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4}$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh2015 = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 4.542 \frac{1}{\text{m}} \text{ kN}$$

$$Fh2015 := 4.542 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.11 -Para os membros horizontais na elevação -15 m e x =40.005 m:

$$y(t) := 15\text{m} \quad x := 40.005\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4}$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh4015 = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 3.567 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$Fh4015 := 3.567 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A. 3.2.12 - Para os membros horizontais na elevação -15m e x =60.010m:

$$y(t) := 15\text{m} \quad x := 60.010\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4}$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh6015 = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 2.262 \frac{1}{\text{m}} \text{ kN}$$

$$Fh6015 := 2.262 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.13 - Decomposição da força de onda atuando sobre os elementos:

Conforme as vistas apresentadas anteriormente obtem-se os ângulos de inclinação dos elementos.

Para as pernas obtem-se a seguinte força atuante:

$$Fv0 := \frac{13.821 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(5.76\text{deg})} \quad Fv0 = 13.891 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1} \quad x = 0$$

$$Fv60 := \frac{7.043 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(5.76\text{deg})} \quad Fv60 = 7.079 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1} \quad x = 60.028\text{m}$$

Para as pernas que estão distanciadas a 20.014m a força já foi determinada anteriormente sendo:

$$Fv20 := 13.273 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Para as pernas que estão distanciados a 40.014m a força já foi determinada anteriormente sendo  $F_{v40} = 6.505 \text{ kN/m}$

$$F_{v40} := 10.651 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

**Para os elementos inclinados que estão contidos no mesmo plano frontal das pernas, será adotado como simplificação para o cálculo, a profundidade como sendo o ponto médio do elemento.**

A.3.2.14 - Para os membros inclinados entre a elevação -40 e -15 m e  $x = 0$ :

$$x := 0 \text{ m} \quad A := 0.762 \text{ m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4} \quad y(t) := 27.5 \text{ m} + H_s \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$a_x(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{i040} \cdot \cos(5.76 \text{ deg}) = C_d \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + C_m \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot a_x(t, x) = 5.992 \frac{1}{\text{m}} \text{ kN}$$

$$F_{i040} := \frac{5.992 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(5.76 \text{ deg})} \quad F_{i040} = 6.022 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.15 - Para os membros inclinados entre a elevação -15 e 0 m e  $x = 0$ :

$$x := 0 \text{ m} \quad A := 0.762 \text{ m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4} \quad y(t) := 15 \text{ m} + H_s \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$a_x(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{i015} = \cos(5.76 \text{ deg}) = C_d \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + C_m \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot a_x(t, x) = 5.129 \frac{1}{\text{m}} \text{ kN}$$

$$F_{i015} := \frac{5.129 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(5.76 \text{ deg})} \quad F_{i015} = 5.155 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.16 - Para os membros inclinados entre a elevação -40 e -15 m e  $x = 20.005$ :

$$x := 20.005\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4} \quad y(t) := 27.5\text{m} + Hs \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fi_{2040} = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 5.646 \frac{1}{\text{m}} \text{ kN}$$

$$Fi_{2040} := 5.646 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.17 - Para os membros inclinados entre a elevação -15 e 0 m e  $x = 20.005$  m:

$$x := 20.005\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4} \quad y(t) := 15\text{m} + Hs \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fi_{2015} = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 4.845 \frac{1}{\text{m}} \text{ kN}$$

$$Fi_{2015} := 4.845 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.18 - Para os membros inclinados entre a elevação -40 e -15 m e  $x = 40.005$  m:

$$x := 40.005\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4} \quad y(t) := 27.5\text{m} + Hs \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fi_{4040} = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 4.41 \frac{1}{\text{m}} \text{ kN}$$

$$Fi_{4040} := 4.41 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.19 - Para os membros inclinados entre a elevação -15 e 0 m e  $x = 40.005$  m:

$$x := 40.005\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4} \quad y(t) := 7.5\text{m} + Hs \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fi_{4015} = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 3.575 \frac{1}{\text{m}} \text{ kN}$$

$$Fi_{4015} := 3.575 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.20 - Para os membros inclinados entre a elevação -40 e -15 m e  $x = 60.005$ :

$$x := 60.005\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4} \quad y(t) := 27.5\text{m} + Hs \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fi_{6040} \cdot \cos(5.76\text{deg}) = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 2.766 \frac{1}{\text{m}} \text{ kN}$$

$$Fi_{6040} := \frac{2.766 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(5.76\text{deg})} \quad Fi_{6040} = 2.78 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.21 - Para os membros inclinados entre a elevação -15 e 0 m e  $x = 60.005$  m:

$$x := 60.005\text{m} \quad A := 0.762\text{m} \quad V := \frac{\pi \cdot A^2}{4} \quad y(t) := 7.5\text{m} + Hs \cdot \cos(w \cdot t)$$

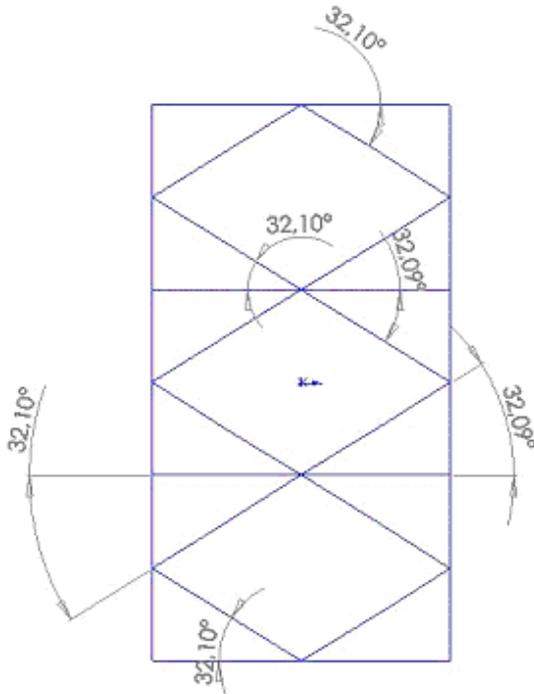
$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fi_{6015} \cdot \cos(5.76\text{deg}) = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 2.268 \frac{1}{\text{m}} \text{ kN}$$

$$Fi_{6015} := \frac{2.268 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(5.76\text{deg})} \quad Fi_{6015} = 2.28 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A figura abaixo mostra a vista superior na elevação -40m.



Para a determinação da força que está agindo sobre os elementos inclinados de travamento será utilizado uma aproximação, sendo considerada a distância (x) entre o ponto de chegada da onda na estrutura e o elemento sendo a distancia média entre os pontos iniciais e finais do elemento.

A.3.2.22 - Para os elementos diagonais entre 0 e 10.00272 m e na elevação -40 m:

$$t = 0s \quad A = 0.762m \quad x := 5.001m \quad y(t) := 40m \quad V = 0.456m^2$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh5 \cdot \cos(32.1\text{deg}) = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 6.454 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$Fh5 := \frac{6.454 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(32.1\text{deg})} \quad Fh5 = 7.619 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.23 - Para os elementos diagonais entre 10.00272 e 20.014 m e na elevação - 40 m:

$$t = 0s \quad x := 15.008m \quad y(t) := 40m$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh6 \cdot \cos(32.1 \text{deg}) = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 6.261 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$Fh6 := \frac{6.261 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(32.1 \text{deg})} \quad Fh6 = 7.391 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.24 - Para os elementos diagonais entre 20.014 m e 30.014 m e na elevação -40 m

$$t = 0 \text{ s} \quad x := 25.014 \text{ m} \quad y(t) := 40 \text{ m}$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh7 \cdot \cos(32.1 \text{deg}) = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 5.802 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$Fh7 := \frac{5.802 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(32.1 \text{deg})} \quad Fh7 = 6.849 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.25 - Para os elementos diagonais entre 30.014 m e 40.014 m e na elevação -40 m

$$t = 0 \text{ s} \quad x := 35.014 \text{ m} \quad y(t) := 40 \text{ m}$$

$$u(t,x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t,x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$Fh8 \cdot \cos(32.1 \text{deg}) = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t,x) \cdot |u(t,x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t,x) = 5.126 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{h8} := \frac{5.126 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(32.1 \text{deg})} \quad F_{h8} = 6.051 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.26 - Para os elementos diagonais entre 40.014 m e 50.008 m e na elevação -40 m

$$t = 0 \text{ s} \quad x := 45.011 \text{ m} \quad y(t) := 40 \text{ m}$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{h9} \cdot \cos(32.1 \text{deg}) = C_d \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + C_m \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x) = 4.3 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{h9} := \frac{4.3 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(32.1 \text{deg})} \quad F_{h9} = 5.076 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.27 - Para os elementos diagonais entre 50.008 m e 60.028 m e na elevação -40 m

$$t = 0 \text{ s} \quad x := 55.018 \text{ m} \quad y(t) := 40 \text{ m}$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

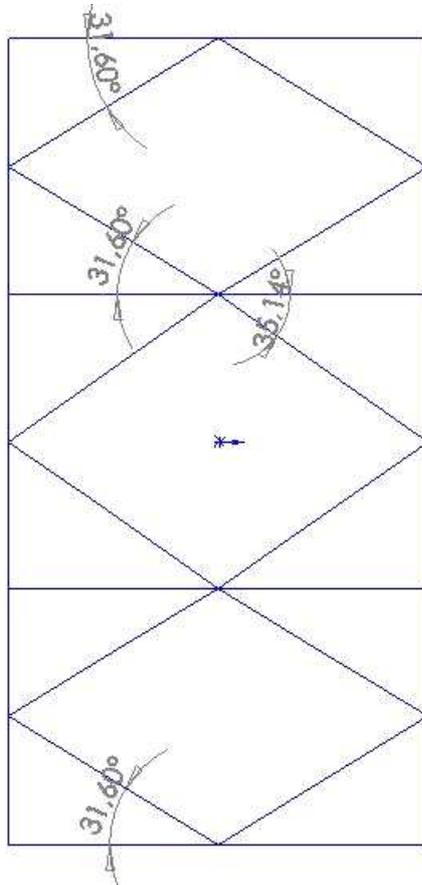
$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{h10} \cdot \cos(32.1 \text{deg}) = C_d \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + C_m \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x) = 3.402 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{h10} := \frac{3.402 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(32.1 \text{deg})} \quad F_{h10} = 4.016 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A figura abaixo mostra a vista superior na elevação -15m.



A.3.2.28 - Para os elementos diagonais entre 0 e 10.00272 m e na elevação -15 m

$$t = 0 \text{ s} \quad x := 5.001 \text{ m} \quad y(t) := 15 \text{ m} \quad V = 0.456 \text{ m}^2$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \cdot \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{h11} \cdot \cos(31.6 \text{ deg}) = C_d \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + C_m \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x) = 4.817 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{h11} := \frac{4.817 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(31.6 \text{ deg})} \quad F_{h11} = 5.656 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.29 - Para os elementos diagonais entre 10.00272 e 20.014 m e na elevação -15 m

$$t = 0 \text{ s} \quad x := 15.008 \text{ m} \quad y(t) := 15 \text{ m}$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{h12} \cdot \cos(31.6 \text{ deg}) = C_d \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + C_m \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x) = 4.684 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{h12} := \frac{4.684 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(31.6 \text{ deg})} \quad F_{h12} = 5.499 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.30 - Para os elementos diagonais entre 20.014 m e 30.014 m e na elevação -15 m:

$$t = 0 \text{ s} \quad x := 25.014 \text{ m} \quad y(t) := 15 \text{ m}$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{h13} \cdot \cos(35.31 \text{ deg}) = C_d \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + C_m \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x) = 4.353 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{h13} := \frac{4.353 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(35.14 \text{ deg})} \quad F_{h13} = 5.323 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.31 - Para os elementos diagonais entre 30.014 m e 40.014 m e na elevação -40 m

$$t = 0 \text{ s} \quad x := 35.014 \text{ m} \quad y(t) := 15 \text{ m}$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{h14} \cdot \cos(35.14 \text{ deg}) = C_d \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + C_m \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x) = 3.86 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{h14} := \frac{3.86 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(35.14\text{deg})} \quad F_{h14} = 4.72 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.32 - Para os elementos diagonais entre 40.014 m e 50.008 m e na elevação -15 m

$$t = 0 \text{ s} \quad x := 45.011 \text{ m} \quad y(t) := 15 \text{ m}$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{h15} \cdot \cos(31.60\text{deg}) = C_d \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + C_m \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x) = 3.253 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{h15} := \frac{3.253 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(31.60\text{deg})} \quad F_{h15} = 3.819 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.33 - Para os elementos diagonais entre 50.008 m e 60.028 m e na elevação -15 m

$$t = 0 \text{ s} \quad x := 55.018 \text{ m} \quad y(t) := 15 \text{ m}$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{h16} \cdot \cos(31.6\text{deg}) = C_d \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + C_m \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x) = 2.592 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{h16} := \frac{2.592 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(31.6\text{deg})} \quad F_{h16} = 3.043 \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

**Para os elementos inclinados que estão contidos no plano lateral das pernas, será adotado como simplificação para o cálculo, a profundidade e a distancia (x) entre o ponto de chegada da onda na estrutura e o elemento como sendo as mesmas do ponto médio do elemento .**

A.3.2.34 - Para o elemento entre -40 m e -15m e  $0 < x < 20.005\text{m}$

$$x := 10.00272\text{m} \quad A = 0.762\text{m} \quad y(t) := 27.5\text{m} + H_s \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{i1027} \cdot \cos(34.89) = C_d \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + C_m \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x) = 5.95 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{i1027} := \frac{5.95 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(34.89\text{deg})} \quad F_{i1027} = 7.254 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.35 - Para o elemento entre -40 m e -15m e  $20.005 < x < 40.005\text{m}$

$$x := 30.005\text{m} \quad y(t) := 27.5\text{m} + H_s \cdot \cos(w \cdot t) \quad A = 0.762\text{m}$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{i3027} \cdot \cos(38.59\text{deg}) = C_d \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + C_m \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x) = 5.115 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{i3027} := \frac{5.115 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(38.59\text{deg})} \quad F_{i3027} = 6.544 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.36 - Para o elemento entre -40 m e -15m e  $40.005 < x < 60.010\text{m}$

$$x := 50.008\text{m} \quad A = 0.762\text{m} \quad V = 0.456\text{m}^2 \quad y(t) := 27.5\text{m} + H_s \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{i5027} \cdot \cos(38.59\text{deg}) = C_d \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + C_m \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x)$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{i5027} := \frac{3.601 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(38.59\text{deg})} \quad F_{i5027} = 4.607 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.37 - Para o elemento entre -15 m e 0 m e  $0 < x < 20.005\text{m}$

$$x := 10.00272\text{m} \quad A = 0.762\text{m} \quad y(t) := 7.5\text{m} + H_s \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{i107} \cdot \cos(37.63 \text{ deg}) = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x) = 4.788 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{i107} := \frac{4.788 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(37.63 \text{ deg})} \quad F_{i107} = 6.046 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.38 - Para o elemento entre -15 m e 0 m e  $20.005 < x < 40.005\text{m}$

$$x := 30.005\text{m} \quad A = 0.762\text{m} \quad V = 0.456\text{m}^2 \quad y(t) := 7.5\text{m} + H_s \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{i307} \cdot \cos(44.93 \text{ deg}) = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x) = 4.134 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Então a força sobre os elementos será:

$$F_{i307} := \frac{4.134 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(44.93 \text{ deg})} \quad F_{i307} = 5.839 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

A.3.2.39 - Para o elemento entre a -15 m e 0 m e  $40.005 < x < 60.010\text{m}$

$$x := 50.008\text{m} \quad A = 0.762\text{m} \quad V = 0.456\text{m}^2 \quad y(t) := 7.5\text{m} + H_s \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$u(t, x) := \frac{w \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$ax(t, x) := \frac{w^2 \cdot H}{2} \frac{\cosh(k \cdot y(t))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(k \cdot x - w \cdot t)$$

$$F_{i507} \cdot \cos(37.63 \text{ deg}) = Cd \cdot \frac{\rho}{2g} \cdot A \cdot u(t, x) \cdot |u(t, x)| + Cm \cdot \frac{\rho}{g} \cdot V \cdot ax(t, x) = 2.932 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$F_{i507} := \frac{2.932 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}}{\cos(37.63 \text{ deg})} \quad F_{i507} = 3.702 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

#### A.4 - Cálculo da força de vento

De acordo com o sugerido pela norma API- RP2A WSD, serão usadas o Sistema de Unidades Ingles para cálculo da força exercida pelo vento. E por fim, serão convertidos para o SI. A formulação teorica foi exposta no item 2.4 do presente trabalho.

$z$  = altura para cálculo da força do vento

$I_u$  = Intensidade de turbulência na altura  $z$ .

$U(z)$  = velocidade do vento (ft/s) na altura  $z$ .

$U_0$  = velocidade do vento (ft/s) a altura de 32.8 ft.

$u(z,t)$  = velocidade do vento (ft.s)

$C$  = coeficiente

$F$  = força do vento,

$\rho$  = densidade de massa do ar ( 0.0023668 slugs/ft<sup>3</sup> para temperatura e pressão padrão).

$u$  = velocidade do vento (ft/s)

$C_s$  = coeficiente de forma,

$A$  = área do objeto (ft<sup>2</sup>).

Velocidade do vento em m/s a altura de 10 m:

Sudoeste = 31.58 m/s

Sudeste = 28.05 m/s

$$\rho := 0.0023668 \text{ slugs/ft}^3$$

$$U_0 := \begin{pmatrix} 92.028 \\ 103.609 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{velocidade sudeste (ft/s)} \\ \text{velocidade sudoeste (ft/s)} \end{matrix}$$

$$z_{\text{sudeste}} := \begin{pmatrix} z \text{ (ft)} \\ 45.112 \\ 66.847 \\ 70.046 \\ 91.781 \\ 125.755 \end{pmatrix} \quad A_{\text{sudeste}} := \begin{pmatrix} 2.691 \cdot 10^3 \\ 1.507 \cdot 10^3 \\ 606.223 \\ 2.508 \cdot 10^3 \\ 606.223 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{Área incidente (ft}^2\text{)} \\ \text{Deck} \\ \text{Suporte Alojamento} \\ \text{Heliponto} \\ \text{Alojamento} \\ \text{Heliponto Alojamento} \end{matrix}$$

$$z_{\text{sudoeste}} := \begin{pmatrix} z \text{ (ft)} \\ 45.112 \\ 66.847 \\ 67.257 \\ 91.781 \\ 125.755 \end{pmatrix} \quad A_{\text{sudoeste}} := \begin{pmatrix} 1.756 \cdot 10^3 \\ 866.495 \\ 1.292 \cdot 10^3 \\ 1.453 \cdot 10^3 \\ 482.331 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{Área incidente (ft}^2\text{)} \\ \text{Deck} \\ \text{Suporte Alojamento} \\ \text{Oficina} \\ \text{Alojamento} \\ \text{Heliponto Alojamento} \end{matrix}$$

As áreas para a determinação da pressão do vento serão consideradas apenas as área exposta diretamente, sendo uma área totalmente fechada (uma parede).

Por isto na determinação da carga na direção Sudeste, não considerou-se a área do prédio da oficina, pois o alojamento faz uma espécie de cortina de proteção;

Para a determinação da força do vento é necessário calcular o valor da constante C através da fórmula abaixo:

$$C = 5.37 \times 10^{-2} \times (1 + 0.0457 \times U_0)^{1/2}$$

De forma a otimizar o tempo para a determinação do valor C desenvolve-se a rotina abaixo:

$$C := \left[ \begin{array}{l} \text{aux} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..1 \\ \quad \text{aux}_i \leftarrow 5.37 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{1 + 0.0457 \cdot U_{0i}} \\ \text{aux} \end{array} \right.$$

$$C = \begin{pmatrix} 0.123 \\ 0.129 \end{pmatrix}$$

Seguindo a mesma metodologia para a determinação da velocidade média do vento em 1 hora  $U(z)$  (ft/s) na altura z tem-se:

$$U(z) = U_0 \times [1 + C \times \ln(\frac{z}{32.8})]$$

$$U := \left[ \begin{array}{l} \text{aux} \leftarrow 0 \\ \text{for } j \in 0..4 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{aux}_{j,0} \leftarrow U_{00} \cdot (1 + C_0 \cdot \ln(z_{\text{sudeste}_j} \cdot 32.8^{-1})) \\ \text{aux}_{j,1} \leftarrow U_{01} \cdot (1 + C_1 \cdot \ln(z_{\text{sudoeste}_j} \cdot 32.8^{-1})) \end{array} \right. \\ \text{aux} \end{array} \right.$$

$$U = \begin{pmatrix} 95.622 & 107.856 \\ 100.056 & 113.095 \\ 100.583 & 113.177 \\ 103.63 & 117.319 \\ 107.181 & 121.515 \end{pmatrix}$$

A intensidade de turbulência na altura z é dada por:

$$I_u(z) = 0.06 \times [1 + 0.0131 \times U_o] \times \left(\frac{z}{32.8}\right)^{-0.22}$$

$$lu := \begin{array}{l} \text{aux} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..4 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{aux}_{i,0} \leftarrow 0.06 \cdot (1 + 0.0131 \cdot U_{00}) \cdot (z_{\text{sudeste}_i} \cdot 32.8^{-1})^{-22} \\ \text{aux}_{i,1} \leftarrow 0.06 \cdot (1 + 0.0131 \cdot U_{01}) \cdot (z_{\text{sudoeste}_i} \cdot 32.8^{-1})^{-22} \end{array} \right. \\ \text{aux} \end{array}$$

$$lu = \begin{pmatrix} 1.193 \times 10^{-4} & 1.275 \times 10^{-4} \\ 2.085 \times 10^{-8} & 2.228 \times 10^{-8} \\ 7.455 \times 10^{-9} & 1.948 \times 10^{-8} \\ 1.951 \times 10^{-11} & 2.086 \times 10^{-11} \\ 1.911 \times 10^{-14} & 2.043 \times 10^{-14} \end{pmatrix}$$

A velocidade de vento de projeto  $u(z,t)$  na altura z acima do nível do mar para um período médio  $t(s)$  (onde  $t > t_0$ ;  $t_0 = 3600 \text{ sec}$ ) é dada por:

$$u(z,t) = U(z) \times [1 - 0.41 \times I_u(z) \times \ln\left(\frac{t}{t_0}\right)]$$

$$u := \begin{array}{l} \text{aux} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..4 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{aux}_{i,0} \leftarrow U_{i,0} \cdot \left(1 - 0.41 \cdot lu_{i,0} \cdot \ln\left(\frac{600}{3600}\right)\right) \\ \text{aux}_{i,1} \leftarrow U_{i,1} \cdot \left(1 - 0.41 \cdot lu_{i,1} \cdot \ln\left(\frac{600}{3600}\right)\right) \end{array} \right. \\ \text{aux} \end{array}$$

$$u = \begin{pmatrix} 95.63 & 107.866 \\ 100.056 & 113.095 \\ 100.583 & 113.177 \\ 103.63 & 117.319 \\ 107.181 & 121.515 \end{pmatrix}$$

A força de arrasto do vento deve ser calculada por:

$$F = (\rho/2)u^2C_sA$$

$$F := \begin{array}{l} \text{aux1} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..4 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{aux}_{i,0} \leftarrow \frac{\rho}{2} \cdot (u_{i,0})^2 \cdot \text{Asudeste}_i \\ \text{aux}_{i,1} \leftarrow \frac{\rho}{2} \cdot (u_{i,1})^2 \cdot \text{Asudoeste}_i \end{array} \right. \\ \text{aux} \end{array}$$

$$F = \begin{pmatrix} 2.912 \times 10^4 & 2.418 \times 10^4 \\ 1.785 \times 10^4 & 1.312 \times 10^4 \\ 7.258 \times 10^3 & 1.958 \times 10^4 \\ 3.187 \times 10^4 & 2.367 \times 10^4 \\ 8.241 \times 10^3 & 8.428 \times 10^3 \end{pmatrix} \quad F := \begin{pmatrix} 2.912 \cdot 10^4 & 2.418 \cdot 10^4 \\ 1.785 \cdot 10^4 & 1.312 \cdot 10^4 \\ 7.258 \cdot 10^3 & 1.958 \cdot 10^4 \\ 3.187 \cdot 10^4 & 2.367 \cdot 10^4 \\ 8.241 \cdot 10^3 & 8.428 \cdot 10^3 \end{pmatrix} \cdot \text{lbf}$$

Transformando a força do vento de lbf para KN e calculando a pressão de vento PV para as direções Sudeste e Sudoeste tem-se:

$$F = \begin{pmatrix} 129.532 & 107.558 \\ 79.401 & 58.361 \\ 32.285 & 87.096 \\ 141.765 & 105.289 \\ 36.658 & 37.49 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

$$PV := \begin{array}{l} \text{aux} \leftarrow 0 \\ \text{for } x \in 0..4 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{aux}_{x,0} \leftarrow \frac{F_{x,0}}{\text{Asudeste}_x \cdot \text{ft}^2} \\ \text{aux}_{x,1} \leftarrow \frac{F_{x,1}}{\text{Asudoeste}_x \cdot \text{ft}^2} \end{array} \right. \\ \text{aux} \end{array}$$

$$PV = \begin{array}{cc} \text{Sudeste} & \text{sudoeste} \\ \begin{pmatrix} 518.125 & 659.308 \\ 567.128 & 724.977 \\ 573.246 & 725.616 \\ 608.431 & 779.99 \\ 650.885 & 836.635 \end{pmatrix} & \text{Pa} \end{array} \quad i := 0..4$$

Pressão de vento Sudeste		Pressão de vento Sudoeste	
$PV_{i,0} =$		$PV_{i,1} =$	
518.125	Pa Deck	659.308	Pa Deck
567.128	Suporte Alojamento	724.977	Suporte Alojamento
573.246	Heliponto	725.616	Oficina
608.431	Alojamento	779.99	Alojamento
650.885	Heliponto Alojamento	836.635	Heliponto Alojamento

#### 4.1 - Carga de vento aplicada na viga do deck, gerada pelo vento sudoeste

A carga do deck foi dividida POR DOIS e aplicada nas vigas do deck

$$\frac{659.308 \cdot 5}{2} = 1.648 \times 10^3 \text{ n}^{-1} \quad \text{o valor 5 na equação ao lado refere-se a altura do deck em metros}$$

#### 4.2 - Carga de vento aplicada na viga do deck, gerada pelo vento sudeste

A carga do deck foi dividida POR DOIS e aplicada nas vigas do deck

$$\frac{518.125 \cdot 5}{2} = 1.295 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$$

### A.5 - Determinação do empuxo vertical

Para os cálculos de empuxo serão considerados apenas os elementos horizontais e inclinados, já que para as pernas considera-se que há água em seu interior, desta forma não sofrem empuxo.

E = empuxo;

w = densidade da água;

V = Volume deslocado por metro

$$w := 1026 \text{kgf} \cdot \text{m}^{-3}$$

Para os elementos com diâmetro igual a 0.762 m

$$V := \frac{\pi \cdot 0.762^2 \cdot 1 \text{m}}{4} \cdot \text{m}^2 \quad V = 0.456 \text{m}^3$$

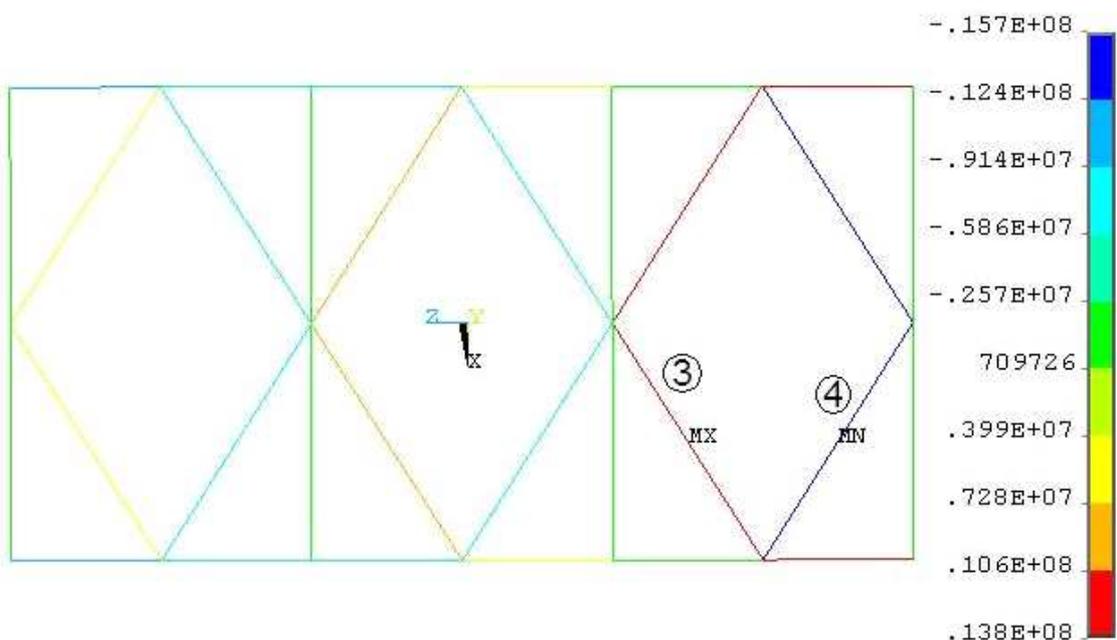
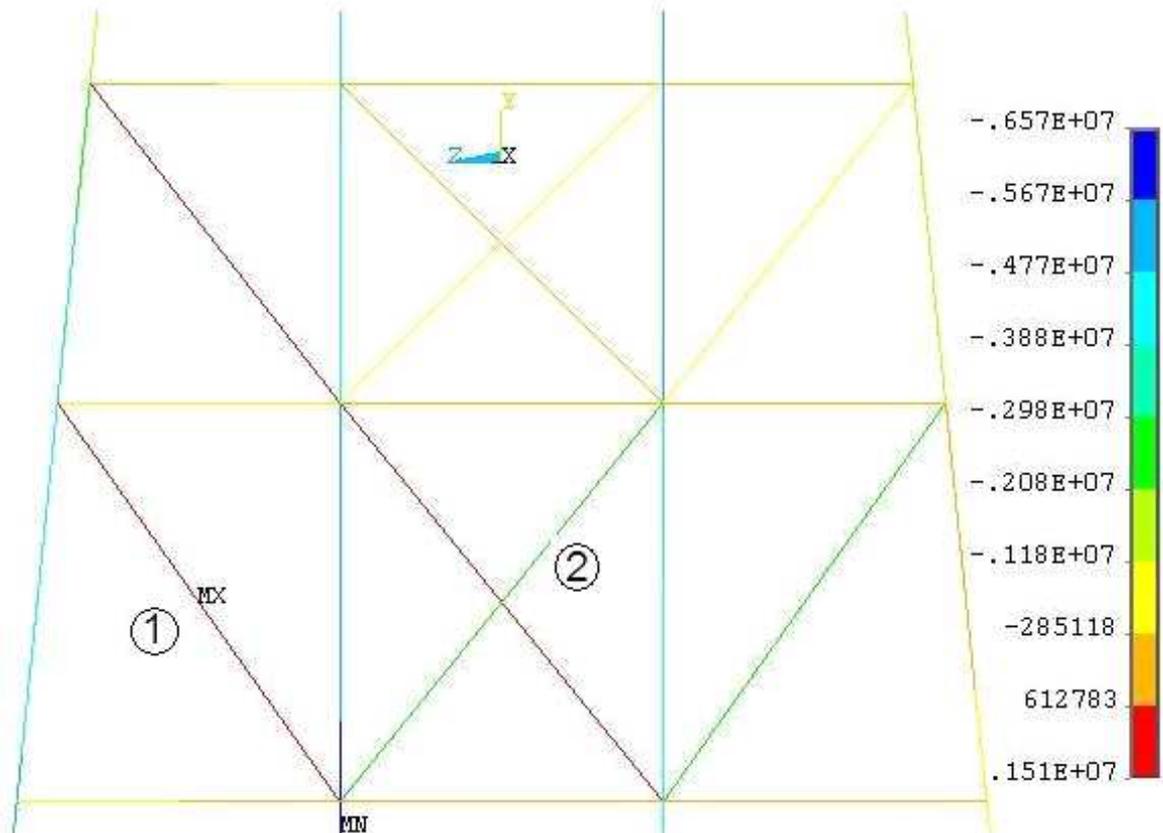
$$E := w \cdot V \quad E = 4.588 \times 10^3 \text{N} \quad \text{para cada metro do elemento}$$

## A6 - Dimensionamento e verificação dos elementos

Para a verificação dos perfis utilizados, será utilizado os critérios de dimensionamento da norma da ABNT NB14

A 6.1 - Análise dos elementos de travamento (elementos rotulados) submetidos aos esforços de tração.

A.6.1.1 - Para a onda na direção sudoeste:



A tração máxima é indicada pela coloração vermelha no valor de 1510kN, para o elemento 1 de travamento vertical e 1380kN para o elemento 3 de travamento horizontal. A compressão axial máxima (no elemento 2 de travamento vertical) é indicada pela cor verde sendo seu valor de 2980kN e para o elemento 4 de travamento horizontal é de 1570kN. Os elementos a serem dimensionados estão marcados pelos números 1 e 3 para tração, 2 e 4 para compressão.

#### A.6.1.1.1 - Verificação dos elementos tracionados:

$$f_y := 250\text{MPa} \quad f_u := 400\text{MPa}$$

$$A_g := \begin{pmatrix} 0.0372 \\ 0.0299 \end{pmatrix} \cdot \text{m}^2 \quad N_d := \begin{pmatrix} 1510 \\ 1380 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

Elemento (1)  
Elemento (3)

$$N_{dres} := 0.9 \cdot A_g \cdot f_y \quad N_{dres} = \begin{pmatrix} 8.37 \times 10^3 \\ 6.728 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{kN}$$

Como  $N_{dres} > N_d$ , então a seção esta OK!

Sendo  $N_{dres}$  igual a resistência da seção a tração e  $N_d$  a força solicitante.

#### A.6.1.1.2 - Verificação dos elementos sob compressão:

Conforme a norma, para elementos de contraventamento de estruturas, considera-se suas extremidades como birrotulada, sendo  $k = 1$ .

Comprimento "l" do elemento:

$$l := \begin{pmatrix} 32.063 \\ 18.825 \end{pmatrix} \cdot \text{m}$$

Elemento (2)  
Elemento (4)

$K := 1 \quad Q := 1 \quad E := 205000\text{MPa}$

Momento de inércia

$$I := \begin{pmatrix} 0.00259 \\ 0.002067 \end{pmatrix} \cdot \text{m}^4$$

Elemento (2)  
Elemento (4)

$$r := \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{I_{0,0}}{A_{g0,0}}} \\ \sqrt{\frac{I_{1,0}}{A_{g1,0}}} \end{pmatrix}$$

Raio de giração  
 $r = \begin{pmatrix} 0.264 \\ 0.263 \end{pmatrix} \text{m}$

$$\lambda := \begin{pmatrix} K \cdot \frac{l_{0,0}}{r_{0,0}} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 \cdot E}} \\ K \cdot \frac{l_{1,0}}{r_{1,0}} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 \cdot E}} \end{pmatrix} \quad \lambda = \begin{pmatrix} 1.351 \\ 0.796 \end{pmatrix}$$

Elemento (2)  
Elemento (4)

Obs: A nomenclatura  $A_{g0,0}$  é uma notação matricial. Serve também para as outras nomenclaturas aqui usadas.

Da tabela 4 da norma NB14, para a curva a obtem-se:

$$\rho := \begin{pmatrix} 0.453 \\ 0.796 \end{pmatrix}$$

A força resistente pela seção é:

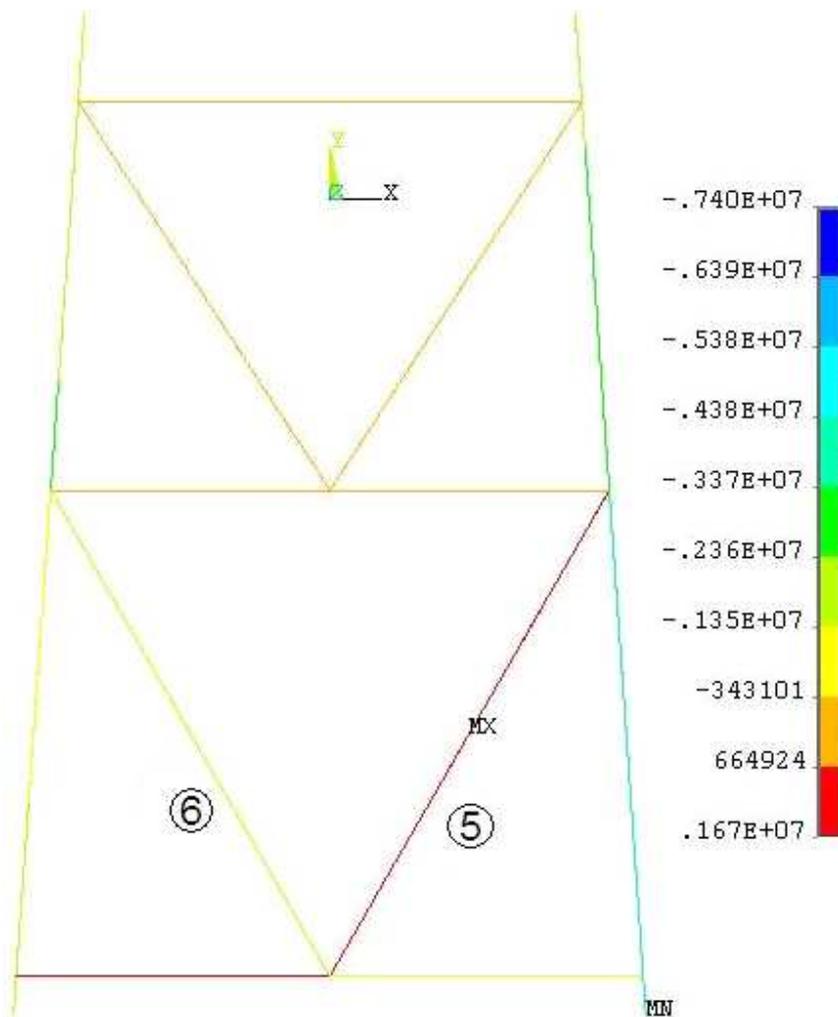
$$N_{dres} := \begin{pmatrix} \rho_{0,0} \cdot A_{g0,0} \\ \rho_{1,0} \cdot A_{g1,0} \end{pmatrix} \cdot 0.9 \cdot Q \cdot f_y \quad N_{dres} = \begin{pmatrix} 3.792 \times 10^3 \\ 5.355 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

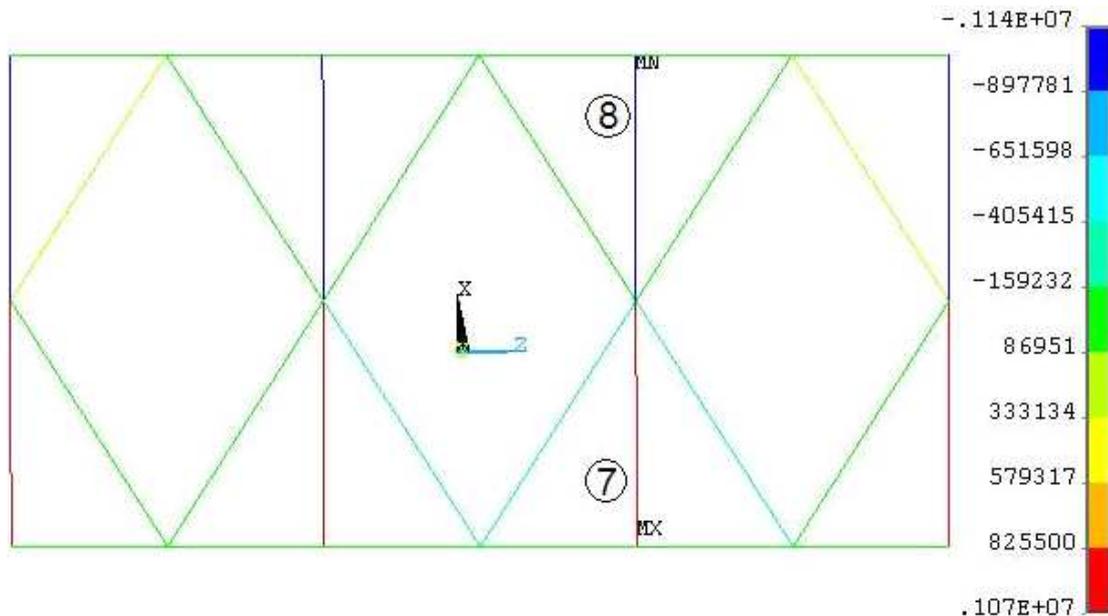
$$N_d := \begin{pmatrix} 2980 \\ 1570 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad \begin{array}{l} \text{Elemento (2)} \\ \text{Elemento (4)} \end{array}$$

Como  $N_{dres} > N_d$ , então a seção esta OK!

Sendo  $N_{dres}$  igual a resistência da seção a compressão e  $N_d$  a força solicitante.

A.6.1.2 - Para a onda na direção sudeste:





A tração máxima é indicada pela coloração vermelha no valor de 1672.9KN, para o elemento 5 de travamento vertical e 1070KN para o elemento 7 de travamento horizontal. A compressão axial máxima (no elemento 6 de travamento vertical) é indicada pela cor verde sendo seu valor de -1620.5KN e para o elemento 8 de travamento horizontal é de -1140KN. Os elementos a serem dimensionados estão marcados pelos números 5 e 7 para tração, 6 e 8 para compressão.

$$f_y := 250\text{MPa}$$

A.6.1.2.1 - Verificação dos elementos tracionados:

$$A_g := \begin{pmatrix} 0.0372 \\ 0.0299 \end{pmatrix} \cdot \text{m}^2 \quad N_d := \begin{pmatrix} 1672.9 \\ 1070 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad \begin{array}{l} \text{Elemento (5)} \\ \text{Elemento (7)} \end{array}$$

$$N_{dres} := 0.9 \cdot A_g \cdot f_y \quad N_{dres} = \begin{pmatrix} 8.37 \times 10^3 \\ 6.728 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{kN} \quad \begin{array}{l} \text{Elemento (5)} \\ \text{Elemento (7)} \end{array}$$

Como  $N_{dres} > N_d$ , então a seção esta OK!

Sendo  $N_{dres}$  igual a resistência da seção a compressão e  $N_d$  a força solicitante.

### A.6.1.2.2 - Verificação dos elementos sob compressão

Conforme a norma, para elementos de contraventamento de estruturas, considera-se suas extremidades como birrotuladas, sendo  $k = 1$ .

Comprimento "l" do elemento:

$$l := \begin{pmatrix} 28.754 \\ 18.825 \end{pmatrix} \cdot \text{m} \quad \begin{array}{l} \text{Elemento (6)} \\ \text{Elemento (8)} \end{array} \quad K := 1 \quad Q := 1 \quad E := 205000\text{MPa}$$

$$\text{Momento de inércia} \quad I := \begin{pmatrix} 0.00259 \\ 0.002067 \end{pmatrix} \cdot \text{m}^4 \quad r := \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{I_{0,0}}{A_{g0,0}}} \\ \sqrt{\frac{I_{1,0}}{A_{g1,0}}} \end{pmatrix} \quad \text{Raio de giração} \quad r = \begin{pmatrix} 0.264 \\ 0.263 \end{pmatrix} \text{m} \quad \begin{array}{l} \text{Elemento (6)} \\ \text{Elemento (8)} \end{array}$$

$$\lambda := \begin{pmatrix} K \cdot \frac{l_{0,0}}{r_{0,0}} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 \cdot E}} \\ K \cdot \frac{l_{1,0}}{r_{1,0}} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 \cdot E}} \end{pmatrix} \quad \lambda = \begin{pmatrix} 1.211 \\ 0.796 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Elemento (6)} \\ \text{Elemento (8)} \end{array}$$

Obs: A nomenclatura  $A_{g0,0}$  é uma notação matricial. Serve também para as outras nomenclaturas aqui usadas.

Da tabela 4 da norma NB14, para a curva a obtem-se:

$$\rho := \begin{pmatrix} 0.553 \\ 0.796 \end{pmatrix}$$

A força resistente pela seção é:

$$N_{dres} := \begin{pmatrix} \rho_{0,0} \cdot A_{g0,0} \\ \rho_{1,0} \cdot A_{g1,0} \end{pmatrix} \cdot 0.9 \cdot Q \cdot f_y$$

$$N_{dres} = \begin{pmatrix} 4.629 \times 10^3 \\ 5.355 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{kN} \quad \begin{array}{l} \text{Elemento (6)} \\ \text{Elemento (8)} \end{array} \quad N_d := \begin{pmatrix} 1620.5 \\ 1140 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

Como  $N_{dres} > N_d$ , então a seção esta OK!

Sendo  $N_{dres}$  igual a resistência da seção a compressão e  $N_d$  a força solicitante.

### A.6.2 - Verificação dos elementos horizontais

Após uma comparação entre as tensões nas vigas causadas pelas ondas (sudeste e sudoeste), combinadas com vento, peso próprio e as demais cargas, conclui-se que a tensão resultante máxima ocorre durante a incidência do onda na direção sudoeste sobre a estrutura. A figura a seguir ilustra a tensão máxima e mínima para os planos horizontais.

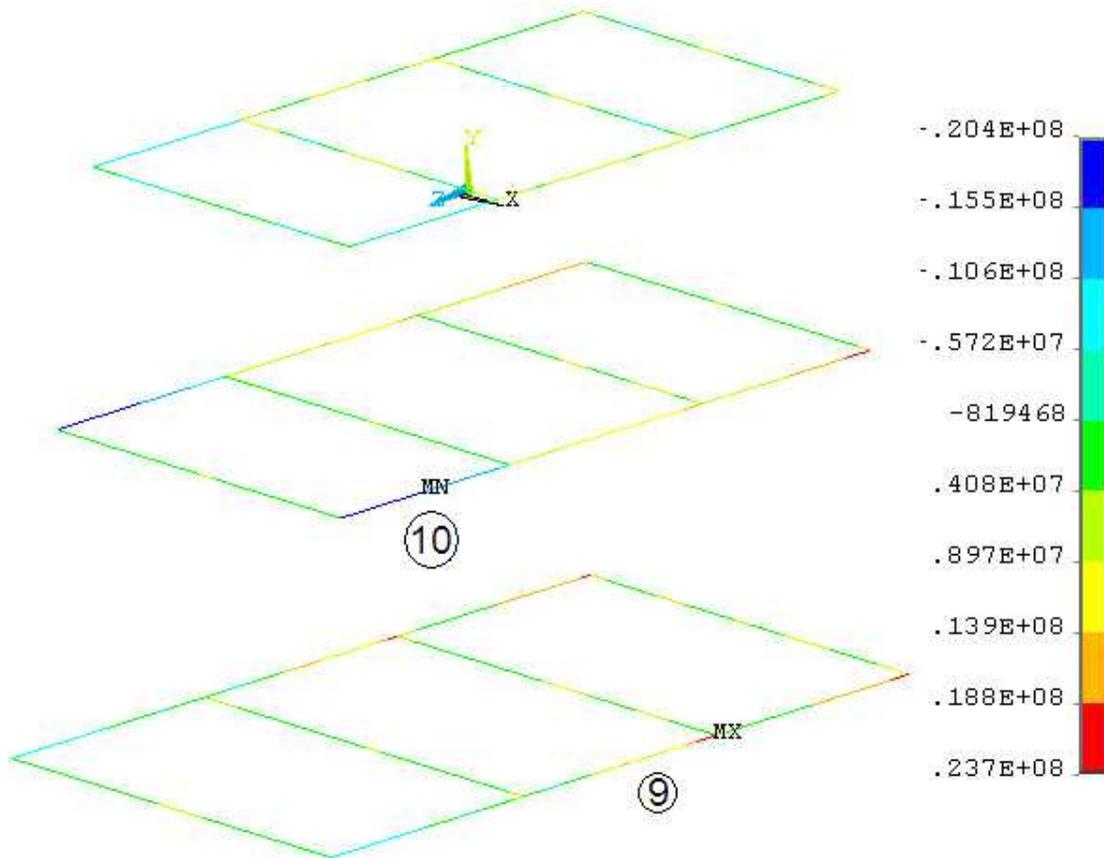


Diagrama de momentos fletores para o elemento 9:

Diagrama momento fletor no eixo z

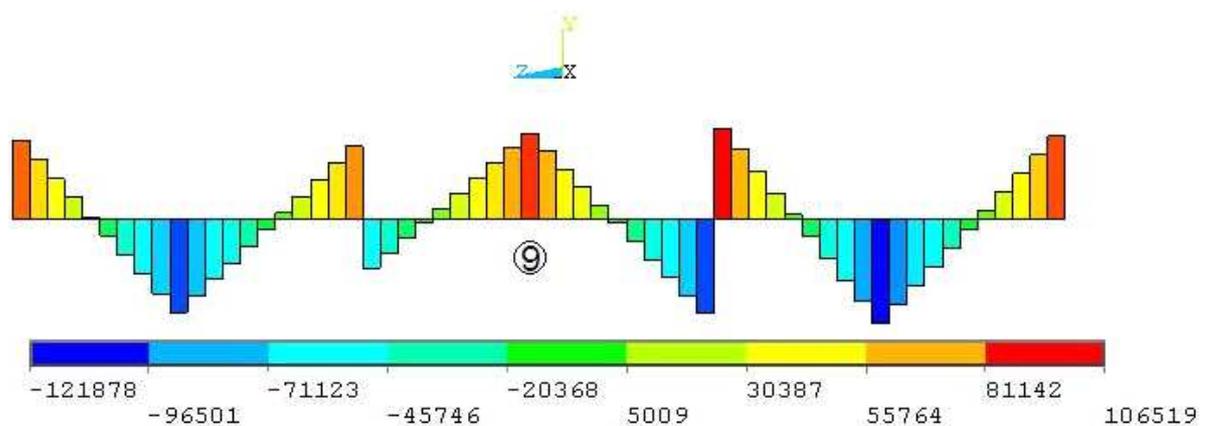
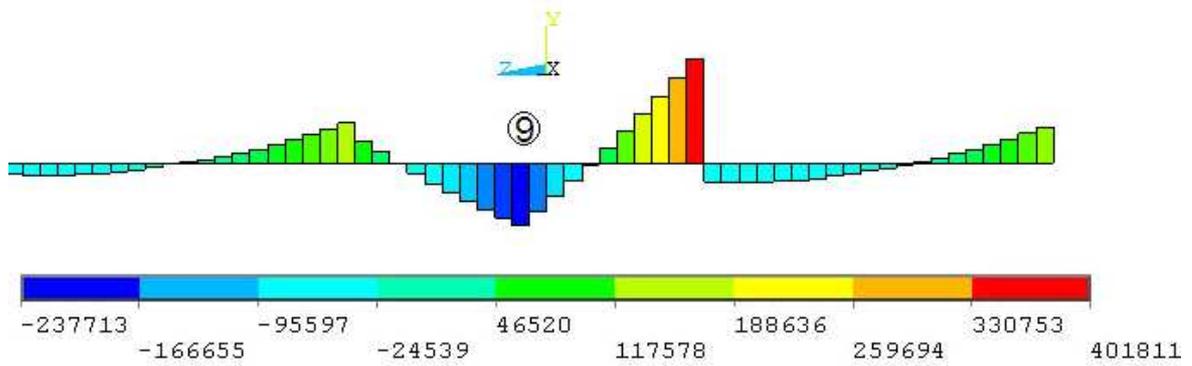


Diagrama de momento fletor no eixo y:



Diagramas de esforço cortante para o elemento 9:

Diagrama de esforço cortante no eixo y:

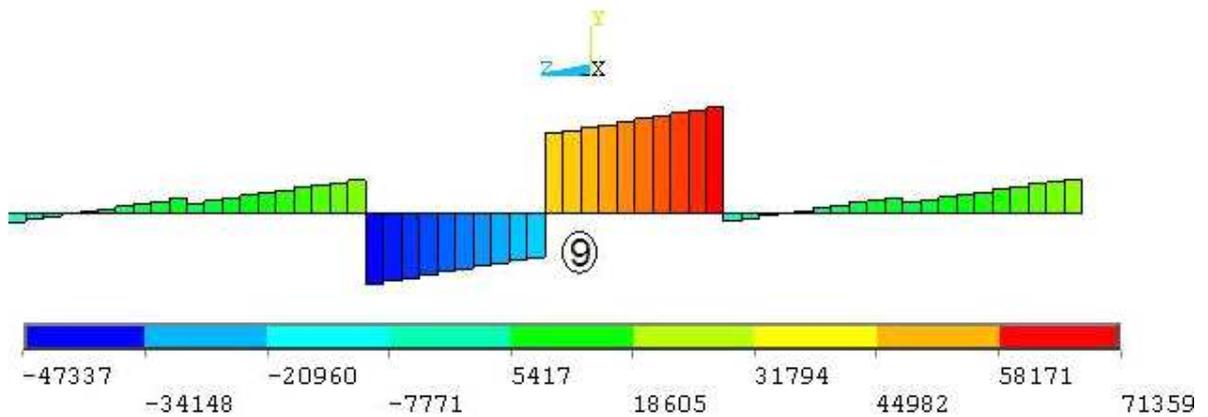


Diagrama de esforço cortante no eixo z

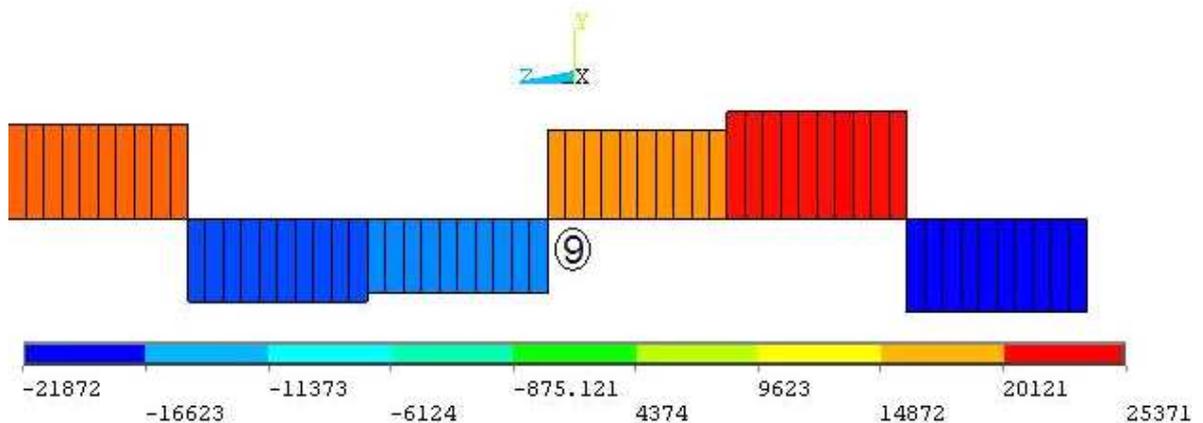
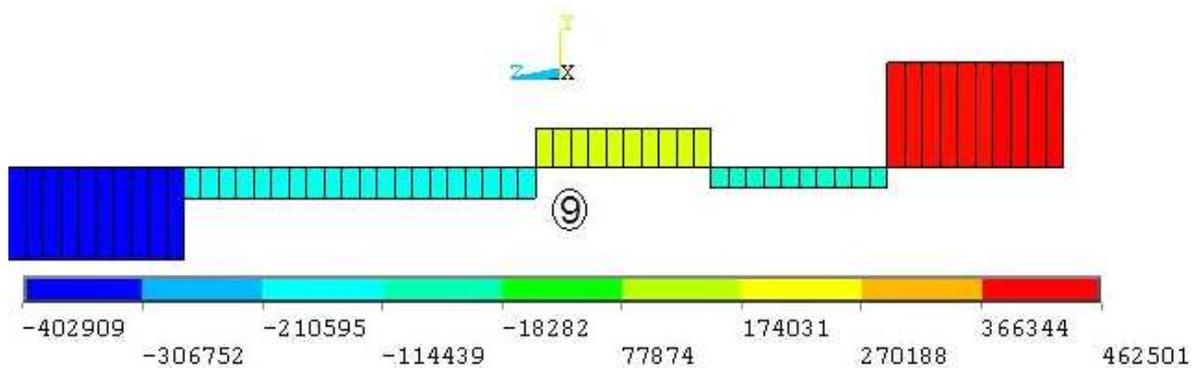


Diagrama de esforço normal:



$$t := 0.016\text{m} \quad h := 0.762\text{m}$$

Cálculo do valor do módulo plástico (Z) para o elemento 9:

$$Z := \frac{h^3}{6} \left[ 1 - \left( 1 - 2 \frac{t}{h} \right)^3 \right] \quad Z = 8.906 \times 10^{-3} \text{m}^3$$

Determinação do momento resistente:

Momento resistente de cálculo no eixo Z => Mnresz

Momento resistente de cálculo no eixo Y => Mnresy

$$Mnresz := 0.9 \cdot Z \cdot fy \quad Mnresz = 2.004 \times 10^3 \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$Mnresy := Mnresz$$

Determinação da resistência a tração:

Resistencia a tração => Ndtres

$$A := 0.037\text{m}^2$$

$$Ndtres := A \cdot 0.9 \cdot fy \quad Ndtres = 8.325 \times 10^3 \text{kN}$$

Determinação da resistência a compressão:

Para a viga com maior solicitação a compressão pode-se determinar a resistência a compressão através de:

$$l := 8.74 \cdot \text{m} \quad K := 0.8 \quad Q := 1 \quad E := 205000\text{MPa}$$

$$I := 0.00259\text{m}^4 \quad r := \sqrt{\frac{I}{A}} \quad r = 0.265 \text{m}$$

$$\lambda := K \cdot \frac{l}{r} \cdot \sqrt{\frac{fy}{\pi^2 \cdot E}} \quad \lambda = 0.294$$

Da tabela 4 da NB14:

$$\rho := 0.988$$

A força resistente pela seção a compressão (Ndcres) é:

$$N_{dcres} := \rho \cdot A \cdot 0.9 \cdot Q \cdot f_y \quad N_{dcres} = 8.225 \times 10^3 \text{ kN}$$

Determinação da força resistente ao cisalhamento (Vn):

$$V_n = \phi A_w (0.55 f_y) \quad \phi = 0.9 ; A_w = 0.5A$$

$$A = 0.037 \text{ m}^2 \quad V_n := 0.248 \cdot A \cdot f_y \quad V_n = 2.294 \times 10^3 \text{ kN}$$

Verificação do elemento 9 a flexotração :

$$\frac{174031 \text{ N}}{N_{dtres}} + \frac{121878 \text{ N} \cdot \text{m}}{M_{nresz}} + \frac{401811 \text{ N} \cdot \text{m}}{M_{nresy}} = 0.282$$

Logo a seção resiste aos esforços de flexotração.

Verificação ao cisalhamento:

$$\frac{\sqrt{(71359 \cdot \text{N})^2 + (20121 \cdot \text{N})^2}}{0.9 \cdot V_n} = 0.036$$

Logo a seção resiste aos esforços de cortante máximo, combinado nas direções z e y.

Diagramas de momentos fletores para o elemento 10:

Diagrama de Momento fletor no eixo y

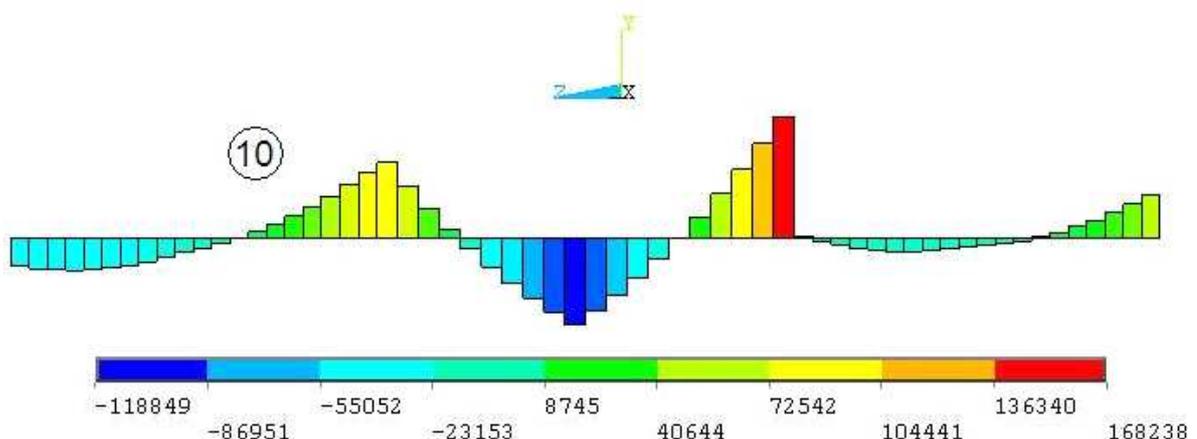


Diagrama de Momento no eixo z:

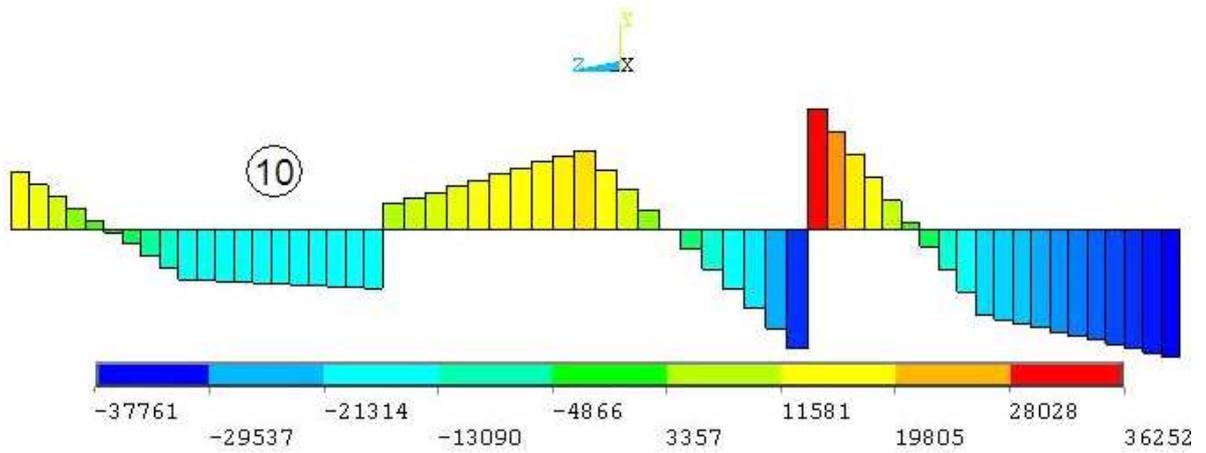


Diagrama de força cisalhante no eixo y

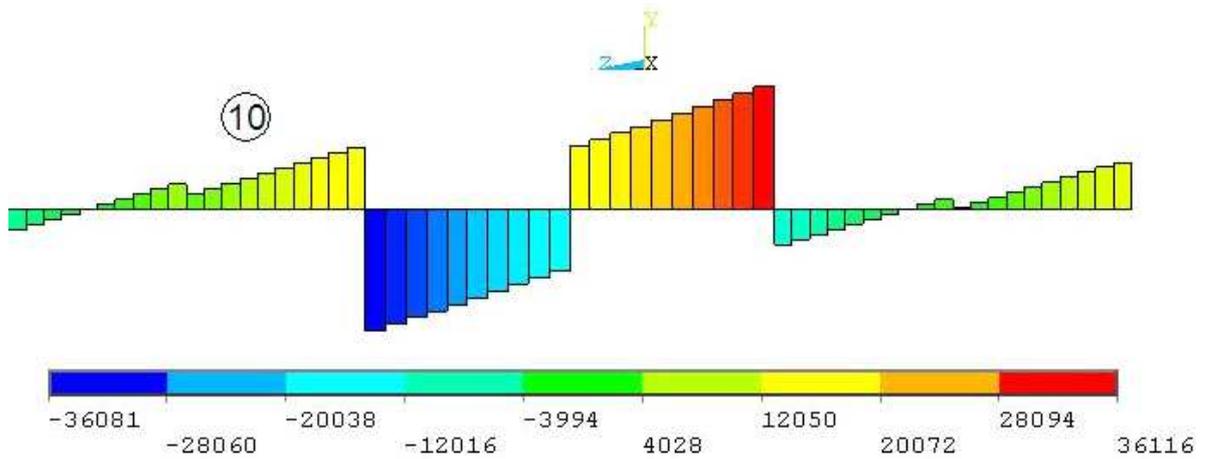
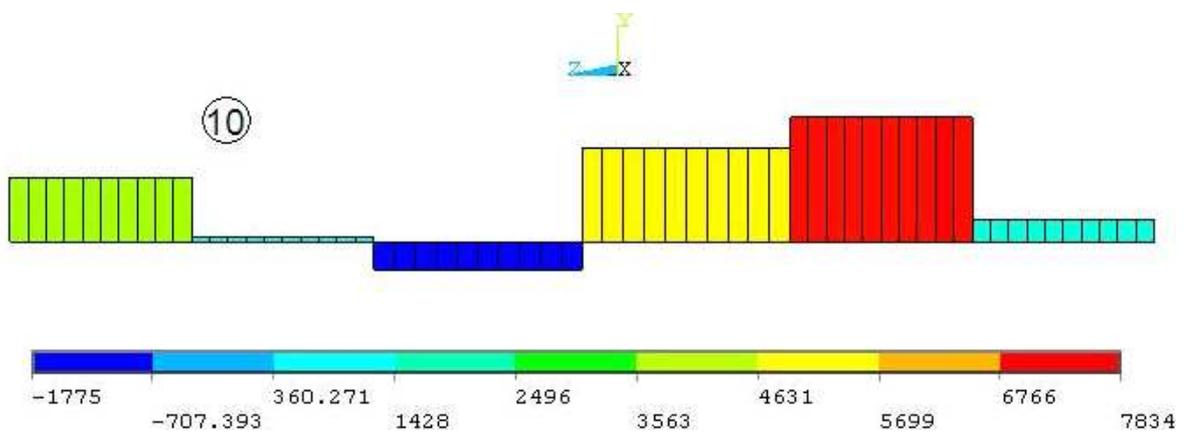
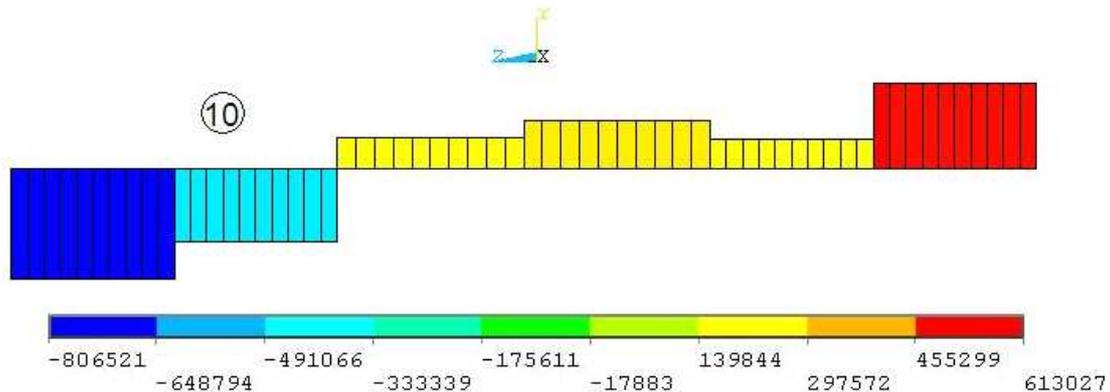


Diagrama de força cisalhante no eixo z:



## Diagrama de esforço Normal



### Flexocompressão:

$$\frac{N_d}{N_{dres}} + \frac{M_{dz}}{M_{nresz}} \cdot \frac{C_{mz}}{1 - \frac{N_d}{0.73N_{crz}}} + \frac{M_{dy}}{M_{nresy}} \cdot \frac{C_{my}}{1 - \frac{N_d}{0.73N_{cry}}}$$

$C_{mz}$  e  $C_{my}$  são o coeficiente de equivalência de momentos e de forma conservativa, podem ser considerados igual a 1.

$N_{crz}$  e  $N_{cry}$  são iguais para este caso e são chamados de carga crítica ou carga de Euler

$$N_{crz} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2} \quad N_{crz} = 6.86 \times 10^4 \text{ kN} \quad N_{cry} := N_{crz}$$

Substituindo os valores dos gráficos apresentados para o elemento 10 na fórmula anterior tem-se:

$$\frac{806.5 \cdot \text{kN}}{N_{dres}} + \frac{21.3 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}{M_{nresz}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{806.5 \cdot \text{kN}}{0.73 \cdot N_{crz}}} + \frac{55.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}{M_{nresy}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{806.5 \text{kN}}{0.73 \cdot N_{cry}}} = 0.137$$

Logo a seção resiste aos esforços de flexocompressão.

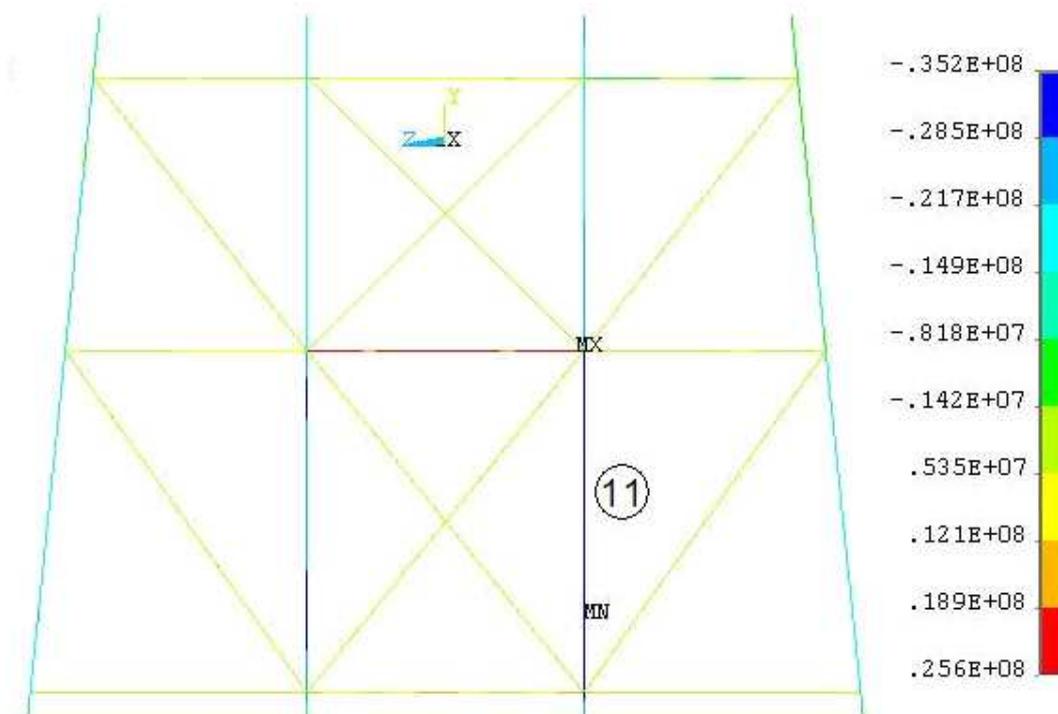
### Verificação ao cisalhamento:

$$\frac{\sqrt{(4028 \cdot N)^2 + (360 \cdot N)^2}}{0.9 \cdot V_n} = 1.959 \times 10^{-3}$$

Logo a seção resiste aos esforços de cortante máximo, combinado nas direções z e y.

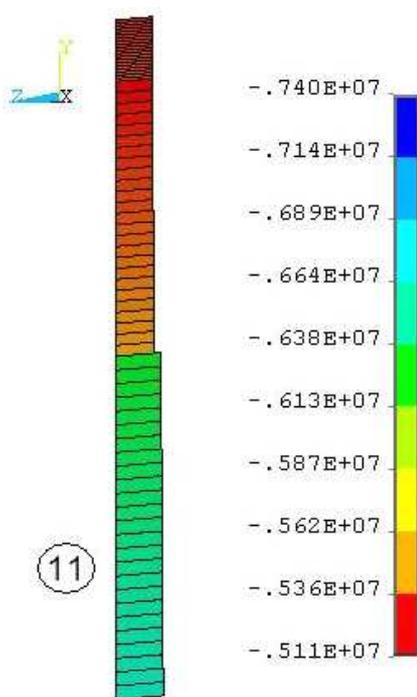
### A.6.3 - Verificação das Pernas (colunas)

Após uma comparação entre as tensões induzidas nas pernas pelas duas ondas (sudeste e sudoeste), combinadas com o vento, peso próprio e as demais cargas, conclui-se que a tensão resultante máxima ocorre durante a incidência do onda na direção sudeste sobre a estrutura. A figura a seguir ilustra a tensão máxima no elemento 11 devida a força de compressão.



A tensão máxima de compressão nas pernas encontra-se em azul sendo o valor de 35.2MPA

Diagrama de esforço normal para o elemento 11:



$$t := 0.044\text{m} \quad h := 1.372\text{m} \quad A_g := 0.185328 \cdot \text{m}^2$$

$$Z := \frac{h^3}{6} \left[ 1 - \left( 1 - 2 \frac{t}{h} \right)^3 \right] \quad Z = 0.078 \text{m}^3$$

Determinação do momento resistente:

$$M_{nresz} := 0.9 \cdot Z \cdot f_y \quad M_{nresz} = 1.747 \times 10^4 \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{nresy} := M_{nresz}$$

Determinação da resistência a tração:

$$N_{dtres} := A_g \cdot 0.9 \cdot f_y \quad N_{dtres} = 4.17 \times 10^4 \text{kN}$$

Determinação da resistência a compressão:

Para a viga com maior solicitação a compressão pode-se determinar a resistência a compressão através de:

$$l := 25.06 \cdot \text{m} \quad K := 0.65 \quad Q := 1 \quad E := 205000 \text{MPa}$$

$$I := 0.040848 \text{m}^4 \quad r := \sqrt{\frac{I}{A_g}} \quad r = 0.265 \text{m} \quad \lambda := K \cdot \frac{l}{r} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 \cdot E}} \quad \lambda = 0.294$$

Da tabela 4 da NB14:

$$\rho := 0.963$$

A força resistente pela seção a compressão é:

$$N_{dcrez} := \rho \cdot A_g \cdot 0.9 \cdot Q \cdot f_y \quad N_{dcrez} = 4.016 \times 10^4 \text{kN}$$

Determinação da força resistente ao cisalhamento:

$$V_n := 0.6 \cdot A_g \cdot 0.5 \cdot f_y$$

$$V_n = 1.39 \times 10^7 \text{N}$$

Verificação do elemento 11 :

Flexocompressão:

Para a seção de máxima tensão, os momentos fletores encontrados foram:

$$M_{dz} := 58.9 \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{dy} := 421.1 \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$N_{crz} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2} \quad N_{crz} = 1.316 \times 10^5 \text{kN}$$

$$\frac{.740 \cdot 10^7 \text{ N}}{N_{dcrz}} + \frac{M_{dz}}{M_{nresz}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{.740 \cdot 10^7 \text{ N}}{0.73 \cdot N_{crz}}} + \frac{M_{dy}}{M_{nresy}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{.740 \cdot 10^7 \text{ N}}{0.73 \cdot N_{cry}}} = 0.216$$

Logo a seção resiste aos esforços de flexocompressão.

#### Verificação ao cisalhamento:

Os valores de cisalhamento obtidos para a seção mais solicitada da perna foram:

$$V_{dz} := 0 \text{ N} \quad V_{dy} := 305 \text{ kN}$$

$$\frac{\sqrt{(V_{dz})^2 + (V_{dy})^2}}{0.9 V_n} = 0.024$$

Logo a seção resiste aos esforços de cortante máximo, combinado nas direções z e y.

#### A.6.4 - Redimensionamento das seções:

Através dos cálculos expostos anteriormente, verificamos que as seções atribuídas a estrutura resistem aos esforços as quais estão submetidas, porém existe uma sobra de resistência. Devido a este fato, serão sugeridos e verificados outros perfis para a estrutura.

##### A.6.4.1 - Verificação dos elementos tracionados

Nesta etapa dos cálculos usaremos perfis com dimensões normalizadas ou retirados do catálogo de fabricantes compatíveis com os esforços.

Elemento 1 - Diâmetro igual a 273.0 mm e espessura igual a 9.3 mm

Elemento 3 - Diâmetro igual a 273.0 mm e espessura igual a 7.8 mm

Elemento 5 - Diâmetro igual a 273.0 mm e espessura igual a 9.3 mm

Elemento 7 - Diâmetro igual a 219.1 mm e espessura igual a 7.9 mm

$$A_g := \begin{pmatrix} 7.684 \times 10^{-3} \\ 6.478 \times 10^{-3} \\ 7.684 \times 10^{-3} \\ 5.242 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \cdot \text{m}^2 \quad \begin{matrix} \text{Elemento (1)} \\ \text{Elemento (3)} \\ \text{Elemento (5)} \\ \text{Elemento (7)} \end{matrix} \quad N_d := \begin{pmatrix} 1510 \\ 1380 \\ 1672.9 \\ 1070 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad \begin{matrix} \text{Elemento (1)} \\ \text{Elemento (3)} \\ \text{Elemento (5)} \\ \text{Elemento (7)} \end{matrix}$$

$$N_{dres} := 0.9 \cdot A_g \cdot f_y \quad N_{dres} = \begin{pmatrix} 1.729 \times 10^3 \\ 1.458 \times 10^3 \\ 1.729 \times 10^3 \\ 1.179 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

Elemento (1)  
Elemento (3)  
Elemento (5)  
Elemento (7)

Como  $N_{dres} > N_d$ , então a seção esta OK

#### A.6.4.2 - Verificação dos elementos sob compressão

Nesta etapa dos cálculos usaremos perfis com dimensões normalizadas ou retirados do catálogo de fabricantes compatíveis com os esforços.

Elemento 2 - Diâmetro 762mm e espessura igual a 12.7mm

Elemento 4 - Diâmetro 508mm e espessura igual a 9.52mm

Elemento 6 - Diâmetro 762mm e espessura igual a 7.92mm

Elemento 8 - Diâmetro 508mm e espessura igual a 6.35mm

Conforme a norma, para elementos de contraventamento de estruturas, considera-se suas extremidades como birrotuladas, sendo  $k = 1$ .

Comprimento "l" do elemento:

$$l := \begin{pmatrix} 32.063 \\ 18.825 \\ 28.754 \\ 18.825 \end{pmatrix} \cdot \text{m}$$

Elemento (2)  
Elemento (4)  
Elemento (6)  
Elemento (8)

$K := 1 \quad Q := 1 \quad E := 205000 \text{ MPa}$

Área a seção transversal

Raio de giração

$$A_g := \begin{pmatrix} .02987 \\ .01492 \\ .01877 \\ .01001 \end{pmatrix} \text{ m}^2$$

Elemento (2)  
Elemento (4)  
Elemento (6)  
Elemento (8)

$$r := \begin{pmatrix} .2649 \\ .1763 \\ .2667 \\ .1773 \end{pmatrix} \text{ m}$$

Elemento (2)  
Elemento (4)  
Elemento (6)  
Elemento (8)

$$\lambda := \begin{pmatrix} K \cdot \frac{l_{0,0}}{r_{0,0}} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 \cdot E}} \\ K \cdot \frac{l_{1,0}}{r_{1,0}} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 \cdot E}} \\ K \cdot \frac{l_{2,0}}{r_{2,0}} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 \cdot E}} \\ K \cdot \frac{l_{3,0}}{r_{3,0}} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 \cdot E}} \end{pmatrix} \quad \lambda = \begin{pmatrix} 1.345 \\ 1.187 \\ 1.198 \\ 1.18 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{Elemento (2)} \\ \text{Elemento (4)} \\ \text{Elemento (6)} \\ \text{Elemento (8)} \end{matrix}$$

Obs: A nomenclatura  $A_{go,o}$  é uma notação matricial. Serve também para as outras nomenclaturas aqui usadas.

Da tabela 4 da norma NB14, para a curva "a" obtem-se:

$$\rho := \begin{pmatrix} 0.456 \\ 0.547 \\ 0.542 \\ .553 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{Elemento (2)} \\ \text{Elemento (4)} \\ \text{Elemento (6)} \\ \text{Elemento (8)} \end{matrix}$$

A força resistente pela seção é:

$$N_{dres} := \begin{pmatrix} \rho_{0,0} \cdot A_{g0,0} \\ \rho_{1,0} \cdot A_{g1,0} \\ \rho_{2,0} \cdot A_{g2,0} \\ \rho_{3,0} \cdot A_{g3,0} \end{pmatrix} \cdot 0.9 \cdot Q \cdot f_y \quad N_{dres} = \begin{pmatrix} 3.065 \times 10^3 \\ 1.836 \times 10^3 \\ 2.289 \times 10^3 \\ 1.245 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{kN} \begin{matrix} \text{Elemento (2)} \\ \text{Elemento (4)} \\ \text{Elemento (6)} \\ \text{Elemento (8)} \end{matrix}$$

$$N_d := \begin{pmatrix} 2980 \\ 1570 \\ 1620.5 \\ 1140 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \begin{matrix} \text{Elemento (2)} \\ \text{Elemento (4)} \\ \text{Elemento (6)} \\ \text{Elemento (8)} \end{matrix}$$

Como  $N_{dres} > N_d$ , então a seção esta OK!

Sendo  $N_{dres}$  igual a resistência da seção a compressão e  $N_d$  a força solicitante.

OBS: Valores de  $N_d$  retirados dos itens A.6.1.1 a A.6.1.2.2

### A.6.4.3 - Verificação dos elementos horizontais

#### A.6.4.3.1 - Verificação do elemento 9

Elemento 9 - Diâmetro 457mm e espessura igual a 12.7 mm

$$t := 12.7 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad h := 0.457 \text{ m}$$

Cálculo do valor do módulo plástico (Z) para o elemento 9:

$$Z := \frac{h^3}{6} \left[ 1 - \left( 1 - 2 \frac{t}{h} \right)^3 \right] \quad Z = 2.508 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Determinação do momento resistente:

Momento resistente de cálculo no eixo Z => Mnresz

Momento resistente de cálculo no eixo Y => Mnresy

$$Mnresz := 0.9 \cdot Z \cdot fy \quad Mnresz = 564.231 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Mnresy := Mnresz$$

Determinação da resistência a tração:

Resistencia a tração => Ndtres

$$A := 0.01774 \text{ m}^2$$

$$Ndtres := A \cdot 0.9 \cdot fy \quad Ndtres = 3.992 \times 10^3 \text{ kN}$$

Determinação da resistência a compressão:

Para a viga com maior solicitação a compressão pode-se determinar a resistência a compressão através de:

$$l := 8.74 \cdot \text{m} \quad K := 0.8 \quad Q := 1 \quad E := 205000 \text{ MPa}$$

$$I := 0.00259 \text{ m}^4 \quad r := \sqrt{\frac{I}{A}} \quad r = 0.382 \text{ m} \quad r := .1572$$

$$\lambda := K \cdot \frac{l}{r} \cdot \sqrt{\frac{fy}{\pi^2 \cdot E}} \quad \lambda = 0.494 \text{ m}$$

Da tabela 4 da NB14:

$$\rho := 0.926$$

A força resistente pela seção a compressão (Ndcres) é:

$$Ndcres := \rho \cdot A \cdot 0.9 \cdot Q \cdot fy \quad Ndcres = 3.696 \times 10^3 \text{ kN}$$

Determinação da força resistente ao cisalhamento (Vn):

$$V_n = \phi A_w (0.55 f_y) \quad \phi = 0.9 ; A_w = 0.5A$$

$$A = 0.018 \text{ m}^2 \quad V_n := 0.248 \cdot A \cdot f_y \quad V_n = 1.1 \times 10^3 \text{ kN}$$

Verificação do elemento 9 a flexotração :

$$\frac{174031 \text{ N}}{N_{dres}} + \frac{121878 \text{ N} \cdot \text{m}}{M_{nresz}} + \frac{401811 \text{ N} \cdot \text{m}}{M_{nresy}} = 0.972$$

Logo a seção resiste aos esforços de flexotração.

Verificação ao cisalhamento:

$$\frac{\sqrt{(71359 \cdot \text{N})^2 + (20121 \cdot \text{N})^2}}{0.9 \cdot V_n} = 0.075$$

Logo a seção resiste aos esforços de cortante máximo, combinado nas direções z e y.

A.6.4.3.2 - Verificação do elemento 10

Elemento 10 - Diâmetro 457mm e espessura igual a 12.7 mm

$$t := 6.35 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad h := 0.406 \text{ m}$$

Cálculo do valor do módulo plástico (Z) para o elemento 10:

$$Z := \frac{h^3}{6} \left[ 1 - \left( 1 - 2 \frac{t}{h} \right)^3 \right] \quad Z = 1.014 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Determinação do momento resistente:

Momento resistente de cálculo no eixo Z =>  $M_{nresz}$

Momento resistente de cálculo no eixo Y =>  $M_{nresy}$

$$M_{nresz} := 0.9 \cdot Z \cdot f_y \quad M_{nresz} = 228.219 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{nresy} := M_{nresz}$$

Determinação da resistência a compressão:

Para a viga com maior solicitação a compressão pode-se determinar a resistência a compressão através de:

$$l := 8.74 \cdot \text{m} \quad K := 0.8 \quad Q := 1 \quad E := 205000 \text{ MPa} \quad A := 0.00798 \text{ m}^2$$

$$I := 1.5983 \times 10^{-4} \text{ m}^4 \quad r := \sqrt{\frac{I}{A}} \quad r = 0.142 \text{ m}$$

$$\lambda := K \cdot \frac{1}{r} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 \cdot E}} \quad \lambda = 0.549$$

Da tabela 4 da NB14:

$$\rho := 0.904$$

A força resistente pela seção a compressão (Ndcres) é:

$$N_{dcres} := \rho \cdot A \cdot 0.9 \cdot Q \cdot f_y \quad N_{dcres} = 1.623 \times 10^3 \text{ kN}$$

Determinação da força resistente ao cisalhamento (Vn):

$$\phi = 0.9 ; A_w = 0.5A \quad V_n = \phi A_w (0.55 f_y)$$

$$A = 7.98 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_n := 0.248 \cdot A \cdot f_y \quad V_n = 494.76 \text{ kN}$$

Flexocompressão:

$$\frac{N_d}{N_{dres}} + \frac{M_{dz}}{M_{nresz}} \cdot \frac{C_{mz}}{1 - \frac{N_d}{0.73 N_{crz}}} + \frac{M_{dy}}{M_{nresy}} \cdot \frac{C_{my}}{1 - \frac{N_d}{0.73 N_{cry}}}$$

C<sub>mz</sub> e C<sub>my</sub> são o coeficiente de equivalencia de momentos e de forma conservativa podem ser considerados igual a 1.

N<sub>crz</sub> e N<sub>cry</sub> são iguais para este caso e são chamados de carga crítica ou carga de Euler

$$N_{crz} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2} \quad N_{crz} = 4.233 \times 10^3 \text{ kN} \quad N_{cry} := N_{crz}$$

Substituindo os valores dos gráficos apresentados, para o elemento 10, na fórmula anterior tem-se:

$$\frac{806.5 \cdot \text{kN}}{N_{dres}} + \frac{21.3 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}{M_{nresz}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{806.5 \cdot \text{kN}}{0.73 \cdot N_{crz}}} + \frac{55.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}{M_{nresy}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{806.5 \text{kN}}{0.73 \cdot N_{cry}}} = 0.952$$

Verificação ao cisalhamento:

$$\frac{\sqrt{(4028 \cdot \text{N})^2 + (360 \cdot \text{N})^2}}{0.9 \cdot V_n} = 9.082 \times 10^{-3}$$

Logo a seção resiste aos esforços de cortante máximo, combinado nas direções z e y.

#### A.6.4.4 - Verificação das Pernas (colunas):

ELEMENTO 11 - Diâmetro igual a 762mm e espessura igual a 16 mm

$$t := 16 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad h := .762 \text{ m} \quad A_g := 0.03 \cdot \text{m}^2$$

$$Z := \frac{h^3}{6} \left[ 1 - \left( 1 - 2 \frac{t}{h} \right)^3 \right] \quad Z = 8.906 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Determinação do momento resistente:

$$\begin{aligned} M_{nresz} &:= 0.9 \cdot Z \cdot f_y & M_{nresz} &= 2.004 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m} \\ M_{nresy} &:= M_{nresz} \end{aligned}$$

Determinação da resistência a tração:

$$N_{dtres} := A_g \cdot 0.9 \cdot f_y \quad N_{dtres} = 6.75 \times 10^3 \text{ kN}$$

Determinação da resistência a compressão:

Para a viga com maior solicitação a compressão pode-se determinar a resistência a compressão através de:

$$l := 25.06 \text{ m} \quad K := 0.65 \quad Q := 1 \quad E := 205000 \text{ MPa}$$

$$I := 2.6 \times 10^{-3} \text{ m}^4 \quad r := \sqrt{\frac{I}{A_g}} \quad r = 0.294 \text{ m} \quad \lambda := K \cdot \frac{l}{r} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 \cdot E}} \quad \lambda = 0.615$$

Da tabela 4 da NB14:

$$\rho := 0.881$$

A força resistente pela seção a compressão é:

$$N_{dcres} := \rho \cdot A_g \cdot 0.9 \cdot Q \cdot f_y \quad N_{dcres} = 5.947 \times 10^3 \text{ kN}$$

Determinação da força resistente ao cisalhamento:

$$V_n := 0.6 \cdot A_g \cdot 0.5 \cdot f_y$$

$$V_n = 2.25 \times 10^6 \text{ N}$$

Verificação do elemento 11 :

Flexocompressão:

Para a seção de máxima tensão, os momentos fletores encontrados foram:

$$M_{dz} := 58.9 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad M_{dy} := 421.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$N_{crz} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2} \quad N_{crz} = 8.377 \times 10^3 \text{ kN}$$

$$\frac{.740 \cdot 10^7 \text{ N}}{N_{dres}} + \frac{M_{dz}}{M_{nresz}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{.740 \cdot 10^7 \text{ N}}{0.73 \cdot N_{crz}}} + \frac{M_{dy}}{M_{nresy}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{.740 \cdot 10^7 \text{ N}}{0.73 \cdot N_{cry}}} = 0.954$$

Logo a seção resiste aos esforços de flexocompressão.

Verificação ao cisalhamento:

Os valores de cisalhamento obtidos para a seção mais solicitada da perna foram:

$$V_{dz} := 0 \text{ N} \quad V_{dy} := 305 \text{ kN}$$

$$\frac{\sqrt{(V_{dz})^2 + (V_{dy})^2}}{0.9 V_n} = 0.151$$

Logo a seção resiste aos esforços de cortante máximo, combinado nas direções z e y.