

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Gabriel Lopes Decusati**

**PROJETO DE SILOS DE CONCRETO ARMADO:  
ARMAZENAMENTO DE *PELLETS* DE MADEIRA**

Porto Alegre  
julho 2017

**GABRIEL LOPES DECUSATI**

**PROJETO DE SILOS DE CONCRETO ARMADO:  
ARMAZENAMENTO DE *PELLETS* DE MADEIRA**

Trabalho de Diplomação aprovado pelo Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Roberto Domingo Rios**

Porto Alegre  
julho 2017

**GABRIEL LOPES DECUSATI**<sup>só</sup>

**PROJETO DE SILOS DE CONCRETO ARMADO: ARMAZENAMENTO  
DE *PELLETS* DE MADEIRA**

Trabalho de Diplomação aprovado pelo Departamento de Engenharia Civil da  
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como  
parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Porto Alegre, julho de 2017

Prof. Roberto Domingo Rios  
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientador

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Roberto Domingo Rios**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. João Ricardo Masuero**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Profa. Virgínia Maria Rosito d'Ávila Bessa**  
Dra. pela universidade Federal do Rio Grande do Sul

## RESUMO

Com a crescente expansão da produção agrícola, houve a necessidade de aumentar as dimensões e capacidade dos silos construídos. Entretanto, hoje o armazenamento em silos não está restringido a produtos agrícolas, compreendendo uma enorme variedade de produtos, como por exemplo *pellets* de madeira, o material utilizado como base neste trabalho. Para o correto armazenamento de produtos, é necessário que a estrutura seja estanque, com capacidade de manter o produto a uma certa temperatura. Estruturas de concreto armado, quando bem dimensionado, pode idealmente atender as necessidades da estocagem. Dessa forma, este trabalho propõe o dimensionamento de um silo cilíndrico em concreto armado, esbelto e com tremonha cônica, de modo a fornecer as características ideais para a estocagem de *pellets* de madeira.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dimensões dos silos em planta .....	9
Figura 2 – Dimensões e excentricidades dos silos em corte.....	9
Figura 3 – Forma dos tipos de fluxo em um silo .....	1
Figura 4 - Mapa de isopletas.....	6
Figura 5 - Ângulo de incidência do vento .....	20
Figura 6 - Pressões simétricas de enchimento no segmento de parede vertical .....	8
Figura 7 - Vista em planta e elevação das cargas locais – paredes espessas.....	31
Figura 8 - Distribuição de pressões de enchimento nas tremonhas.....	41
Figura 9 - Distribuição de pressões de esvaziamento nas tremonhas.....	41
Figura 10 - Gráfico para determinação de fluxos em tremonhas. ....	44
Figura 11 – Representação esquemática em corte do silo. ....	44
Figura 12 – Pressões de enchimento do silo.....	48
Figura 13 – Pressões de esvaziamento do silo. ....	48
Figura 14 – Coeficientes de pressão devido a ação do vento .....	49
Figura 15 – Momento na direção X na cobertura kNm/m .....	53
Figura 16 – Momento na direção Y na cobertura kNm/m.....	53
Figura 17 – Armaduras da cobertura. ....	54
Figura 18 – Croqui demonstrando as direções de $N_{xx}$ e $N_{yy}$ .....	55
Figura 19 – a) Diagramas de $N_{xx}$ nas paredes em kN/m e .....	55
Figura 19 - b) Ampliação no trecho com maiores valores .....	55

Figura 20 – a) Diagramas de $N_{yy}$ nas paredes em kN/m .....	56
Figura 20 –b) Ampliação no trecho com maiores valores .....	56
Figura 21 – Localização do corte A-A' na parede do silo .....	59
Figura 22 – Corte A-A .....	59
Figura 23 – Detalhamento da armadura em vista superior da parede. ....	60
Figura 24 – Diagramas de $F_{xx}$ na tremonha em kN/m.....	61
Figura 25 – Diagramas de $F_{yy}$ na tremonha em kN/m.....	61
Figura 26 – Disposição das armaduras em planta .....	62
Figura 27 – Disposição das armaduras em corte .....	63
Figura 28 – Momento fletor negativo e positivo máximo kNm (Pilar indicado na figura).....	64
Figura 29 – Esforço cortante máximo kN (Pilar indicado na figura) .....	64
Figura 30 – Momento de torção máximo kNm (Pilar indicado na figura). ....	64
Figura 31 – Armaduras das vigas e estribos. ....	66
Figura 32– a) Diagramas de momento fletor em kNm. ....	67
Figura 32 - b) Esforço normal nos pilares em kN .....	67
Figura 33 – Diagrama de interação N,Mx e My dos pilares.....	68
Figura 34 – Armaduras das pilares e estribos.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Peso específico de “pellets” de madeira .....	13
Tabela 2 – Ângulo de atrito de “pellets” de madeira.....	13
Tabela 3 – Ângulo de atrito de “pellets” de madeira em relação às paredes de concreto .....	14
Tabela 4 – Fator S2.....	18
Tabela 5 – Fator S3.....	19
Tabela 6 – Fator Cpe .....	21
Tabela 7 – Classificação recomendada de silos para Classes de Avaliação de Carga .....	25
Tabela 8 – Valores característicos para serem usados em diferentes Classes de Avaliação de Cargas .....	26
Tabela 9 – Coeficientes utilizados nas combinações.....	46
Tabela 10 – Pressões de enchimento e esvaziamento do silo.. ..	47
Tabela 11 – Combinações utilizadas no cálculo estrutural .....	49
Tabela 12 – Legendas e significados das siglas.. ..	51
Tabela 13 – Áreas de aço e quantidade de barras.....	65

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>DIRETRIZES DA PESQUISA .....</b>	<b>6</b>
2.1	QUESTÃO DA PESQUISA.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
2.2	OBJETIVOS DA PESQUISA .....	6
2.3	PRESSUPOSTO .....	6
2.4	LIMITAÇÕES.....	6
2.5	DELINEAMENTO .....	6
<b>3</b>	<b>SILOS.....</b>	<b>8</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS SILOS .....	8
3.1.1	<i>Geometria do silo.....</i>	<i>9</i>
3.1.2	<i>Forma do fluxo de descarga .....</i>	<i>10</i>
3.1.3	<i>Tipos de fundo.....</i>	<i>11</i>
<b>4</b>	<b>“PELLETS” DE MADEIRA .....</b>	<b>12</b>
4.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	12
4.1.1	<i>Peso específico.....</i>	<i>12</i>
4.1.2	<i>Ângulo de Atrito interno .....</i>	<i>13</i>
4.1.3	<i>Ângulo de atrito em relação às paredes .....</i>	<i>14</i>
<b>5</b>	<b>CARREGAMENTOS.....</b>	<b>15</b>
5.1	PESO PRÓPRIO DA ESTRUTURA .....	15
5.2	PESO DOS EQUIPAMENTOS .....	15
5.3	AÇÕES DO VENTO NA ESTRUTURA.....	16
5.4	PRESSÕES CAUSADAS PELO MATERIAL ARMAZENADO.....	22
5.4.1	<i>Condições de aplicabilidade da EN 1991-4/2006 .....</i>	<i>22</i>
5.4.2	<i>Classes de Avaliação de Cargas.....</i>	<i>23</i>
5.4.3	<i>Situações de projeto.....</i>	<i>24</i>
5.4.4	<i>Propriedades dos sólidos particulados.....</i>	<i>26</i>
5.4.5	<i>Carregamentos nas paredes verticais do silo.....</i>	<i>26</i>
5.4.6	<i>Carregamentos no fundo do silo.....</i>	<i>34</i>
5.5	CARGAS TÉRMICAS.....	42
<b>6</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE PROJETO DO SILO .....</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>COMBINAÇÕES DE CARGAS APLICADAS.....</b>	<b>46</b>
<b>8</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA .....</b>	<b>52</b>

8.1	COBERTURAS .....	52
8.2	PAREDES .....	54
8.3	TREMONHA .....	59
8.4	VIGAS.....	62
8.5	PILARES.....	64
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda energética, novas fontes de energia alternativas ao uso de combustíveis fósseis tem ganhado espaço, sendo que, de acordo com Speight (2008), a utilização de biomassa corresponde a cerca de 14% da produção energética mundial. A produção de *pellets* - madeira processada e altamente comprimida derivada de subprodutos como serragem - necessita ser estocada para posteriormente transportá-la. Devido a sua natureza inflamável, deve-se proporcionar um ambiente no qual se possua um controle adequado sobre as variações de temperatura e umidade.

Considerando as necessidades relacionadas ao armazenamento de *pellets*, observa-se que, para obter um controle térmico mais eficiente, deve-se optar por um material que possua baixa condutividade térmica além de apresentar estanqueidade para evitar o aumento da umidade. Segundo Safarian e Harris (1985), o concreto apresenta características ideais para a construção de silos, como a facilidade de ser moldado em diversas formas, além de ser um material quimicamente inerte. Silos de concreto também são menos propensos a flambagem, devido à necessidade de maiores espessuras de paredes.

Entretanto, existem algumas desvantagens no emprego do concreto armado, entre elas o grande peso da estrutura, que gerará solicitações maiores nas fundações, a suscetibilidade à fissuração, exigindo mais rigor no cálculo e detalhamento da armadura necessária.

Desse modo, este trabalho tem por finalidade a apresentação de um projeto estrutural de um silo de concreto armado para o armazenamento de *pellets* de madeira, que atenda a todos os critérios de segurança adotados e que garanta o armazenamento correto do produto.

## 2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para o desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### 2.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo principal da pesquisa é a apresentação de um projeto de silo em concreto armado para estocagem de *pellets* de madeira.

### 2.2 PRESSUPOSTO

É pressuposto válido para o trabalho todos os métodos de cálculo e informações apresentadas em:

- a) BS EN 1991-4/2006 Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks;
- b) NBR 6123/1988: Forças devidas ao Vento em Edificações;
- c) NBR 6118/2014: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.

### 2.3 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- d) Não serão contemplados os cálculos e dimensionamento das fundações;
- e) A localização do silo na cidade de Rio Grande no Estado do Rio Grande do Sul;
- f) O projeto só será válido para o armazenamento de *pellets* de madeira;
- g) A utilização do software Robot Structural Analysis Professional 2016 para análise estrutural através do método dos elementos finitos.

### 2.4 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado com base nas etapas a seguir, também descritas nos próximos parágrafos:

- a) Pesquisa bibliográfica;

- b) Concepção estrutural;
- c) Definição do modelo estrutural;
- d) Análise estrutural;
- e) Dimensionamento da estrutura;
- f) Detalhamento da estrutura;
- g) Análise dos resultados;
- h) Conclusões.

A pesquisa bibliográfica acompanhará todas as etapas do estudo contemplando os assuntos relativos ao projeto. O objetivo da pesquisa bibliográfica é manter o estudo coeso, auxiliando a determinar os diversos fatores que influenciam no dimensionamento da estrutura, como as características do material a ser estocado, origem e magnitude dos carregamentos devido ao vento e devido ao esvaziamento e enchimento do silo.

Na concepção estrutural do silo serão estudadas os formatos de silos de concreto armado mais empregados e posteriormente determinado as dimensões que satisfazem a capacidade de armazenamento necessária.

Durante a análise estrutural será utilizado o software Robot Structural Analysis Professional 2016 que, através do método dos elementos finitos e com base nas normas BS EN 1991-4/2006 Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks, a NBR 6123/1988: Forças devidas ao Vento em Edificações e a NBR 6118/2014: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, determinará os carregamentos que serão submetidos à estrutura.

O dimensionamento da estrutura e o detalhamento de suas peças serão feitos de acordo com a NBR 6118/2014: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.

### 3 SILOS

A Norma BS EN 1991-4/2006 Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 14, tradução nossa) define silos como estruturas de contenção utilizadas para armazenar sólidos particulados.

De acordo com Safarian e Harris (1985, p. 1, tradução nossa):

Na metade dos anos 1800 que se construíram containers relativamente grandes para uso comercial. Desde então, os silos têm um uso extensivo, não somente para armazenar grãos, mas também uma vasta gama de materiais granulares. Na indústria e na agricultura, métodos de produção mais eficientes e a mecanização abriram caminho para grandes complexos de armazenamento, com sofisticados sistemas para carga e descarga.

Como exemplificado por Safarian e Harris, os silos possuem grande importância para a indústria, sendo utilizados em larga escala para a estocagem de diferentes materiais.

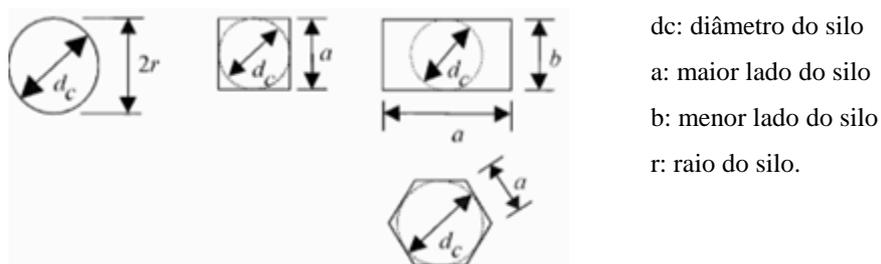
#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SILOS

Segundo a BS EN 1991-4/2006 Eurocode 1 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006 p. 40, tradução nossa) pode-se caracterizar os silos de acordo com os seguintes aspectos:

- a) Geometria do silo;
- b) Forma do fluxo de descarga;
- c) Tipos de fundo.

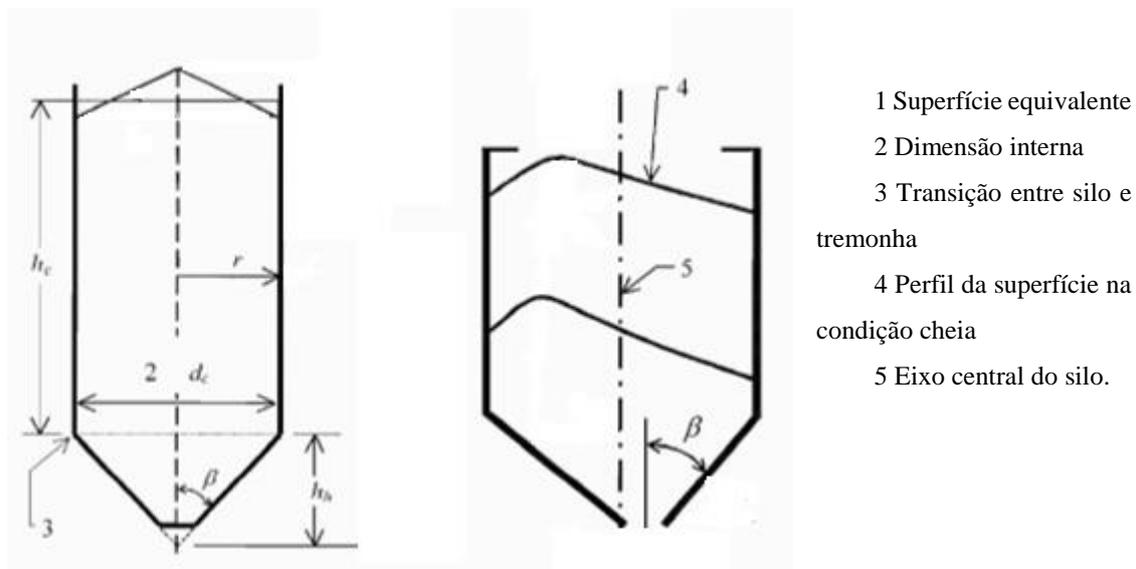
As dimensões características para a caracterização dos silos encontram-se referenciados nas figuras 1 e 2.

Figura 1 – Dimensões dos silos em planta



(fonte: adaptado de EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 9)

Figura 2 – Dimensões dos silos em corte



(fonte: adaptado de EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 9)

### 3.1.1 Geometria do silo

De acordo com a BS EN 1991-4/2006 Eurocode 1 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006 p. 40, tradução nossa) a geometria dos silos pode ser classificada de acordo com as seguintes classes:

- a) Esbeltos, onde  $h_c/d_c > 2,0$ ;
- b) Medianamente esbeltos, onde  $1,0 < h_c/d_c < 2,0$ ;
- c) Entroncados, onde  $0,4 < h_c/d_c < 1,0$ ;
- d) Retentores, os quais possuem fundo plano e  $h_c/d_c < 0,4$ .

### 3.1.2 Forma do fluxo de descarga

A BS EN 1991-4/2006 Eurocode 1 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006 p. 27, tradução nossa) adota os seguintes padrões de descarga:

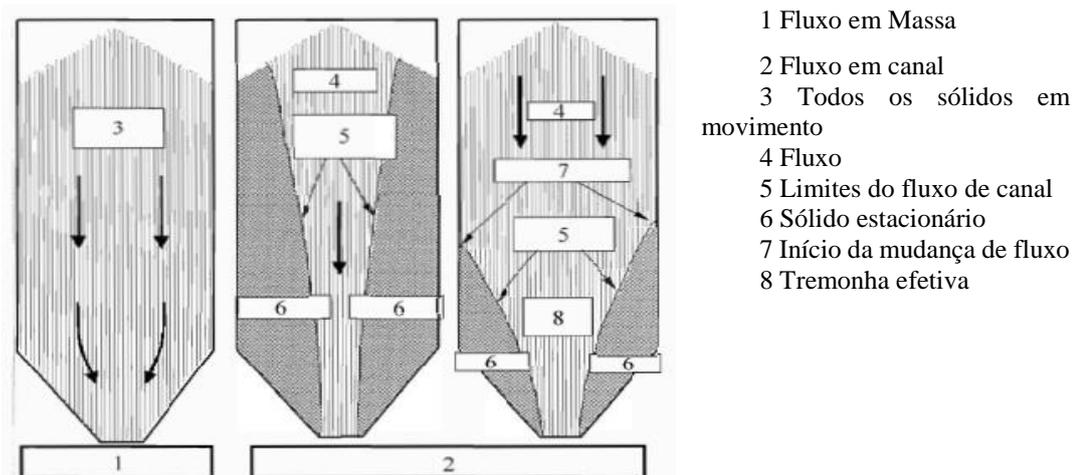
- a) Em massa;
- b) Em canal;
- c) Misto.

Sendo que de acordo com Safarian e Harris (1985, p. 18, tradução nossa), estes fluxos são descritos como:

- a) Em massa: ocorre quando todos os sólidos fluem em direção à descarga, sem zonas de estagnação. Existem apenas em silos nos quais o fundo é suficientemente liso e íngreme.
- b) Em canal: é aquele em que os sólidos fluem em direção à descarga através de um canal, apresentando zonas de estagnação. Ocorrem em silos nos quais o fundo não é suficientemente íngreme ou liso.
- c) Misto: é a combinação do fluxo em canal e fluxo em massa, na qual parte do sistema opera em fluxo de massa e parte do sistema opera em canal.

Na figura 3 são ilustrados os fluxos descritos.

Figura 3 – Forma dos tipos de fluxo em um silo



(fonte: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 27)

### 3.1.3 Tipos de fundo

A construção de silos pode empregar tanto fundos planos quanto inclinados (tremonhas). De acordo com a BS EN 1991-4/2006 Eurocode 1 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006 p. 66, tradução nossa), fundos planos são aqueles a inclinação horizontal possui valores inferiores a  $5^\circ$  ( $\alpha \leq 5^\circ$ ). Da mesma forma, as tremonhas são divididas em íngremes e rasas, sendo íngremes as que satisfazem a equação:

$$\tan \beta < \frac{1-K}{2\mu} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

$K$  = menor valor característico da pressão lateral nas paredes verticais;

$\beta$  = inclinação da tremonha;

$\mu$  = menor valor característico para atrito lateral nas paredes da tremonha.

Já as tremonhas rasas são aquelas as quais não se enquadram nos critérios de fundos planos nem de tremonhas íngremes.

## 4 “PELLETS” DE MADEIRA

De acordo com Garcia (2010, p.18)

Os “pellets” de madeira são pequenas pelotas cilíndricas de madeira, compactadas e densas. [...]. Sua principal aplicação é no aquecimento comercial ou residencial de ambientes, mas também pode ser utilizado como combustível para geração de energia elétrica em plantas industriais ou, até mesmo, em usinas termoelétricas.

Garcia (2010, p.21) também cita

Os “pellets” de madeira geralmente são feitos com resíduos da indústria madeireira tais como: a serragem, maravalhas, aparas, cavacos, galhos e resíduos agroindustriais. Essa matéria-prima é processada nas plantas industriais estacionárias e, com alta pressão e temperatura, são comprimidos no formato de pequenos cilindros de 6,0 a 10,0 mm de diâmetro.

Conforme afirmam M.R. Wu, D.L. Schott, G. Lodewijks (2011, tradução nossa), o crescente mercado internacional de biomassa necessita grandes instalações de armazenamento e manuseio do produto, com a finalidade de regularizar o fluxo importação e exportação, superando as possíveis inconsistências de fornecimento.

Dessa forma, é necessário o conhecimento das características físicas dos “pellets” de madeira para o correto dimensionamento de uma estrutura armazenadora.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

As características físicas foram definidas a partir dos resultados obtidos por Wu, Schott, Lodewijks.

#### 4.1.1 Peso específico

O peso específico dos “pellets” de madeira encontra-se na tabela 1.

Tabela 1 – Peso específico de “pellets” de madeira

<b>Material</b>	<b>Peso específico Máximo (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso específico Mínimo (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso específico médio (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>“Pellets” de madeira de 6mm (diâmetro)</b>	629	583	609
<b>“Pellets” de madeira de 8mm (diâmetro)</b>	649	588	621
<b>“Pellets” de madeira de 12mm (diâmetro)</b>	528	498	510

(Fonte: M.R. Wu, D.L. Schott, G. Lodewijks, 2011, tradução nossa)

#### 4.1.2 Ângulo de Atrito interno

O ângulo de atrito interno dos “pellets” de madeira encontra-se na tabela 2.

Tabela 2 – Ângulo de atrito de “pellets” de madeira

<b>Material</b>	<b>Ângulo de atrito interno máximo (°)</b>	<b>Ângulo de atrito interno mínimo (°)</b>	<b>Ângulo de atrito interno médio (°)</b>
<b>“Pellets” de madeira de 6mm (diâmetro)</b>	38	35	37
<b>“Pellets” de madeira de 8mm (diâmetro)</b>	43	38	41
<b>“Pellets” de madeira de 12mm (diâmetro)</b>	37	33	35

(Fonte: M.R. Wu, D.L. Schott, G. Lodewijks, 2011, tradução nossa)

### 4.1.3 Ângulo de atrito em relação às paredes

O ângulo de atrito em relação às paredes é extremamente importante para determinar a situação do material em contato com os diferentes tipos de superfície. Os valores para os ângulos de atrito em relação às paredes de concreto encontram-se na tabela 3.

Tabela 3 – Ângulo de atrito de “pellets” de madeira em relação às paredes de concreto

<b>Material</b>	<b>Ângulo de atrito máximo (°)</b>	<b>Ângulo de atrito mínimo (°)</b>	<b>Ângulo de atrito médio (°)</b>
<b>“Pellets” de madeira de 6mm (diâmetro)</b>	32	30	31
<b>“Pellets” de madeira de 8mm (diâmetro)</b>	35	31	33
<b>“Pellets” de madeira de 12mm (diâmetro)</b>	31	29	30

(Fonte: M.R. Wu, D.L. Schott, G. Lodewijks, 2011, tradução nossa)

## 5 CARREGAMENTOS

Para o dimensionamento de silos, deve-se levar em consideração os seguintes carregamentos:

- a) Peso próprio da estrutura;
- b) Peso de equipamentos utilizados;
- c) Ações do vento na estrutura;
- d) Pressões causadas pelos materiais armazenados;
- e) Cargas térmicas.

Neste capítulo será discutida a metodologia empregada para obter valores dos carregamentos utilizados no dimensionamento de um silo de concreto.

### 5.1 PESO PRÓPRIO DA ESTRUTURA

Segundo Safarian e Harris (1985, p. 65, tradução nossa), o peso próprio inclui o peso do silo – paredes, telhado, vigas, tremonha - os quais estão inclusos escadarias internas e externas, bem como plataformas de serviços, além de equipamentos instalados no telhado, com coletores de poeira e esteiras. Grande parte desse peso próprio é estimado nas fases iniciais do projeto de um silo, baseando-se em valores de peso específico dos materiais empregados.

### 5.2 PESO DOS EQUIPAMENTOS

Em relação ao peso dos equipamentos, Safarian e Harris (1985, p. 67, tradução nossa) comentam que os fabricantes devem ser capazes de prever o carregamento que o equipamento vai impor, entretanto, caso ele esteja vibrando, mudanças podem acontecer em outros carregamentos. A vibração de equipamentos pode afetar o silo completamente. Paredes, até mesmo de concreto, podem oscilar devido a vibração dos equipamentos instalados no telhado. A vibração pode ocasionar, por exemplo, a compactação do material armazenado, aumentando sua densidade e alterando as características do fluxo de descarga, resultando em mudanças nas pressões laterais e verticais nas paredes do silo. Dessa forma, se equipamentos vibratórios forem utilizados, é indicado considerá-los no projeto do silo.

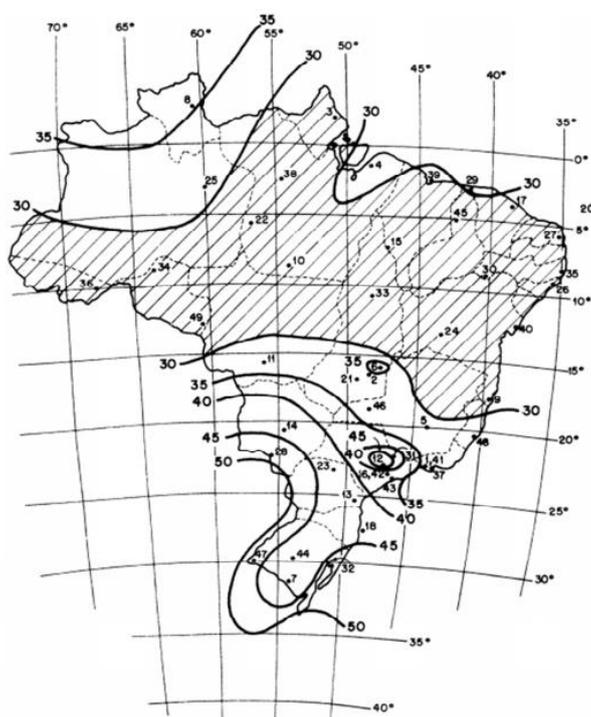
### 5.3 AÇÕES DO VENTO NA ESTRUTURA

Safarian e Harris (1985, p. 67) afirmam que todos os silos devem ser projetados para resistir os efeitos de tombamento causados por ventos, principalmente quando envolvem grupos de silos ou silos esbeltos. Também salienta que os efeitos das ações do vento afetam a estabilidade de silos vazios. Entretanto, a ação do vento em silos cheios aumenta as pressões nas fundações.

O procedimento para cálculo das solicitações causadas pelo vento é regido pela NBR 6123/1988: Forças devidas ao vento em edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988).

Inicialmente, determina-se o valor da velocidade básica do vento  $V_o$ , através da figura 4.

Figura 4 – Mapa de isopletas



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988 p.6)

O fator topográfico  $S_f$  leva em consideração as variações do relevo do terreno e é determinado do seguinte modo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988. p.6):

- a) Para terrenos planos ou fracamente acidentados:  $S_f = 1,0$ ;

- b) Taludes e morros alongados são calculados em função a variação da altura medida a partir da superfície do terreno, relacionando a diferença de cotas e a inclinação média do talude.
- c) Vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção:  $S_I = 0,9$ .

O fator  $S_2$  considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação de velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração. Para os fins deste Norma, a rugosidade do terreno é classificada em cinco categorias (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988. p.8):

- a) categoria 1: superfícies lisas de grandes dimensões (mares calmos, lagos e rios);
- b) categoria 2: terrenos abertos em nível com poucos obstáculos isolados (zonas costeiras planas, pradarias, fazendas sem sebes ou muros);
- c) categoria 3: terrenos planos ou ondulados com obstáculos (fazendas com sebes e muros, subúrbio com casas baixas e esparsas);
- d) categoria 4: terrenos cobertos por numerosos obstáculos (zonas de parques com muitas árvores, pequenas cidades);
- e) categoria 5: terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados (florestas, centro de grandes cidades, complexos industriais).

Para obter o valor de  $S_2$  também é necessário classificar a edificação de acordo com suas dimensões. Desse modo, as edificações são classificadas de acordo com as seguintes classes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988. p.9):

- a) classe A: todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estrutura sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20m.
- b) classe B: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.
- c) classe C: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

Na tabela 4 encontram-se os valores de  $S_2$

Tabela 4 – Fator  $S_2$ 

z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤5	1,06	1,04	1,1	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,1	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988 p.10)

O fator estatístico  $S_3$  considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Sendo definido na tabela 5 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988. p.6).

Tabela 5 – Fator  $S_3$ 

Grupo	Descrição	$S_3$
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode after a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações insdustriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988 p.10)

A velocidade característica  $V_k$  e a pressão dinâmica  $q$  são calculadas através das formulas 2 e 3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988. p.4).

$$V_k = V_o S_1 S_2 S_3 \quad (\text{fórmula 2})$$

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

$V_k$  = velocidade característica do vento (m/s);

$V_o$  = velocidade básica do vento (m/s);

$S_1$  = fator topográfico;

$S_2$  = fator de rugosidade do terreno, variação de velocidade do vento em função da altura e dimensões da construção

$S_3$  = fator que considera o uso da construção e a segurança necessária a tal uso;

$q$  = pressão dinâmica atuante na estrutura (N/m<sup>2</sup>).

Como a força do vento depende da diferença de pressão nas faces opostas da parte da edificação em estudo, os coeficientes de pressão são dados para superfícies externas e internas. O coeficiente de pressão externa  $C_{pe}$  é obtido através da tabela 6 e variando o ângulo  $\beta$  de acordo com a figura 5.

A força de arrasto é calculada pela expressão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988. p.4):

$$F_e = C_{pe} q A_e \quad (\text{fórmula 4})$$

Sendo:

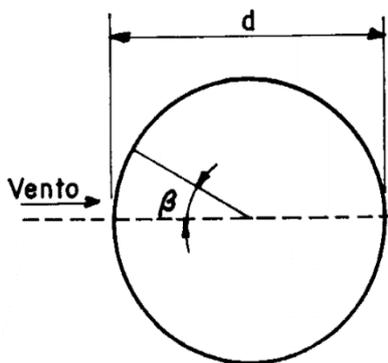
$F_e$  = força externa a edificação, agindo na superfície plana de área A (kN);

$q$  = pressão dinâmica atuante na estrutura (N/m<sup>2</sup>);

$C_{pe}$  = coeficiente de pressão externa;

$A_e$  = área externa de referência (m<sup>2</sup>).

Figura 5 – Ângulo de incidência do vento.



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988 p.19)

Tabela 6 – Fator  $C_{pe}$ 

$\beta$	Coeficientes de pressão externa $C_{pe}$			
	Superfície rugosa ou com saliências		Superfície lisa	
	$h/d=10$	$h/d \leq 2,5$	$h/d=10$	$h/d \leq 2,5$
0°	+1,0	+1,0	+1,0	+1,0
10°	+0,9	+0,9	+0,9	+0,9
20°	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7
30°	+0,4	+0,4	+0,4	+0,4
40°	0	0	0	0
50°	-0,5	-0,4	-0,7	-0,5
60°	-0,95	-0,8	-1,2	-1,05
70°	-1,25	-1,1	-1,4	-1,25
80°	-1,2	-1,05	-1,45	-1,3
90°	-1,0	-0,85	-1,4	-1,2
100°	-0,8	-0,65	-1,1	-0,85
120°	-0,5	-0,35	-0,6	-0,4
140°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25
160°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25
180°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988 p.19)

Não se considerou o efeito das pressões internas, visto que normalmente, silos possuem estruturas para o carregamento, acoplado o silo à um transportador, tanto no sentido de enchimento quanto de esvaziamento.

## 5.4 PRESSÕES CAUSADAS PELO MATERIAL ARMAZENADO

Em virtude da ausência de referências sobre solicitações em silos em norma Brasileira, optou-se por utilizar normas internacionais para determinar as cargas associadas ao material armazenado. Neste caso, foi escolhida a norma EN 1991-4/2006: Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006) para auxiliar na estimativa dos carregamentos associados às pressões causadas pelo material armazenado.

### 5.4.1 Condições de aplicabilidade da EN 1991-4/2006

A Norma EN 1991-4/2006: Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks propõe limitações geométricas que devem ser aplicadas no projeto de um silo (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 8). São elas:

- a) As formas de seção transversal são limitadas àquelas mostradas na figura 1, embora algumas pequenas variantes sejam aceitas, desde que contempladas as consequências estruturais das mudanças nas pressões;
- b) A razão entre a altura e o diâmetro do silo deve ser inferior a 10 ( $h_b/d_c < 10$ );
- c) A altura total do silo deve ser inferior a 100m ( $h_b < 100m$ );
- d) O diâmetro do silo deve ser inferior a 60m ( $d_c < 60m$ );
- e) A transição ocorre em um único plano horizontal (ver figura 2).
- f) O silo não contém nenhuma estrutura interna como cones, pirâmides ou vigas.

A Norma EN 1991-4/2006: Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks também propõe as seguintes limitações referentes aos sólidos a serem estocados e referente as limitações sobre os arranjos de enchimento e descarga aplicados no projeto de silos (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 8). São elas:

- a) Cada silo é projetado para uma variedade definida de propriedades de sólidos particulados;
- b) O sólido armazenado está em fluxo em massa;
- c) O diâmetro máximo de partícula do sólido estocado não é maior que  $0,03d_c$  (ver figura 1);

- d) Onde são utilizados equipamentos de descargas, os sólidos fluem de forma suave e central.

#### **5.4.2 Classes de Avaliação de Cargas**

A Norma BS EN 1991-4/2006 Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 23) define que:

- a) Diferentes níveis de rigor devem ser utilizados no projeto estrutural de silos, dependendo da confiabilidade do arranjo estrutural e a suscetibilidade a diferentes modos de falhas;
- b) O projeto de um silo deve ser desenvolvido de acordo com os requerimentos das três Classes de Avaliação de Cargas, demonstrados na tabela 7;
- c) As Classes de Avaliação de Cargas para um silo devem ser determinadas para as condições individuais de armazenamento, e não baseado em grupos de silos que podem estar situados no local;
- d) Um nível de Classe de Avaliação de Cargas superior ao requerido pela norma pode sempre ser adotado. Quaisquer partes do procedimento de uma Classe de Avaliação de Cargas superior pode ser adotado quando conveniente;
- e) Pode-se adotar as disposições simplificadas desta Norma para os silos classificados na Classe de Avaliação de Cargas 1.

Tabela 7 – Classificação recomendada de silos para Classes de Avaliação de Cargas

Classe de Avaliação de Carga	Descrição
Classe de Avaliação de Carga 3	<p>Silos com capacidade acima de 10.000 toneladas.</p> <p>Silos com capacidade acima de 1000 toneladas e os quais ocorrem as seguintes situações de projeto:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) A excentricidade de descarga com <math>e_o/d_c &gt; 0,25</math> (ver figura 2)</li> <li>b) Silos entroncados com excentricidade na superfície <math>e_t/d_c &gt; 0,25</math></li> </ul>
Classe de Avaliação de Carga 2	Todos silos cobertos por essa Norma os quais não se enquadram em nenhuma outra classe
Classe de Avaliação de Carga 1	Silos com capacidade menor que 100 toneladas.

(Fonte: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 24, tradução nossa)

### 5.4.3 Situações de projeto

A Norma BS EN 1991-4/2006 Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 25) estabelece as condições para o projeto de um silo.

- a) todos os carregamentos referentes aos sólidos devem ser considerados somente quando o silo está completamente cheio;
- b) os carregamentos relativos ao carregamento e descarregamento devem considerar os principais combinações que levam ao diferentes estados limites da estrutura:
  - máxima pressão normal na parede vertical;
  - máxima pressão vertical no fundo;
  - máxima carga na tremonha;
  - máxima força de atrito vertical nas parede vertical;

- c) o valor característico superior do peso específico ( $\gamma$ ) deve ser usado em todos os cálculos envolvendo os sólidos;
- d) a avaliação de cada carregamento deve ser realizada utilizando um único conjunto de valores consistentes para coeficiente de atrito ( $\mu$ ), a pressão lateral ( $K$ ) e o ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ), de forma que cada estado limite corresponda a uma única condição definida dos sólidos armazenados;
- e) deve-se considerar as combinações dos valores para coeficiente de atrito ( $\mu$ ), a pressão lateral ( $K$ ) e o ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ) de acordo com a tabela a seguir:

Tabela 8 – Valores característicos para serem usados em diferentes Avaliações de Carga

		<b>Valor Característico a adotar</b>		
	<b>Propósito</b>	<b>coeficiente de atrito (<math>\mu</math>)</b>	<b>pressão lateral (<math>K</math>)</b>	<b>o ângulo de atrito interno (<math>\phi_i</math>)</b>
<b>Parede Vertical</b>	<b>Máxima pressão normal na parede vertical</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>
	<b>Máxima força de atrito na parede vertical</b>	<b>Superior</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>
	<b>Máximo carregamento vertical na tremonha ou no fundo do silo</b>	<b>Inferior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>
<b>Tremonha</b>	<b>Máxima pressão na tremonha durante o enchimento</b>	<b>Inferior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Inferior</b>
	<b>Máxima pressão na tremonha no descarregamento</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>superior</b>

(Fonte: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 26, tradução nossa)

- f) quando a trajetória do sólido caindo dentro de um silo leva a uma pilha de material excêntrica (ver figura 2), diferentes densidades de podem ocorrer em partes do silo, induzindo pressões não simétricas;
- g) diferentes características geométricas (geometria da tremonha, esbeltez e arranjos de esvaziamento) levam a situações de carregamentos diferentes;

h) o projeto deve considerar as consequências do padrão de fluxo durante o descarregamento, que podem ser descritos nas seguintes categorias: em massa, em canal, misto.

#### **5.4.4 Propriedades dos sólidos particulados**

Segundo a Norma BS EN 1991-4/2006 Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 34), todos os valores das propriedades de sólidos particulados devem ser obtidas através de testes de laboratório ou fontes relevantes, entretanto, deve-se cogitar diferenças entre os valores dos parâmetros do material obtidos através de ensaios e o comportamento dos sólidos estocados em silos. Com o intuito de avaliar as diferenças nas propriedades, deve-se considerar a geometria da partícula (forma, tamanho e granulometria do material), os efeitos da umidade, de ações dinâmicas, a fragilidade ou ductilidade do material estocado, bem como o método de enchimento do silo.

Também é necessário avaliar as diferenças nas propriedades do atrito com as paredes, considerando os fatores como:

- a) corrosão ou reação química entre as partículas, umidade e a parede;
- b) abrasão ou desgaste que podem tornar a parede mais áspera;
- c) polimento da parede;
- d) acúmulo de depósitos de gordura na parede;
- e) partículas do sólido sendo comprimidas contra a parede, aumentando a aspereza.

#### **5.4.5 Carregamentos nas paredes verticais do silo**

O carregamento atuante nas paredes dos silos é composto por duas parcelas que atuam simultaneamente, sendo uma fixa, chamada de carregamento simétrico, e a carga livre, chamada de carga local. Caso ocorram grandes excentricidades no enchimento ou esvaziamento do silo, casos especiais de carregamentos devem ser adotados. Estes não podem ser considerados atuantes em conjunto com os carregamentos simétricos e as cargas locais, mas sim representar um caso de carregamento distinto e separado. (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 40).

Devido ao escopo do trabalho restringir-se a silos circulares de concreto armado, não será contemplada a metodologia empregada no cálculo da carga local em silos de paredes circulares finas ou em silos não circulares.

#### 5.4.5.1 Cargas de enchimento em silos esbeltos

A Norma BS EN 1991-4/2006 Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 41) indica as seguintes expressões para o cálculo dos valores de pressão horizontal ( $p_{hf}$ ), pressão de atrito na parede ( $p_{wf}$ ) e pressão vertical ( $p_{vf}$ ).

$$p_{hf}(z) = p_{ho}Y_j(z) \quad (\text{fórmula 5})$$

$$p_{wf}(z) = \mu p_{ho}Y_j(z) \quad (\text{fórmula 6})$$

$$p_{vf}(z) = \frac{p_{ho}}{K} Y_j(z) \quad (\text{fórmula 7})$$

$$p_{ho}(z) = \gamma K z_o \quad (\text{fórmula 8})$$

$$z_o = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U} \quad (\text{fórmula 9})$$

$$Y_j = 1 - e^{-z/z_o} \quad (\text{fórmula 10})$$

Sendo:

$p_{hf}$  = pressão horizontal após enchimento;

$p_{ho}$  = pressão horizontal assintótica após enchimento;

$p_{wf}$  = tensão de atrito na parede após enchimento;

$p_{vf}$  = tensão vertical nos sólidos após enchimento;

$z$  = profundidade abaixo da superfície equivalente dos sólidos na condição cheia;

$z_o$  = profundidade característica de Janssen;

$\mu$  = valor característico do coeficiente de atrito da parede vertical;

$Y_j$  = função de variação da pressão de Janssen;

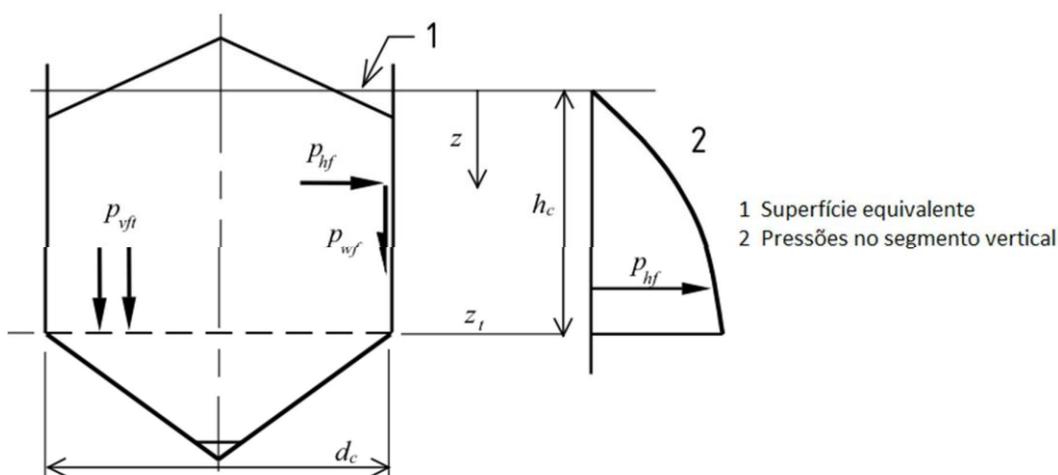
$K$  = valor característico da razão de pressão lateral;

$A$  = área da seção transversal do segmento de paredes verticais;

$U$  = perímetro interno da seção transversal.

Os carregamentos simétricos de enchimento estão indicados na figura 6.

Figura 6 – Pressões simétricas de enchimento no segmento de parede vertical



(fonte: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, p. 41)

Em virtude da possibilidade de assimetrias de carregamento associadas com excentricidades e imperfeições no processo de enchimento do silo, são consideradas a existência de cargas locais. A magnitude das cargas locais  $p_{pf}$  deve ser determinada através da excentricidade máxima no topo da pilha de enchimento, que se encontra como  $e_f$  na figura 2. Em silos de Classe de Avaliação de Carga 1, as cargas locais podem ser desprezadas. Nota-se que a carga local consiste em uma alteração do padrão de pressões normais. Não se deve considerar nenhuma alteração nos valores de pressões de atrito devido a ela. A figura 7 mostra a atuação das cargas locais e o procedimento de cálculo ocorre com as seguintes fórmulas (EUROPEAN COMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 42-43):

$$p_{pf} = C_{pf} p_{hf} \quad (\text{fórmula 11})$$

$$C_{pf} = 0,21C_{op}[1 + 2E^2](1 - e^{\{-1,5[(h_c/d_c)-1]\}}) \quad (\text{fórmula 12})$$

$$E = 2e_f/d_c \quad (\text{fórmula 13})$$

Sendo:

$p_{pf}$  = pressão local após enchimento;

$C_{pf}$  = fator de carga local de enchimento;

$p_{hf}$  = pressão horizontal após enchimento, na altura onde a carga local é aplicada;

$C_{op}$  = fator de referência do sólido para pressão local, adotado como  $C_{op} = 1$ ;

$e_f$  = máxima excentricidade na superfície durante o enchimento;

$E$  = razão de excentricidade do fluxo e do raio do silo.

Caso o resultado da fórmula 12 ser um valor negativo, deve-se tomar o valor de  $C_{pf}$  igual a zero (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 43):

$$C_{pf} = 0 \quad (\text{fórmula 14})$$

As dimensões da área onde a carga local será aplicada deve ser calculada através de:

$$s = \pi d_c/16 \cong 0,2d_c \quad (\text{fórmula 15})$$

Sendo:

$s$  = dimensão da área afetada pela carga local

A forma da pressão local depende diretamente do método de construção do silo, sendo classificados em (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 43, tradução nossa):

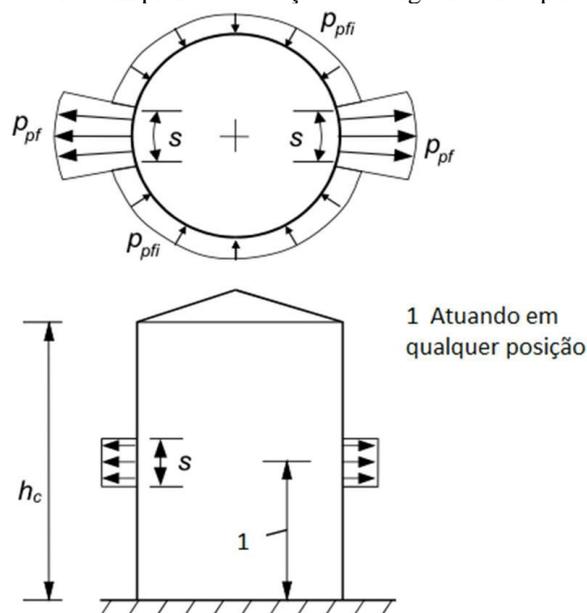
- a) com paredes circulares espessas (silos de concreto);
- b) com paredes circulares finas (silos de metais);
- c) não circulares.

Em silos de paredes espessas, a pressão local age em duas áreas quadradas opostas, com largura dado pela fórmula 15 e sentido radial para fora. A distância horizontal  $s$  é medida na superfície curva (ver figura 7). Adicionalmente à carga local, o restante da circunferência do silo está submetido a uma pressão  $p_{pfi}$  no sentido contrário (para dentro), sendo aplicada apenas na altura de aplicação da carga local. Esse valor é escolhido de forma que a pressão naquela altura se mantenha inalterada devido a carga local. A pressão  $p_{pfi}$  é calculada através de (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 43, tradução nossa):

$$P_{pfi} = P_{pf}/7 \quad (\text{fórmula 16})$$

Em silos da Classe de Avaliação de cargas 2 de paredes espessas, pode-se utilizar uma metodologia simplificada a seguir. Considera-se o pior caso quando a carga local é aplicada na metade da altura do silo e analisa-se os valores aproximados de tensão resultante na parede. O aumento percentual das resultantes das tensões na parede na meia altura do silo pode ser utilizado para determinar os valores de tensão em qualquer altura. Por exemplo, caso a carga local ocasione um aumento de 10% nas tensões, pode-se aumentar as demais cargas em 20%, sem a necessidade de calcular a pressão em todas as alturas do silo (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 44).

Figura 7 – Vista em planta e elevação das cargas locais – paredes espessas



(fonte: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 42)

#### 5.4.5.2 Cargas de esvaziamento em silos esbeltos

Para todas as Classes de Avaliação de Cargas, as pressões simétricas de esvaziamento  $p_{he}$  e  $p_{we}$  devem ser calculadas através das fórmulas (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 45):

$$p_{he} = C_h p_{hf} \quad (\text{fórmula 17})$$

$$p_{we} = C_w p_{wf} \quad (\text{fórmula 18})$$

Onde:

$p_{he}$  = pressão horizontal durante o esvaziamento;

$p_{hf}$  = pressão horizontal após enchimento;

$p_{we}$  = tensão de atrito da parede durante o esvaziamento;

$p_{wf}$  = tensão de atrito da parede após o enchimento;

$C_h$  = fator de majoração da pressão horizontal de esvaziamento;

$C_w$  = fator de majoração do atrito da parede de esvaziamento.

Para silos de todas as Classes de Avaliação de Cargas que são descarregados pelo topo, sem nenhum tipo de fluxo no material estocado, os fatores de majoração são iguais a 1,0 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 46).

$$C_h = C_w = 1,0 \quad (\text{fórmula 19})$$

Para silos esbeltos da Classe de Avaliação de cargas 2 e 3, os fatores de majoração assumem os seguintes valores (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 46):

$$C_h = C_o = 1,15 \quad (\text{fórmula 20})$$

$$C_w = 1,10 \quad (\text{fórmula 21})$$

Sendo:

$C_o$  = fator de majoração para todos os sólidos ( $C_o = 1,15$ )

Em silos esbeltos de Classe de Avaliação de Cargas 1, onde os valores médios das propriedades  $K$  e  $\mu$  forem utilizados para o projeto, os fatores de majoração devem ser calculados através de (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 46):

$$C_h = 1,15 + 1,5(1 + 0,4e/d_c)C_{op} \quad (\text{fórmula 22})$$

$$C_h = 1,4(1 + 0,4e/d_c) \quad (\text{fórmula 23})$$

$$e = \max(e_f, e_o) \quad (\text{fórmula 24})$$

Sendo:

$C_{op}$  = fator de referência da carga local do sólido;

$e_f$  = máxima excentricidade da superfície durante o enchimento;

$e_o$  = excentricidade do centro da saída.

As cargas locais de esvaziamento dos silos representam assimetrias acidentais que podem ocorrer durante o esvaziamento, além de excentricidades de entrada e saída do fluxo. Da mesma forma que as cargas locais de enchimento, as cargas locais de esvaziamento podem ser ignoradas em silos da Classe de Avaliação de Cargas 1. As demais classes utilizam a metodologia a seguir (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 46):

$$p_{pe} = C_{pe}p_{he} \quad (\text{fórmula 25})$$

Sendo:

$p_{pe}$  = pressão local durante o esvaziamento;

$C_{pe}$  = fator de majoração da pressão local;

$p_{he}$  = pressão horizontal durante o esvaziamento.

Se  $h_c/d_c > 1,2$  o valor de  $C_{pe}$  é dado pela expressão:

$$C_{pe} = 0,42C_{op}[1 + 2E^2](1 - \exp\{-1,5[(h_c/h_d) - 1]\}) \quad (\text{fórmula 26})$$

Se  $h_c/d_c \leq 1,2$  o valor de  $C_{pe}$  é dado pelo maior dos valores fornecidos pelas fórmulas:

$$C_{pe} = 0,272C_{op}[(h_c/h_d) - 1 + E] \quad (\text{fórmula 27})$$

$$C_{pe} = 0 \quad (\text{fórmula 28})$$

Sendo:

$E$  = razão de excentricidade do fluxo e do raio do silo

Da mesma forma que as cargas locais de enchimento, em silos de paredes espessas, a pressão local age em duas áreas quadradas opostas, com comprimento  $s$  dado pela fórmula 12 e sentido radial para fora. A distância horizontal  $s$  é medida na superfície curva (ver figura 7). Adicionalmente à carga local, o restante da circunferência do silo está submetido a uma pressão  $p_{pei}$  no sentido contrário (para dentro). Esse valor é escolhido de forma que a pressão naquela altura se mantenha inalterada devido a carga local. A pressão  $p_{pei}$  é calculada através de (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 48):

$$P_{pei} = P_{pe}/7 \quad (\text{fórmula 29})$$

Igualmente à pressão de enchimento, também pode-se utilizar o método simplificado em silos de Classe de Avaliação de Cargas 2.

#### 5.4.6 Carregamentos no fundo do silo

A Norma BS EN 1991-4/2006 Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 67) determina que a pressão média entre o fundo ou a tremonha e as paredes verticais é calculada através de:

$$p_{vft} = C_b p_{vf} \quad (\text{fórmula 30})$$

Onde:

$p_{vf}$  = tensão vertical nos sólidos após enchimento;

$C_b$  = fator de majoração do fundo do silo.

Para silos da classe de avaliação de cargas 2 e 3, o fator de majoração  $C_b$  deve ser definido como (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 68):

$$C_b = 1,0 \quad \text{(fórmula 31)}$$

Já silos da classe de avaliação de cargas 1 para os quais os valores médios das propriedades  $K$  e  $\mu$  foram utilizados no projeto deve-se adotar o seguinte valor para  $C_b$  (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 68):

$$C_b = 1,3 \quad \text{(fórmula 32)}$$

Onde existe uma probabilidade significativa de que o material estocado desenvolva condições de carregamento dinâmico, cargas maiores são aplicadas à tremonha ou ao fundo do silo. Para tal, é necessário que o silo em questão seja do tipo esbelto, armazenando materiais com baixa coesão ou suscetíveis a intertravamento. Caso essa condição seja satisfeita, deve-se adotar os seguintes valores para o coeficiente de majoração do fundo  $C_b$  (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 68):

$$C_b = 1,2 \text{ para classe de avaliação de cargas 2 e 3} \quad \text{(fórmula 33)}$$

$$C_b = 1,6 \text{ para classe de avaliação de cargas 1} \quad \text{(fórmula 34)}$$

Para cada condição na tremonha, a tensão vertical no sólido a uma altura  $x$  acima do topo da tremonha deve ser determinada através de (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 68):

$$p_v = \left(\frac{\gamma h_h}{n-1}\right) \left\{ \left(\frac{x}{h_h}\right) - \left(\frac{x}{h_h}\right)^n \right\} + p_{vft} \left(\frac{x}{h_h}\right)^n \quad (\text{fórmula 35})$$

$$n = S(F\mu_{heff} \cot\beta + F) - 2 \quad (\text{fórmula 36})$$

$$S = 2, \text{ para tremonhas cônicas ou piramidais} \quad (\text{fórmula 37})$$

$$S = 1, \text{ para tremonhas em cunha} \quad (\text{fórmula 38})$$

$$S = \left(1 + \frac{b}{a}\right), \text{ para tremonhas de seção transversal retangular} \quad (\text{fórmula 39})$$

Onde:

$p_v$  = tensão vertical no sólido armazenado;

$p_{vft}$  = tensão vertical no sólido armazenado na transição após enchimento;

$\gamma$  = valor característico superior do peso específico;

$h_h$  = altura da tremonha, medida do ponto mais baixo da tremonha até a transição;

$x$  = cordenada vertical a partir do ponto mais baixo da tremonha;

$\mu_{heff}$  = atrito efetivo da tremonha;

$S$  = coeficiente geométrico da tremonha

$F$  = razão entre a pressão normal na parede da tremonha e a tensão vertical no sólido;

$\beta$  = ângulo de inclinação da tremonha medido da vertical ( $\beta = 90^\circ - \alpha$ );

$b$  = largura de um silo poligonal;

$a$  = comprimento de um silo poligonal.

#### 5.4.6.1 Cargas em tremonhas íngremes

Tanto para as situações de enchimento ou esvaziamento, o atrito mobilizado ou efetivo se dá através da seguinte fórmula (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 70):

$$\mu_{heff} = \mu_h \quad (\text{fórmula 40})$$

Sendo:

$\mu_{heff}$  = o coeficiente de atrito efetivo;

$\mu_h$  = o menor coeficiente de atrito da parede da tremonha;

Em situações de esvaziamento, a tensão média do material estocado em qualquer altura de uma tremonha íngreme deve ser determinado através da fórmula 35 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 71):

$$F_e = \frac{1 + \sin\phi_i \cos\varepsilon}{1 - \sin\phi_i \cos(2\beta + \varepsilon)} \quad (\text{fórmula 41})$$

$$\varepsilon = \phi_{wh} + \sin^{-1}\left\{\frac{\sin\phi_{wh}}{\sin\phi_i}\right\} \quad (\text{fórmula 42})$$

$$\phi_{wh} = \tan^{-1}\mu_h \quad (\text{fórmula 43})$$

Onde:

$\phi_i$  = valor característico do ângulo de atrito interno do sólido;

$\beta$  = ângulo de inclinação da tremonha medido com a vertical;

$\phi_{wh}$  = valor característico do ângulo de atrito da parede da tremonha;

$\mu_h$  = valor característico do coeficiente de atrito da parede da tremonha.

A pressão normal  $p_{ne}$  e o tensão atrito  $p_{te}$  em qualquer ponto da parede de uma tremonha íngreme durante o esvaziamento é determinado por (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 72):

$$p_{ne} = F_e p_v \quad (\text{fórmula 44})$$

$$p_{te} = \mu_h F_e p_v \quad (\text{fórmula 45})$$

Onde:

$p_{ne}$  = pressão normal de esvaziamento na parede da tremonha;

$p_v$  = tensão vertical no sólido armazenado;

$p_{te}$  = pressão de atrito de esvaziamento.

Já na situação de enchimento, a média da tensão vertical  $p_v$  no material estocado em qualquer altura da tremonha deve ser calculada através da fórmula 35, entretanto utilizando  $F = F_f$  e com o valor de  $n$  obtido através da fórmula 47 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 71):

$$F_f = 1 - \frac{b}{\left(1 + \frac{\tan \beta}{\mu_h}\right)} \quad (\text{fórmula 46})$$

$$n = S(1 - b)(\mu_h \cot \beta) \quad (\text{fórmula 47})$$

Sendo:

$b$  = coeficiente empírico ( $b = 0,2$ );

$S$  = fator geométrico da tremonha (fórmulas 37, 38 e 39).

A pressão normal  $p_{nf}$  e a tensão de atrito  $p_{tf}$  em qualquer ponto da parede de uma tremonha íngreme após enchimento deve ser determinada através das fórmulas a seguir (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 71):

$$p_{nf} = F_f p_v \quad (\text{fórmula 48})$$

$$p_{tf} = \mu_h F_f p_v \quad (\text{fórmula 49})$$

Sendo:

$p_{ne}$  = pressão normal após enchimento na parede da tremonha;

$p_v$  = tensão vertical no sólido armazenado;

$p_{te}$  = pressão de atrito após enchimento.

#### 5.4.6.2 Cargas em tremonhas rasas

Em uma tremonha rasa, o atrito com a parede não é completamente mobilizado, sendo dessa forma o atrito efetivo calculado através da equação (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 72):

$$\mu_{heff} < \frac{1-K}{2 \tan \beta} \quad (\text{fórmula 50})$$

Onde:

$\mu_{heff}$  = coeficiente de atrito efetivo.

Tanto em situações de enchimento quanto de esvaziamento, a média da tensão vertical no material estocado em qualquer altura de uma tremonha rasa pode ser determinada através da fórmula 53, entretanto utilizando  $F = F_f$  e com o valor de  $n$  obtido através da fórmula 52 a seguir (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 73):

$$F_f = 1 - \left\{ \frac{b}{\left(1 + \frac{\tan \beta}{\mu_{heff}}\right)} \right\} \quad (\text{fórmula 51})$$

$$n = S(1 - b)(\mu_{heff} \cot \beta) \quad (\text{fórmula 52})$$

Onde:

$b$  = coeficiente empírico ( $b=0,2$ );

$S$  = fator geométrico da tremonha (fórmulas 37, 38 e 39).

A pressão normal  $p_{nf}$  e a tensão de atrito  $p_{tf}$  em qualquer ponto da parede de uma tremonha íngreme após enchimento deve ser determinada através das fórmulas a seguir (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 73):

$$p_{nf} = F_f p_v \quad (\text{fórmula 53})$$

$$p_{tf} = \mu_{heff} F_f p_v \quad (\text{fórmula 54})$$

Sendo:

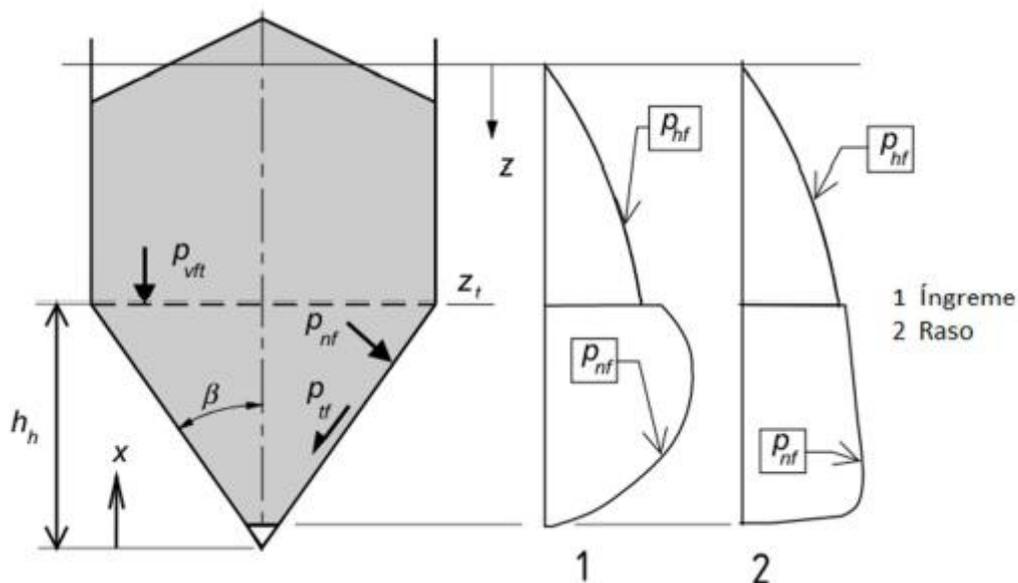
$p_{ne}$  = pressão normal após enchimento na parede da tremonha;

$p_v$  = tensão vertical no sólido armazenado;

$p_{te}$  = pressão de atrito após enchimento.

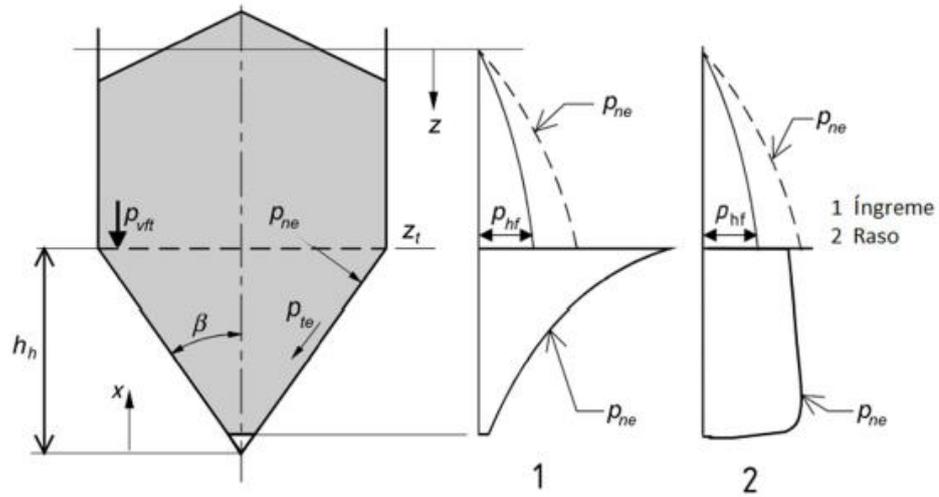
As figuras a seguir contextualizam a distribuição das pressões atuantes na tremonha durante o enchimento e esvaziamento do silo.

Figura 8 – Distribuição de pressões de enchimento nas tremonhas



(fonte: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 67)

Figura 9 – Distribuição de pressões de esvaziamento nas tremonhas



(fonte: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 72)

## 5.5 CARGAS TÉRMICAS

Segundo Safarian e Harris (1985, p. 67, tradução nossa),

Existem dois tipos de efeitos térmicos que devem ser considerados. O primeiro é o gradiente de temperatura que atravessa a parede, importante em paredes de concreto, causado por estocar materiais muito mais quentes que a temperatura do ar em torno do silo.

Mudanças da temperatura devido a intensa luz do sol pode causar um efeito de expansões e contrações de grupos de silos. As tensões devido a essa ação podem ser grandes o suficiente para causar uma parede de concreto a fissurar. Telhados de concreto também são afetados por mudanças de temperatura e gradiente. Já silos metálicos podem colapsar apenas pelas expansões e contrações térmicas diárias, enquanto o material estocado torna-se mais denso com o movimento diário. (SAFARIAN; HARRIS, 1985, p. 67).

## 6 CARACTERÍSTICAS DE PROJETO DO SILO

Geralmente, as características iniciais do silo são definidas de acordo com a finalidade exigida pelo cliente. Entretanto, para fins de trabalho, adotou-se a necessidade mínima de 400 toneladas de produto (4000 kN), dessa forma, enquadrando-se na Classe de Avaliação de Cargas 2. A partir do valor mínimo de carga, estipulou-se o volume a ser adotado para o projeto. Utilizando o peso específico mínimo de “pellets” de 6mm, 583 kg/m<sup>3</sup>, o volume obtido foi de aproximadamente 686 m<sup>3</sup> de material estocado.

O silo possui formato cilíndrico, esbelto e com tremonha cônica. A forma cilíndrica proporciona, quando sobre pressões laterais uniformes, momentos de flexão reduzidos nas suas paredes, desse modo, sendo construídos com diâmetros muito maiores que as dimensões usuais de silos retangulares. (SAFARIAN; HARRIS, 1985, p. 78).

Em virtude do volume necessário, calculou-se o diâmetro e a altura características do silo e da tremonha através das formulas:

$$Vol = \frac{h_c d_c^2 \pi}{4} + \frac{h_h d_c^2 \pi}{4} \cdot \frac{1}{3} \quad (\text{fórmula 55})$$

$$h_h = \frac{d_c}{2 \tan \beta} \quad (\text{fórmula 56})$$

Sendo:

$\beta$  = ângulo de inclinação da tremonha medido na vertical (°);

Vol = volume mínimo do silo (m<sup>3</sup>);

$h_c$  = altura do cilindro do silo (m);

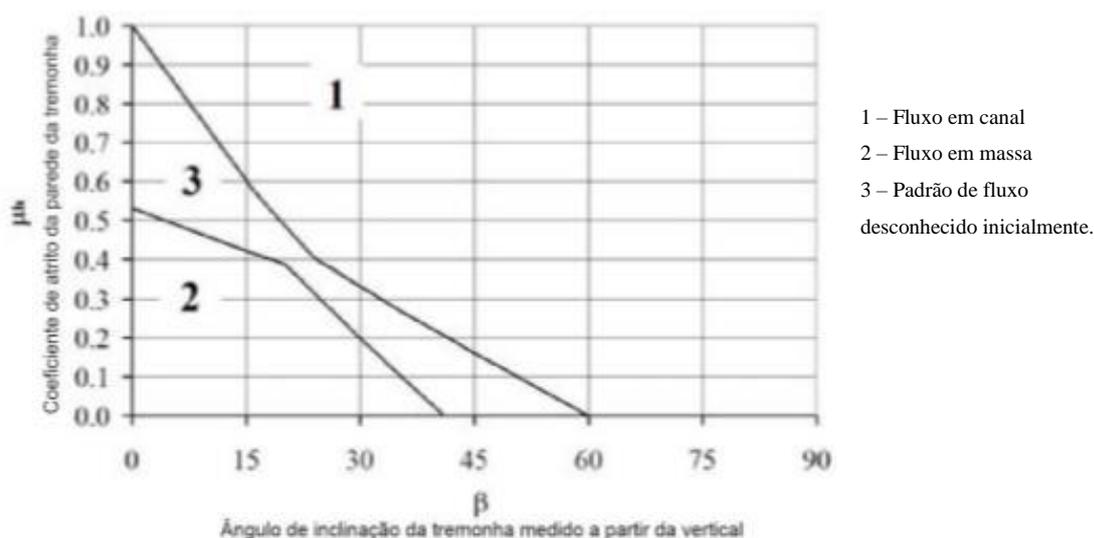
$d_c$  = diâmetro do silo (m);

$h_h$  = Altura da tremonha, medida do ponto mais baixo até o início do cilindro (m).

A estrutura possuirá uma cobertura de concreto armado, plana, com abertura circular com diâmetro de 50 cm. A cobertura estará engastada nas paredes, que por sua vez, transmitirão seus esforços para uma viga circular situada na transição entre as paredes do silo e a tremonha. A tremonha também será suportada por esta viga, que transmitirá seus esforços para as fundações através de oito pilares igualmente espaçados no perímetro da estrutura.

A tremonha foi projetada de modo que houvesse apenas um tipo de fluxo ocorrendo durante o procedimento de esvaziamento do silo. Logo, a figura abaixo indica que tremonhas com ângulos (em relação a vertical) acima de 60° formam apenas fluxos de canal, independentemente dos outros dados da geometria da estrutura. Ângulos menores que 45° proporcionam fluxos em massa e tremonhas com ângulos entre 45° e 60° formam um fluxo desconhecido inicialmente, podendo ser tanto de massa quando em canal.

Figura 10 – Gráfico para determinação de fluxos em tremonhas.



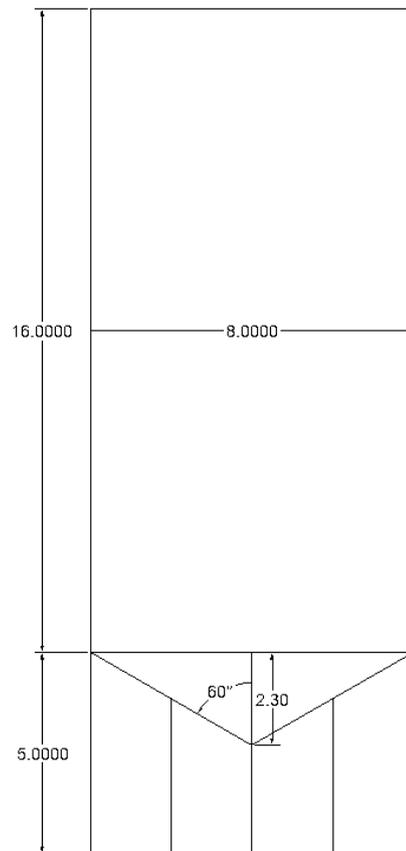
(fonte: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 100 apud KHEL, G. 2015, p.62)

Dessa forma, silo terá 16 metros de altura, com diâmetro de 8 m, totalizando, junto com a tremonha, aproximadamente 830 m<sup>3</sup> de material. A tremonha e a cobertura apresentam espessuras de 30 cm e as paredes 40 cm de espessura. As vigas por sua vez, possuem 60 cm de altura e 45 cm de largura, os pilares possuem dimensões de 60x45 cm e altura de

5 m. A altura característica da tremonha foi calculada utilizando o valor de  $60^\circ$  para o ângulo  $\beta$ , obtendo um valor de 2.3 m.

A figura a seguir apresenta um corte da estrutura, indicando o formato básico e algumas definições de projeto.

Figura 11 – Representação esquemática em corte do silo.



(fonte: elaborado pelo autor.)

## 7 COMBINAÇÕES DE CARGAS APLICADAS

Com o auxílio do software Robot Structural Analysis Professional 2016, aplicaram-se os carregamentos descritos no capítulo 5, adicionando uma carga acidental na cobertura, com valor de 3kN/m relacionada a um possível acesso para manutenção. Nele foram determinados que as paredes, a tremonha e a cobertura seriam tratadas como elementos de casca, ao passo que as vigas e pilares elementos de barra.

Os coeficientes aplicados nas combinações de carga baseado nos critérios estipulados pela NBR 8681: ações e segurança nas estruturas – procedimento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), sendo demonstrados no quadro a seguir.

Tabela 9 – Coeficientes utilizados nas combinações.

<b>Carregamentos</b>	<b>Coeficientes de ponderação</b>	<b>Fatores de combinação</b>
<b>Peso próprio</b>	1,4	-
<b>Carga acidental</b>	1.5	0,8
<b>Carga de vento</b>	1.4	0,6
<b>Pressões causadas pelo material</b>	1.5	0,8

(fonte: elaborado pelo autor.)

Não foram consideradas cargas térmicas, visto que o material será estocado a temperatura ambiente. Também foi desconsiderado o uso de equipamentos, uma vez que este depende de informações do fornecedor para estabelecer os carregamentos aplicados sobre a estrutura.

O software Robot Structural Analysis Professional 2016 realiza o cálculo do peso próprio da estrutura, dispensando qualquer outro cálculo. As pressões causadas pelos materiais armazenados foram calculadas de acordo com a Norma BS EN 1991-4/2006 Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks (EUROPEAN COMMITTEE FOR

STANDARIZATION, 2006), sendo separadas em pressões de enchimento e pressões de esvaziamento do silo.

As pressões de enchimento, horizontal e vertical, bem como o atrito vertical, foram calculadas utilizando as fórmulas 5, 7 e 6 respectivamente. Para as pressões de esvaziamento, utilizou-se a fórmula 17 para calcular a pressão horizontal e a fórmula 18 para calcular o atrito vertical. Na tabela 10 apresentam-se os resultados obtidos.

Tabela 10 – Pressões de enchimento e esvaziamento do silo.

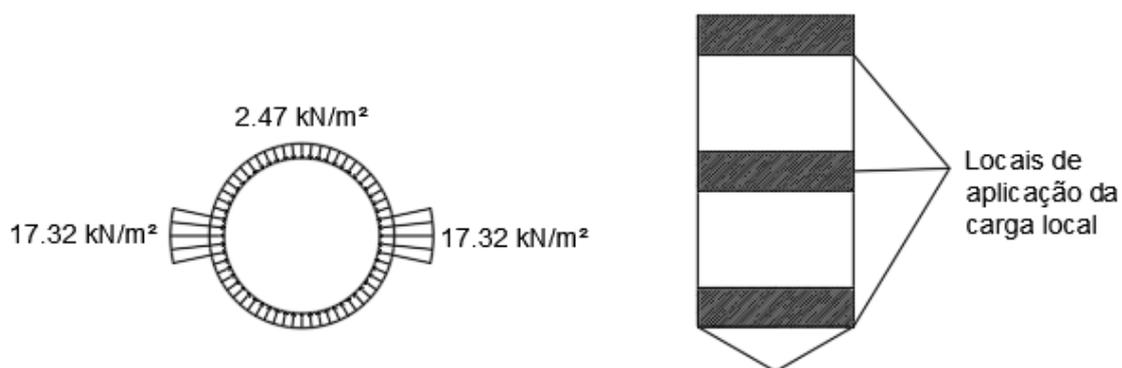
Altura em relação ao topo do silo (m)	ENCHIMENTO			ESVAZIAMENTO	
	Pressão horizontal (kN/m <sup>2</sup> )	Atrito vertical (kN/m <sup>2</sup> )	Pressão vertical (kN/m <sup>2</sup> )	Pressão Horizontal (kN/m <sup>2</sup> )	Atrito Vertical (kN/m <sup>2</sup> )
1	2.60	0.91	5.92	2.99	1.00
2	5.06	1.77	11.50	5.82	1.95
3	7.38	2.58	16.77	8.49	2.84
4	9.57	3.35	21.75	11.01	3.68
5	11.64	4.07	26.45	13.38	4.48
6	13.59	4.76	30.88	15.63	5.23
7	15.43	5.40	35.07	17.74	5.94
8	17.17	6.01	39.02	19.74	6.61
9	18.81	6.58	42.74	21.63	7.24
10	20.36	7.12	46.26	23.41	7.84
11	21.82	7.64	49.58	25.09	8.40
12	23.20	8.12	52.72	26.68	8.93
13	24.50	8.57	55.68	28.17	9.43
14	25.73	9.00	58.47	29.59	9.91
15	26.89	9.41	61.11	30.92	10.35
16	27.98	9.79	63.60	32.18	10.77
PRESSÕES NA TREMONHA					
	29.02	10.16	74.8	33.37	11.17

(fonte: elaborado pelo autor.)

De acordo com a Norma BS EN 1991-4/2006 Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p.42), estão previstos carregamentos locais durante o processo de movimentação do material estocado, seja para esvaziamento quanto para enchimento. Esses carregamentos correspondem a possíveis assimetrias acidentais que podem ocorrer durante o processo de movimentação. Desse modo, a Norma BS EN 1991-4/2006 Eurocode 1 – Actions on

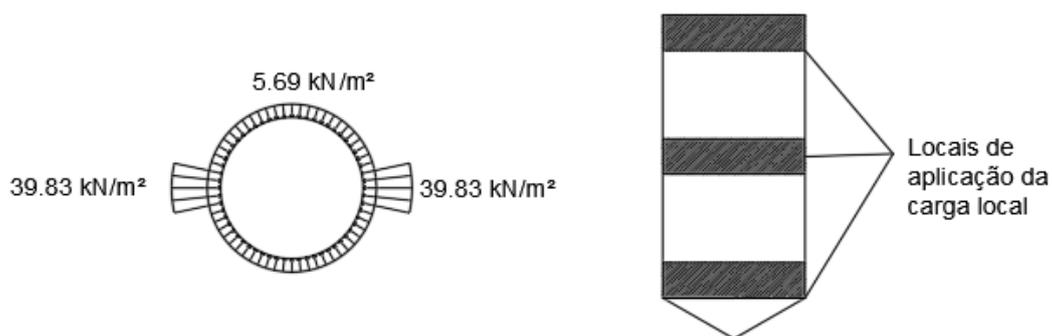
structures – Part 4: Silos and tanks (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006), prevê que apliquemos as cargas locais em qualquer altura do cilindro. Portanto, aplicou-se as cargas em três locais diferentes, no topo, na metade e na base do cilindro, sendo as pressões relacionadas ao enchimento calculadas com as fórmulas 11 e 16 e as pressões relacionadas ao esvaziamento calculadas com as fórmulas 25 e 29.

Figura 12 – Pressões de enchimento do silo.



(fonte: elaborado pelo autor.)

Figura 13 – Pressões de esvaziamento do silo.

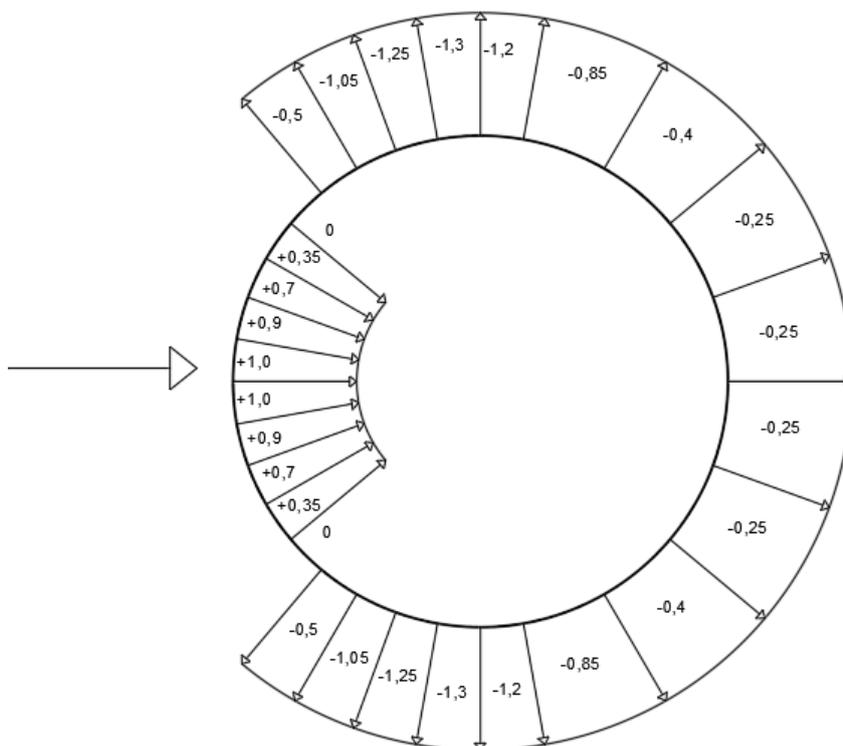


(fonte: elaborado pelo autor.)

As ações dos ventos foram estabelecidas de acordo com a NBR 6123/1988: Forças devidas ao vento em edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988), as quais estão demonstradas na figura a seguir. Determinou-se as cargas de vento variando em duas direções, X e Y, para desta forma, se apresentarem tanto paralelas quanto perpendiculares às pressões locais de movimentação de materiais.

Na figura 14 estão descritos os coeficientes de pressão devido à ação do vento na estrutura.

Figura 14 – Coeficientes de pressão devido a ação do vento.



(fonte: elaborado pelo autor.)

A partir desses carregamentos, estabeleceu-se a tabela a seguir, que compreende todas as 51 combinações utilizadas no cálculo estrutural.

Tabela 11 – Combinações utilizadas no cálculo estrutural

	COMBINAÇÕES	PRINCIPAL COMPONENTE DA COMBINAÇÃO
1	PP+AC+VX	PP
2	PP +AC+V.X+P.EN.TOP	PP
3	PP +AC+V.Y+P.EN.TOP	PP
4	PP +AC+V.X+P.EN.MID	PP
5	PP +AC+V.Y+P.EN.MID	PP
6	PP +AC+V.X+P.EN.BOT	PP
7	PP +AC+V.Y+P.EN.BOT	PP

8	PP +AC+V.X+P.Esv.TOP	PP
9	PP +AC+V.Y+P.Esv.TOP	PP
10	PP +AC+V.X+P.Esv.MID	PP
11	PP +AC+V.Y+P.Esv.MID	PP
12	PP +AC+V.X+P.Esv.BOT	PP
13	PP +AC+V.Y+P.Esv.BOT	PP
14	PP+AC+VX	VENTO
15	PP +AC+V.X+P.EN.TOP	VENTO
16	PP +AC+V.Y+P.EN.TOP	VENTO
17	PP +AC+V.X+P.EN.MID	VENTO
18	PP +AC+V.Y+P.EN.MID	VENTO
19	PP +AC+V.X+P.EN.BOT	VENTO
20	PP +AC+V.Y+P.EN.BOT	VENTO
21	PP +AC+V.X+P.Esv.TOP	VENTO
22	PP +AC+V.Y+P.Esv.TOP	VENTO
23	PP +AC+V.X+P.Esv.MID	VENTO
24	PP +AC+V.Y+P.Esv.MID	VENTO
25	PP +AC+V.X+P.Esv.BOT	VENTO
26	PP +AC+V.Y+P.Esv.BOT	VENTO
27	PP +AC+V.X+P.EN.TOP	SÓLIDOS
28	PP +AC+V.Y+P.EN.TOP	SÓLIDOS
29	PP +AC+V.X+P.EN.MID	SÓLIDOS
30	PP +AC+V.Y+P.EN.MID	SÓLIDOS
31	PP +AC+V.X+P.EN.BOT	SÓLIDOS
32	PP +AC+V.Y+P.EN.BOT	SÓLIDOS
33	PP +AC+V.X+P.Esv.TOP	SÓLIDOS
34	PP +AC+V.Y+P.Esv.TOP	SÓLIDOS
35	PP +AC+V.X+P.Esv.MID	SÓLIDOS
36	PP +AC+V.Y+P.Esv.MID	SÓLIDOS
37	PP +AC+V.X+P.Esv.BOT	SÓLIDOS
38	PP +AC+V.Y+P.Esv.BOT	SÓLIDOS
39	PP+AC+VX	AC
40	PP +AC+V.X+P.EN.TOP	AC
41	PP +AC+V.Y+P.EN.TOP	AC
42	PP +AC+V.X+P.EN.MID	AC
43	PP +AC+V.Y+P.EN.MID	AC
44	PP +AC+V.X+P.EN.BOT	AC
45	PP +AC+V.Y+P.EN.BOT	AC
46	PP +AC+V.X+P.Esv.TOP	AC
47	PP +AC+V.Y+P.Esv.TOP	AC
48	PP +AC+V.X+P.Esv.MID	AC
49	PP +AC+V.Y+P.Esv.MID	AC
50	PP +AC+V.X+P.Esv.BOT	AC
51	PP +AC+V.Y+P.Esv.BOT	AC

(fonte: elaborado pelo autor.)

Tabela 12 – Legendas e significados das siglas.

LEGENDAS	
PP	Peso próprio
VX	Vento em X
VY	Vento em Y
P.EN.TOP	Pressão de enchimento com carga localizada no topo
P.EN.MID	Pressão de enchimento com carga localizada no meio
P.EN.BOT	Pressão de enchimento com carga localizada na base
P.Esv.TOP	Pressão de esvaziamento com carga localizada no topo
P.Esv.MID	Pressão de esvaziamento com carga localizada no meio
P.Esv.BOT	Pressão de esvaziamento com carga localizada na base
AC	Carga acidental
SÓLIDOS	Referente às pressões causadas pelos sólidos.

(fonte: elaborado pelo autor.)

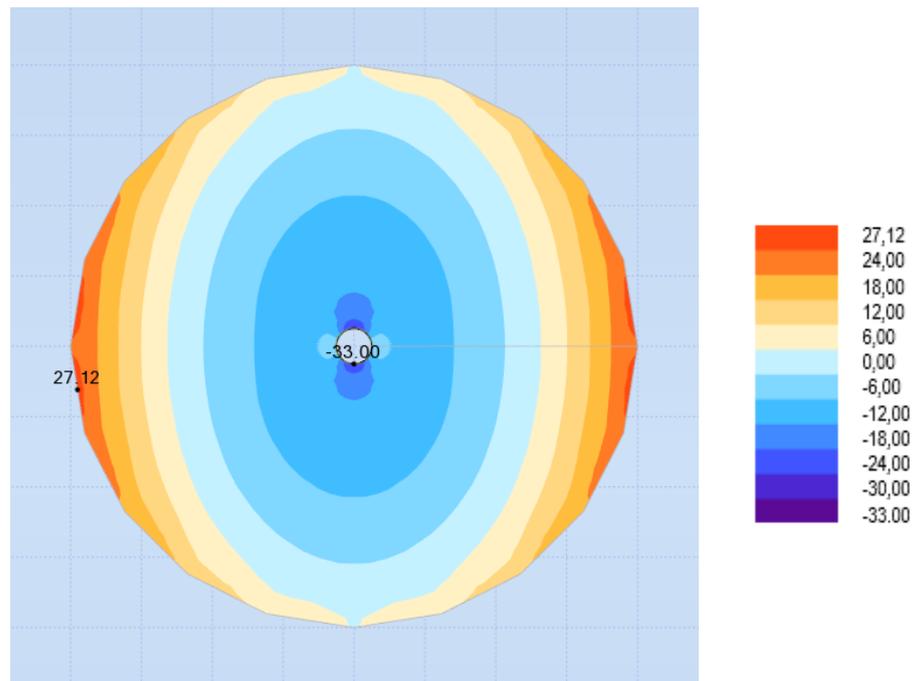
## 8 DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA

Após a determinação das cargas e combinações no capítulo anterior, serão apresentados os resultados e o dimensionamento das estruturas compreendidas no escopo deste projeto. Todos os cálculos foram de acordo com os critérios da NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, com o auxílio dos programas VigaS, desenvolvido pelo Prof. Roberto Domingo Rios e por Serguem Trott no Programa de Iniciação Científica PIBIC/CNPq (2004-2005) na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e Pcalc, desenvolvido pelo Engenheiro Sander David Cardoso. Em relação aos materiais, foi utilizado concreto de 35 MPa e aços CA-50 e CA-60.

### 8.1 COBERTURAS

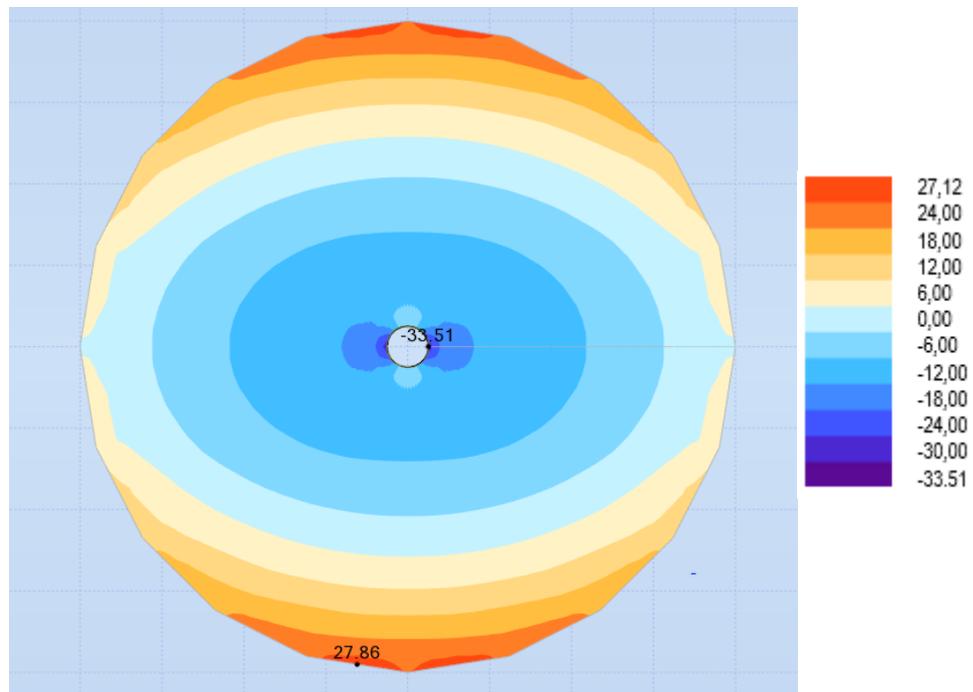
Para o dimensionamento da cobertura engastada, que possui 30 cm de espessura, utilizou-se o programa VigaS admitindo que a laje seria uma viga com altura de 30 cm e base de 1 m. A partir dos diagramas de momentos em X e Y obtidos no Robot Structural Analysis Professional 2016, mostrados nas figuras 15 e 16, determinou-se a área de aço necessária. Cabe ressaltar que o software utiliza convenções diferentes da nossa em relação ao sentido dos momentos. Logo, momentos negativos implicarão tração nas fibras inferiores e momentos positivos tração nas fibras superiores.

Figura 15 – Momento na direção X na cobertura kNm/m



(fonte: elaborado pelo autor.)

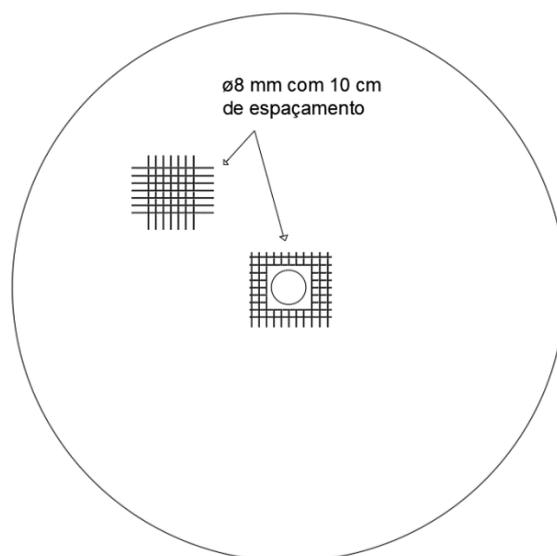
Figura 16 – Momento na direção Y na cobertura em kNm/m.



(fonte: elaborado pelo autor.)

Dessa forma, adotando os valores  $-33,51$  kNm/m e  $27,86$  kNm/m, determinou-se que, para uma laje com 5 cm de cobrimento ( $d=24,6$  cm) a armadura necessária será de  $4,40$  cm<sup>2</sup>/m, tanto na região central da estrutura quanto no encontro com as paredes. Para tal, utilizou-se malhas de aço de diâmetro 8 mm e espaçamento 10 cm, tanto na camada inferior quanto na camada superior.

Figura 17 – Armaduras da cobertura.

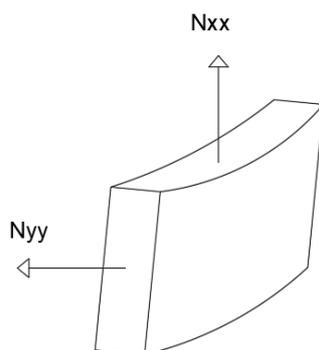


(fonte: elaborado pelo autor.)

## 8.2 PAREDES

Em relação aos esforços os quais as paredes estão submetidas devido ao estado de membrana dada a pequena espessura em relação ao diâmetro, nota-se que a tração e compressão são preponderantes em relação aos momentos. Enquanto a tração e compressão possuem valores da ordem de 1000 kN a 2000 kN, os valores de momentos são da ordem de 30 kNm/m, sendo desse modo, desprezado no dimensionamento. A figura 18 compreende em um croqui demonstrando as direções de  $N_{xx}$  e  $N_{yy}$ , baseados nos eixos locais das paredes, sendo o primeiro no sentido longitudinal da estrutura e o segundo no sentido transversal da estrutura.

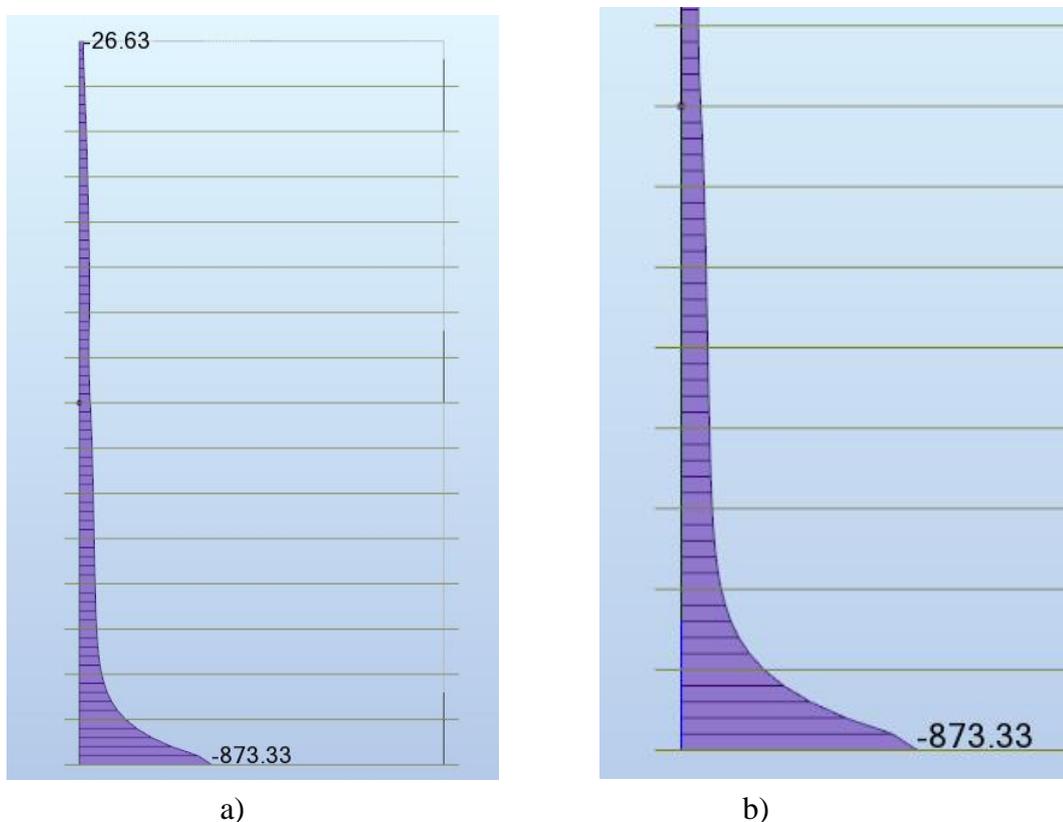
Figura 18 – Croqui demonstrando as direções de  $N_{xx}$  e  $N_{yy}$



(fonte: elaborado pelo autor.)

As figuras a seguir apresentam os valores máximos para  $N_{xx}$  e  $N_{yy}$ . A figura 19 corresponde aos valores de  $N_{xx}$ , sendo a segunda uma ampliação do trecho com maiores valores da estrutura. Também estão demonstrados os diagramas contendo momentos, justificando a exclusão.

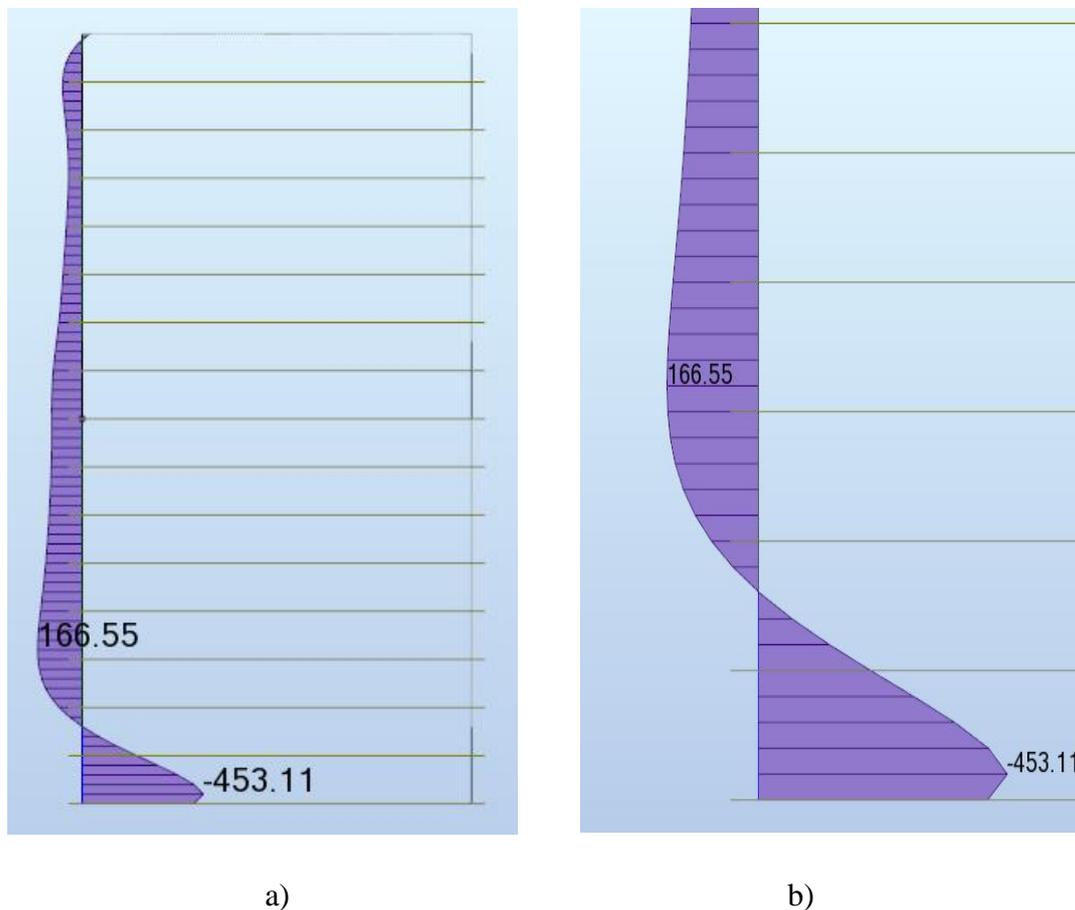
Figura 19 – a) Diagramas de  $N_{xx}$  nas paredes em kN/m e b) Ampliação no trecho com maiores valores



(fonte: elaborado pelo autor.)

A figura 20 correspondem aos valores de  $N_{yy}$ , sendo a segunda uma ampliação do trecho com maiores valores da estrutura.

Figura 20 – a) Diagramas de  $N_{yy}$  nas paredes em kN/m e b) Ampliação no trecho com maiores valores



(fonte: elaborado pelo autor.)

Desse modo, constatamos que  $N_{xx}$  apresentam apenas esforços de compressão, com valor máximo de 873,33 kN/m. Já  $N_{yy}$  apresenta uma porção positiva (tração) e outra negativa (compressão), sendo o valor máximo de tração igual a 166,55 kN/m e a compressão máxima de 453,11 kN/m. Para o dimensionamento da estrutura, será verificado a resistência a compressão do concreto e calculadas as armaduras mínimas necessárias para suportar a tração, visto que o concreto possui baixa resistência nesse sentido. Utilizou-se as fórmulas a seguir:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4} \quad (\text{fórmula 57})$$

$$\frac{N}{esp} \leq 0,2 f_{cd} \quad (\text{fórmula 58})$$

$$A_s = \frac{N}{f_{yd}} \quad (\text{fórmula 59})$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15} \quad (\text{fórmula 60})$$

Sendo:

$f_{cd}$  = resistência de projeto do concreto;

$f_{ck}$  = resistência característica do concreto;

$N$  = força axial;

$esp$  = espessura da parede;

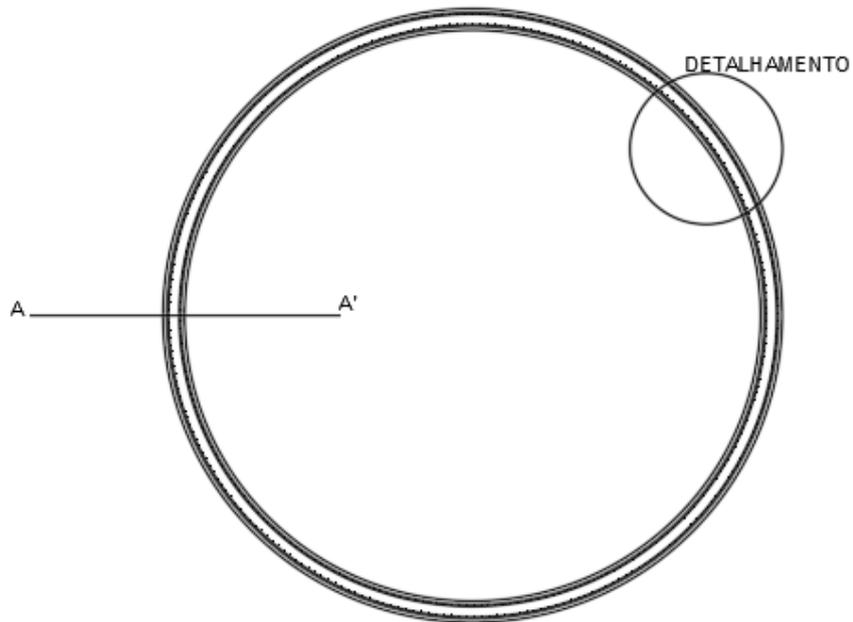
$A_s$  = área de aço;

$f_{yd}$  = resistência de projeto do concreto;

$f_{yk}$  = resistência característica do aço.

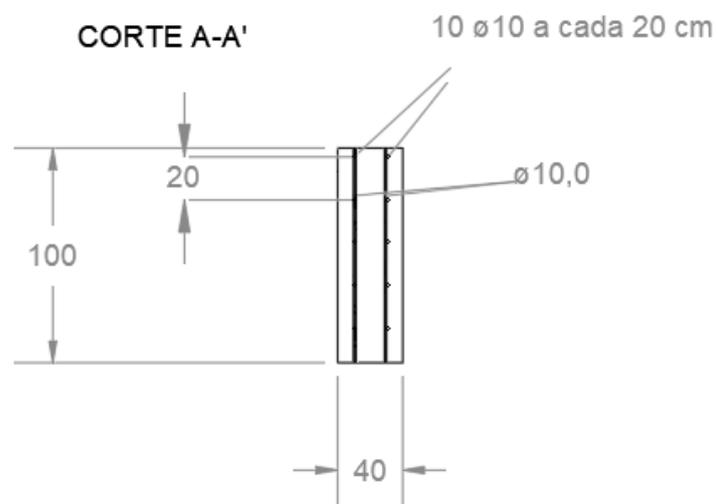
Desse modo, na direção de  $N_{xx}$  será necessário apenas a armadura mínima prevista em norma, 0,164% da área de concreto da estrutura, cerca de 6,6 cm<sup>2</sup>/m, enquanto na direção de  $N_{yy}$ , calculou-se a quantidade mínima necessária de aço utilizando as fórmulas 60 e 59 adotando um valor de  $N$  igual a 166,55 kN/m. Desse modo, é necessário aproximadamente 3,83 cm<sup>2</sup>/m. Para isso, optou-se por utilizar na direção de  $N_{xx}$ , 10 barras de diâmetro 10mm (8 cm<sup>2</sup>/m) a cada metro. Já na direção de  $N_{yy}$ , serão necessárias novamente 10 barras de diâmetro 10 mm (8 cm<sup>2</sup>/m) a cada metro para suportar os esforços a tração, respeitando o mínimo previsto em norma. As figuras a seguir contêm os detalhamentos das armaduras, sendo demonstrados na figura 22 o corte A-A' e na figura 23 o detalhamento da vista superior das armaduras da parede.

Figura 21 – Localização do corte A-A' na parede do silo.



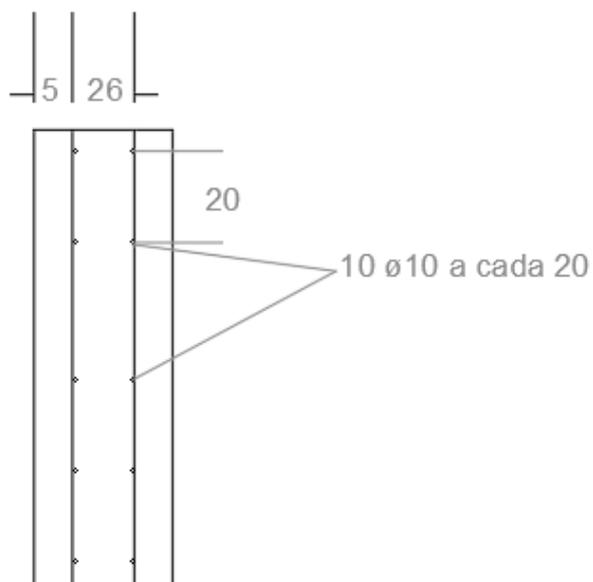
(fonte: elaborado pelo autor.)

Figura 22 – Corte A-A'



(fonte: elaborado pelo autor.)

Figura 23 – Detalhamento da armadura em vista superior da parede.



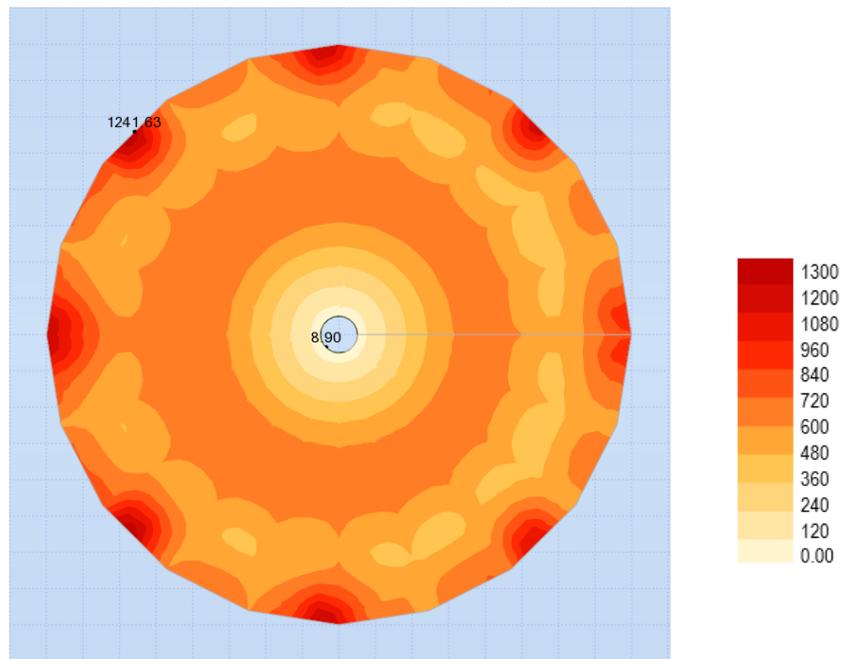
(fonte: elaborado pelo autor.)

### 8.3 TREMONHA

As tremonhas possuem método de cálculo similar aos das paredes do silo, possuindo apenas esforços preponderantes de tração e compressão, sendo demonstrados os maiores valores obtidos nas figuras abaixo. Cabe ressaltar a direção “xx” correspondem ao sentido radial da estrutura, enquanto os valores de “yy” correspondem ao sentido tangencial da tremonha.

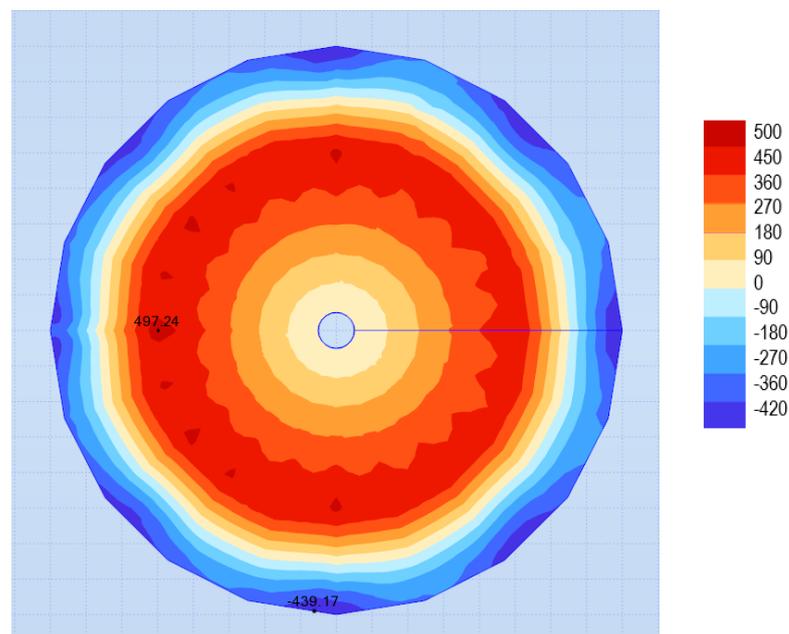
A seguir, encontram-se os diagramas de  $N_{xx}$  e  $N_{yy}$ :

Figura 24 – Diagramas de  $N_{xx}$  na tremonha em kN/m.



(fonte: elaborado pelo autor.)

Figura 25 – Diagramas de  $N_{yy}$  na tremonha em kN/m.



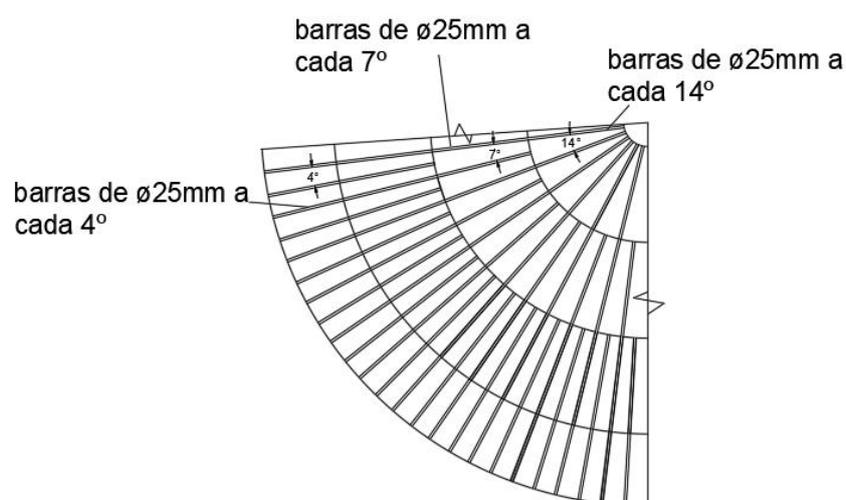
(fonte: elaborado pelo autor.)

É importante ressaltar que valores negativos correspondem à compressão, enquanto valores positivos, tração. Desse modo, utilizando as fórmulas 59 e 60, determinou-se que

a armadura necessária para suportar a tração em  $N_{xx}$  é de  $28,55 \text{ cm}^2 / \text{m}$ , ou seja, 6  $\phi$  25 mm a cada metro para suportar a tração máxima sobre a estrutura.

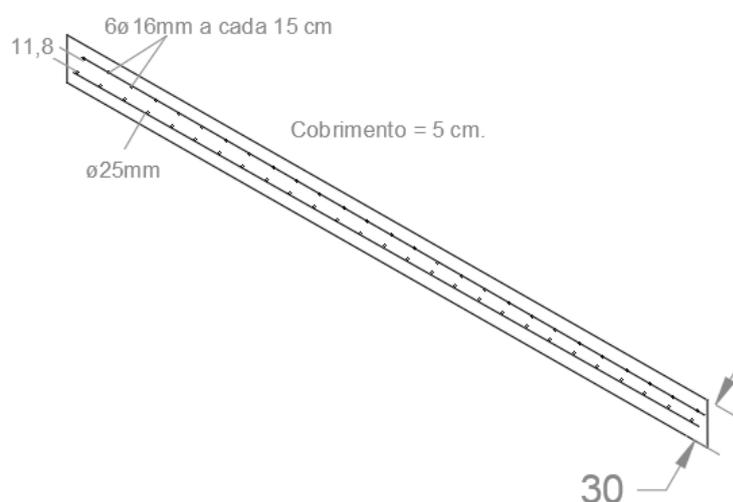
Já no sentido tangencial à tremonha, onde ocorre  $N_{yy}$ , obteve-se valores máximos de tração equivalentes a 497,24 kN, os quais necessitam de  $11,30 \text{ cm}^2/\text{m}$  de aço, ou seja, 6  $\phi$  16mm a cada metro no sentido tangencial da tremonha.

Figuras 26 – Disposição das armaduras em planta



(fonte: elaborado pelo autor.)

Figuras 27 – Disposição das armaduras em corte



(fonte: elaborado pelo autor.)

## 8.4 VIGAS

Utilizando o programa VigaS, dimensionou-se as vigas levando em consideração as seguintes solicitações:

- Esforço cortante;
- Momento fletor;
- Momento de torção.

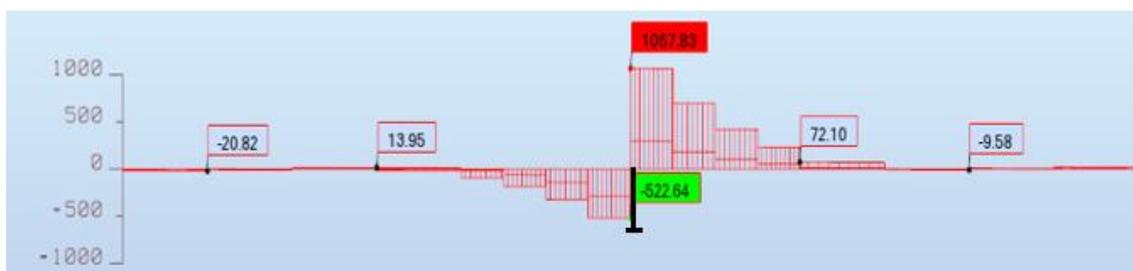
Os diagramas a seguir demonstram os valores máximos obtidos para cada solicitação.

Figura 28 – Momento fletor negativo e positivo máximo kNm (Pilar indicado na figura)



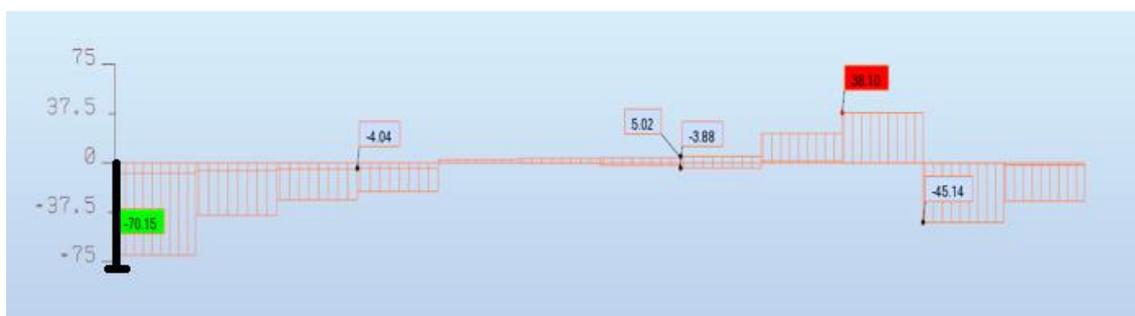
(fonte: elaborado pelo autor.)

Figura 29 – Esforço cortante máximo kN (Pilar indicado na figura).



(fonte: elaborado pelo autor.)

Figura 30 – Momento de torção máximo kNm (Pilar indicado na figura).



(fonte: elaborado pelo autor.)

A partir desses valores, calculou-se as áreas de aço e, por conseguinte, o número de barras adotado.

Tabela 13 – Áreas de aço e quantidade de barras.

Armaduras	Área de aço	Quantidade de barras
As +	3,88 cm <sup>2</sup>	5 barras de 10 mm
As -	16,85 cm <sup>2</sup>	5 barras de 25,0 mm
Asl	8,88 cm <sup>2</sup>	6 barras de 16,0 mm
Asw/S	40,41 cm <sup>2</sup> /m	2 estribos de 10,0 mm a cada 7,5 cm.
A90/S	5,78 cm <sup>2</sup> /m	1 estribo de 6,3 mm a cada 10 cm

(fonte: elaborado pelo autor.)

Onde:

As + : Armadura transversal para momento positivo;

As - : Armadura transversal para momento negativa, localizada na região de apoio dos pilares;

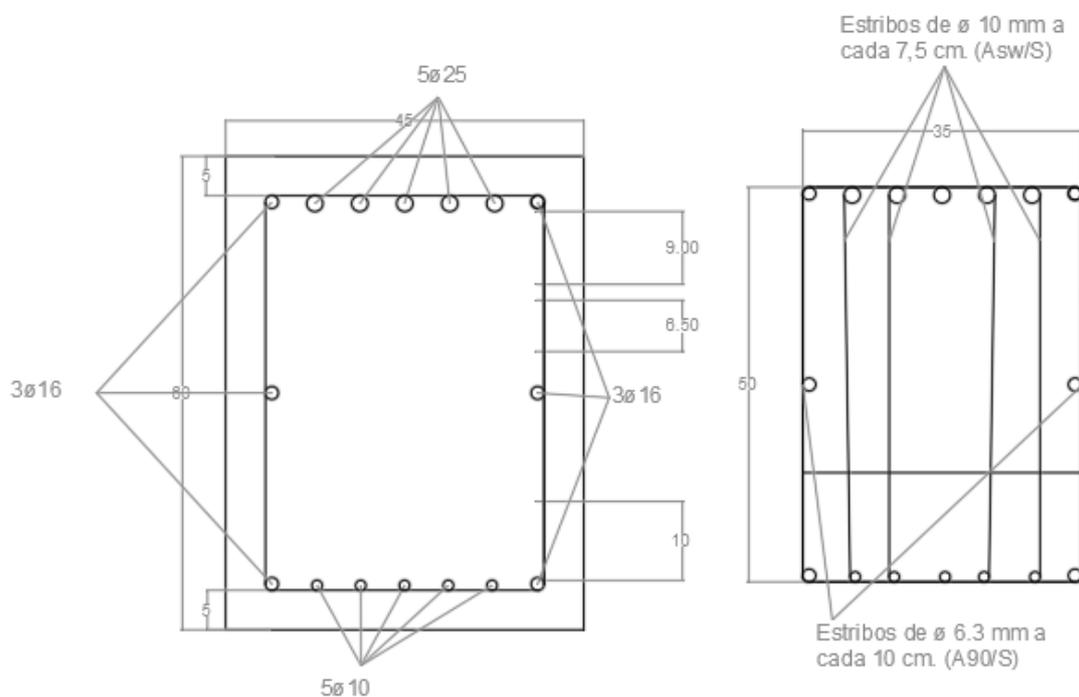
Asl: Armadura transversal para torção;

Asw/S: Armadura para esforço cortante (estribos).

A90/S: Armadura para torção (estribos).

Deve-se atentar a montagem da armadura da viga, de acordo com o detalhamento a seguir:

Figura 31 – Armaduras das vigas e estribos.

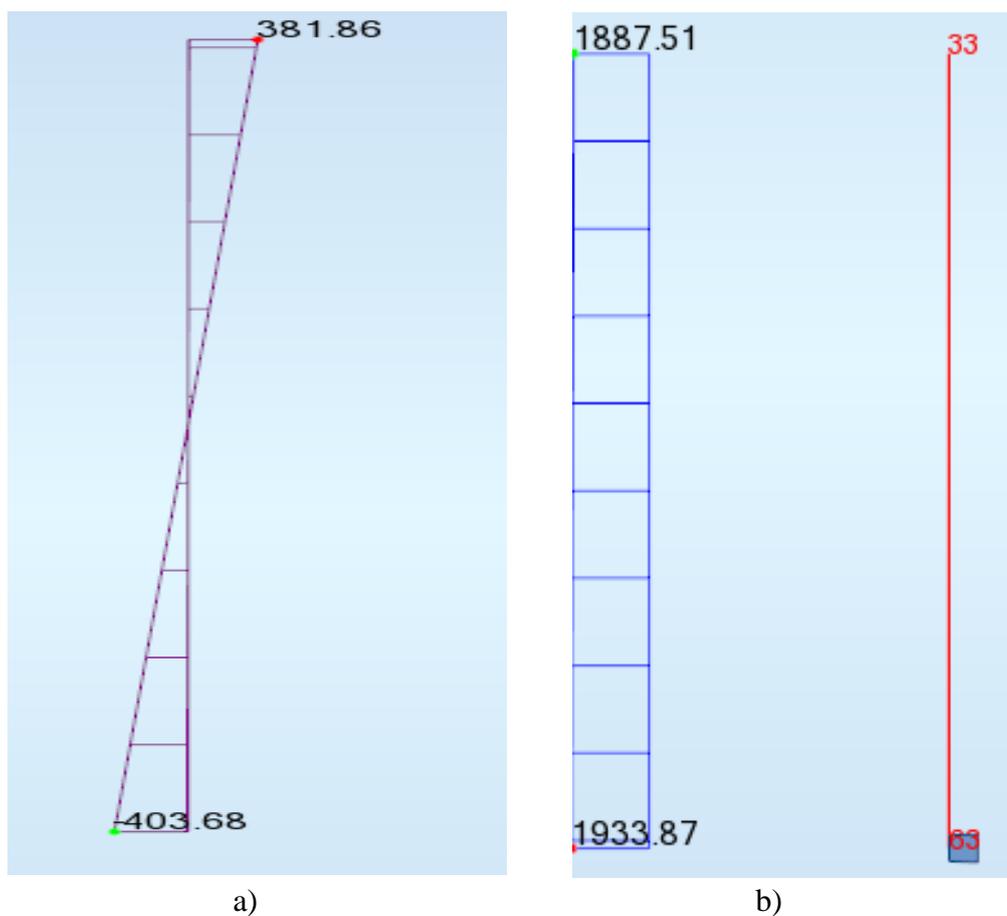


(fonte: elaborado pelo autor.)

## 8.5 PILARES

Através dos diagramas obtidos no Robot Structural Analysis Professional 2016 para momento fletor, momento de torção e esforço normal nos pilares, apresentados nas figuras abaixo, pode-se determinar a quantidade de aço mínima para suportar esses esforços.

Figura 32 – a) Diagramas de momento fletor em kNm. b) Esforço normal nos pilares em kN



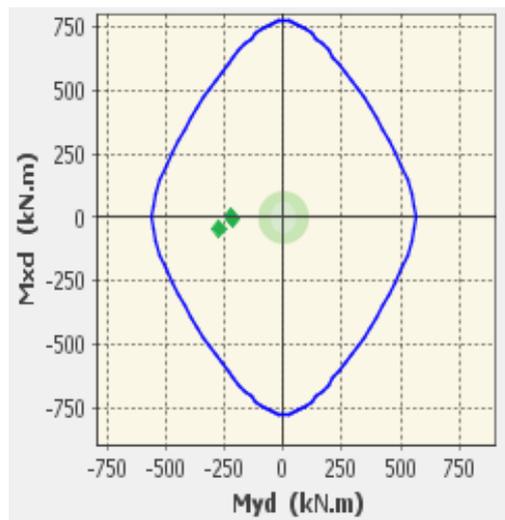
(fonte: elaborado pelo autor.)

Após considerado os carregamentos, sendo a força Normal 1933,87 kN, o momento Fletor -400 kNm na base e 381 kNm no topo do pilar, determinou-se que os pilares teriam dimensões de 60x45 cm e 5 m de altura, com 16 barras de diâmetro 20.0 mm.

Logo, utilizou-se o software Pcalc para verificar se a estrutura era capaz de suportar as solicitações geradas pelo silo.

A figura 34 demonstra os diagramas de interação obtidos através do Pcalc.

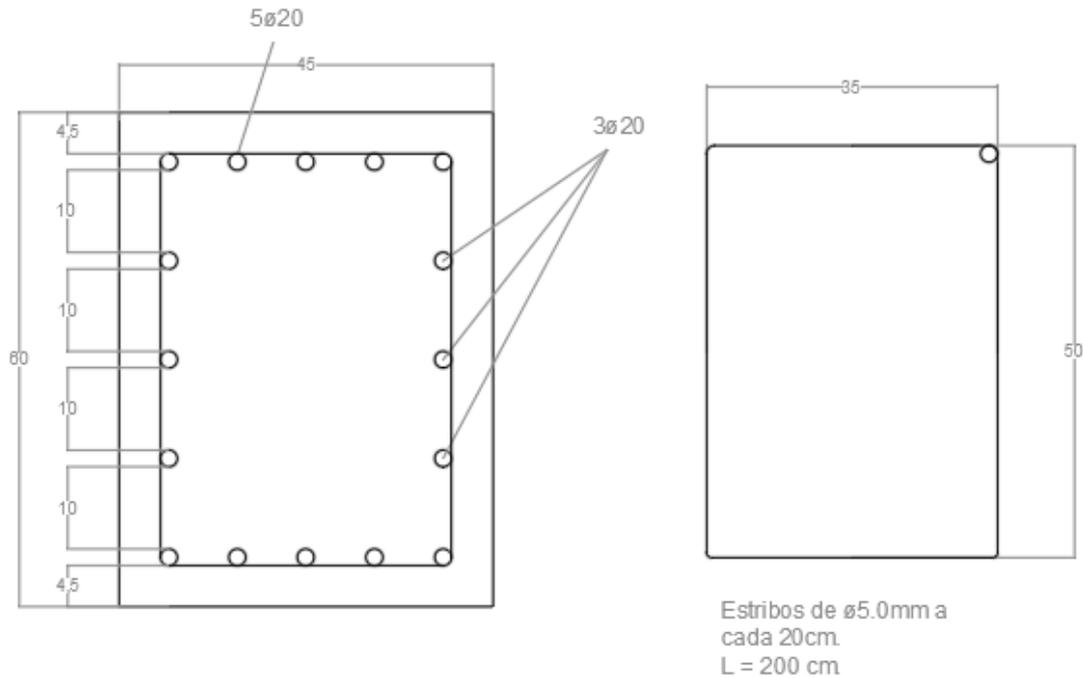
Figura 33– Diagrama de interação N,Mx e My dos pilares.



(fonte: elaborado pelo autor.)

Na figura a seguir está demonstrado a disposição das armaduras.

Figura 34 – Armaduras das pilares e estribos.



(fonte: elaborado pelo autor.)

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ideia inicial deste trabalho foi pôr em prática os conceitos adquiridos durante a graduação em Engenharia Civil, principalmente na área em questão, cálculo estrutural.

A escolha do dimensionamento de um silo ocorreu devido ao nosso país ser um expoente na produção de matéria-prima, e, tal como os “*pellets*”, necessitam de locais com grande capacidade de armazenamento para posteriormente ser remetidos para o exterior. Entretanto, mesmo havendo extenso uso de silos no Brasil, a literatura acerca do assunto é pífia, sendo necessário a utilização de normas e literaturas estrangeiras.

Dessa forma, para o dimensionamento da estrutura em questão é necessário considerar vários fatores relativos ao local onde se encontrará a estrutura, formato a ser adotado, volume da estrutura e, principalmente, o tipo de material a ser estocado, o qual determina os carregamentos relacionados às paredes e ao fundo da estrutura.

Portanto, neste trabalho foram descritas as etapas que correspondem ao projeto de um silo cilíndrico de concreto armado para o armazenamento de “*pellets*” de madeira, localizado na região de Rio Grande, Rio Grande do Sul. Para tal, foi utilizado as normas Europeias, as normas Brasileiras e o software Robot Structural Analysis Professional 2016 para a determinação dos carregamentos. Ao final destas etapas, atingiu-se o objetivo do projeto, a apresentação de um projeto de um silo em concreto armado para o armazenamento de “*pellets*” de madeira.

## 10 REFERÊNCIAS

SPEIGHT, J.G, **Synthetic Fuels Handbook: Properties, Process, and Performance**. McGraw-Hill Professional – 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 6123**: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 6120**: cargas para cálculo de estruturas em edificações. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 8681**: cargas para cálculo de estruturas em edificações. Rio de Janeiro, 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1991-4**: eurocode 1 – actions on structures – part 4: silos and tanks. Brussels, 2006.

SAFARIAN, S. S.; HARRIS, E. C. **Design and construction of silos and bunkers**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1985.

GARCIA, D. G. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. 2010. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

WU, M. R.; SCHOTT, D. L.; LODEWIJKS, G. **Physical properties of solid biomass**. Section of Transport Engineering and Logistics, Department of Marine and Transport Technology, Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands – 2010

RIOS, R. D., TROTT S., **VigaS**. Porto Alegre, 2006. Programa computacional.

CARDOSO, S. D., **PCALC**, São Paulo, 2014, Programa computacional. Disponível em <http://www.pcalc.com.br/download>. Acesso em 20 de abril de 2017