



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



WATARU IWAMOTO

PROJETO DE UM SILO EM CONCRETO ARMADO
PARA ARMAZENAGEM DE FARELO DE SOJA:
ESTUDO DE CASO DAS PRESSÕES DE PAREDES.

Uberlândia
2021

WATARU IWAMOTO

PROJETO DE UM SILO EM CONCRETO ARMADO
PARA ARMAZENAGEM DE FARELO DE SOJA:
ESTUDO DE CASO DAS PRESSÕES DE PAREDES.

Trabalho de Conclusão de Curso da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas de Concreto
Armado

Orientador: Arquimedes Diógenes Ciloni

Uberlândia

2021

WATARU IWAMOTO

PROJETO DE UM SILO EM CONCRETO ARMADO
PARA ARMAZENAGEM DE FARELO DE SOJA:
ESTUDO DE CASO DAS PRESSÕES DE PAREDES.

Trabalho de Conclusão de Curso da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas de Concreto
Armado

Uberlândia, 27 de outubro de 2021

Banca Examinadora:

Professor Doutor Arquimedes Diógenes Ciloni (UFU)

Professor Doutor Antônio Carlos dos Santos (UFU)

Professora Doutora Lauren Karoline de Sousa Gonçalves (UFU)

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo estímulo, carinho e compreensão, e a DEUS, sem ele nada seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores da Universidade Federal de Uberlândia que me influenciaram na minha trajetória e dos profissionais envolvidos no meu trabalho, que me motivaram à busca do aprendizado e a sempre me desafiar. Em especial, agradeço ao professor Arquimedes Diógenes Ciloni, meu orientador, com quem compartilhei minhas dúvidas e manteve ao meu lado diante das adversidades que o tema apresentava.

“Há apenas uma maneira de evitar críticas:
não falar, não fazer e não ser nada.”
(Aristóteles)

RESUMO

O Brasil tem grande capacidade produtiva agrícola e teve crescimentos significativos nos últimos anos. O setor agrícola tem o desafio da ampliação da capacidade de armazenamento de grãos alimentícios e de seus processamentos. As estruturas em silo de concreto armado têm sido utilizadas em todo o mundo, para o dimensionamento adequado e seguro, é necessário o conhecimento do comportamento das pressões que o produto exerce sobre as paredes verticais e sobre as paredes da tremonha. Os cálculos dos esforços atuantes na estrutura de um silo provocados por grãos ou farelo fundamentam-se em normas estrangeiras. O trabalho apresenta o cálculo das pressões de paredes ocasionados pelo enchimento e descarregamento de farelo de soja de um silo em concreto armado de dimensões pré-definidas (silo cilíndrico de tremonha plana) e realiza o cálculo de ventos pela norma brasileira. Foi utilizado software de métodos de elementos finitos (MEF) para o cálculo dos esforços das paredes, podendo assim realizar e concluir a verificação do dimensionamento de armaduras de uma seção da parede do silo, situada no seu nível intermediário.

Palavras-chave: Silos, paredes cilíndricas, concreto armado, pressões de paredes, farelo de soja.

ABSTRACT

Brazil has an extensive agricultural production capacity, with significant improvement in recent years. The agricultural sector has the issue of expanding the storage capacity for food grains and their processing following that development. Concrete silos structures have been used all over the world for proper and safe dimensioning. It is necessary to know the behavior of the pressures that the product exerts on the vertical walls and the walls of the hopper. The assessment of the efforts acting on the structure of a silo caused by grain or bran occurs based on foreign standards. The work presents the calculation of the wall pressures caused by the filling and unloading of soybean meal from a reinforced concrete silo of predefined dimensions (cylindrical silo with flat hopper) and performs the calculation of winds according to the Brazilian standard. A software for Finite Element Method (FEM) calculation was used to calculate the wall efforts, thus being able to carry out and conclude the verification of the reinforcement design of a section of the silo wall, located at its intermediate level.

Keywords: Silos, cylindrical walls, reinforced concrete, wall pressures, soybean meal.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Área e produção nacional de soja entre 2008/09 e 2020/21 (projetado)..... | 1 |
| Figura 2 – Área e produção de soja mundial entre 2008/09 e 2020/21 (projetado)..... | 1 |
| Figura 3 – Destino da soja brasileira 2021 (projetado) | 3 |
| Figura 4 – Modelos diversos de silos utilizados no armazenamento de produtos agrícolas. | 9 |
| Figura 5 – Padrões básicos de fluxo | 12 |
| Figura 6 – Padrões de fluxo de funil..... | 13 |
| Figura 7 – Tipos mais comuns de tremonhas. | 13 |
| Figura 8 – Teste de Cisalhamento em Célula de Carga de Jenike ou Jenike Shear Cell..... | 16 |
| Figura 9 – Lugar geométrico deslizante, analogia com o teste de compressão uniaxial. | 17 |
| Figura 10 – Medição da tensão de escoamento não confinada em um diagrama σ , τ | 17 |
| Figura 11 – Estado de tensão para várias condições da amostra. | 18 |
| Figura 12 – Efeitos da esbeltez do silo no fluxo..... | 23 |
| Figura 13 – Distribuição de pressões no silo com fundo plano conforme norma AS 3774 | 27 |
| Figura 14 – Pressões adicionais de carregamento e de descarregamento devido excentricidade em silo circulares de parede fina. | 30 |
| Figura 15 – Distribuição de pressões de vento nas paredes do silo..... | 36 |
| Figura 16 – Malha do silo no programa STRAP© e as referências de eixos dos esforços.. | 41 |
| Figura 17 – Detalhes típicos das armaduras verticais e circunferências da parede do silo. | 45 |
| Figura 18 – Ábaco para flexão composta normal. Ábaco A-4 | 47 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Balanço de oferta/demanda de janeiro a dezembro dos anos 2020-2021..... | 2 |
| Tabela 2 – Classificação dos silos segundo a relação h/d. | 10 |
| Tabela 3 – Situações do fluxo. | 11 |
| Tabela 4 – Limites das propriedades em função da análise a ser realizada..... | 15 |
| Tabela 5 – Classificação dos produtos em função do diâmetro das partículas..... | 16 |
| Tabela 6 – Classificação da capacidade de fluxo dos produtos..... | 19 |
| Tabela 7 – Granulometria do farelo da soja. | 22 |
| Tabela 8 – Propriedades físicas do farelo de soja..... | 22 |
| Tabela 9 – Pressões e parâmetros K para silos com fundo plano..... | 24 |
| Tabela 10 – Dados e parâmetros de entrada do projeto..... | 25 |
| Tabela 11 – Distribuição de pressões de carregamento nas paredes do silo. | 26 |
| Tabela 12 – Distribuições de pressões na base da tremonha. | 27 |
| Tabela 13 – Distribuições de pressões de descarregamento nas paredes do silo. | 29 |
| Tabela 14 – Dados de entrada para as pressões adicionais de excentricidade. | 30 |
| Tabela 15 – Distribuição das pressões adicionais de excentricidade. | 31 |
| Tabela 16 – Resumo do fator S_2 para classe B e categoria 3..... | 33 |
| Tabela 17 – Coeficientes de pressão externa C_{pe} | 34 |
| Tabela 18 – Pressões efetiva sobre as paredes do silo. $C_{pi} = 0,00$ | 35 |
| Tabela 19 – Pressões efetiva sobre as paredes do silo. $C_{pi} = -0,40$ | 35 |
| Tabela 20 – Cargas consideradas da laje de cobertura. | 38 |
| Tabela 21 – Combinações de Estado Limite Último e de Serviços aplicados no projeto. | 40 |
| Tabela 22 – Malhas da modelagem do silo no software STRAP2021©. | 40 |
| Tabela 23 – Critérios e formulações utilizados para cálculo de armadura da parede do silo... | 43 |
| Tabela 24 – Armadura vertical e comprimentos de emendas por transpasse..... | 46 |
| Tabela 25 – Armadura circunferencial e comprimentos de emendas por transpasse..... | 50 |

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

| | |
|--------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ABIOVE | Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais |
| ACI | American Concrete Institute |
| ANSI | American National Standard Institute |
| ANP | Agencia Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biodiesel (ANP) |
| AS | Australian Standard |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CONAB | Companhia Nacional de Abastecimento |
| DEM | Discrete Element Method |
| EN | European Committee of Standardization |
| MEF | Finite Element Method / Métodos dos Elementos Finitos |
| FECIV | Faculdade de Engenharia Civil |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| ISO | International Organization for Standardization |
| STRAP© | Structural Analysis Programs (Atirsoft) |
| UFU | Universidade Federal de Uberlândia |
| USDA | United States Department of Agriculture |

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas minúsculas

| | |
|--------------|---|
| b | Parâmetro meteorológico usado na determinação de S_2 ou cota acima do terreno |
| c | Coesão, constante auxiliar |
| ff | Fator fluxo da tremonha |
| g | Aceleração da gravidade |
| h | Altura do silo |
| p_v | Pressão vertical |
| $p_{v,c}$ | Pressão vertical de carregamento |
| $p_{p,d}$ | Pressão vertical de descarregamento |
| p_h | Pressão horizontal |
| $p_{h,c}$ | Pressão horizontal de carregamento |
| $p_{h,d}$ | Pressão horizontal de descarregamento |
| $p_{n,t}$ | Pressão normal na parede da tremonha |
| $p_{n,t(c)}$ | Pressão normal na parede da tremonha de carregamento |
| $p_{n,t(c)}$ | Pressão normal na parede da tremonha de carregamento |
| $p_{n,t(d)}$ | Pressão normal na parede da tremonha de descarregamento |
| p_w | Tensão de atrito |
| $p_{w,t}$ | Tensão de atrito na parede da tremonha |
| q | Variável auxiliar |
| r | Raio do silo ou distância do orifício da tremonha a um ponto da parede |
| s | Distância, função da tensão adimensional radial pela teoria de Jenike |
| t | Espessura, espessura da chapa do silo metálico ou tempo. |
| x | Eixo cartesiano x |
| y | Eixo cartesiano y |
| z | Eixo cartesiano z |
| z' | Eixo cartesiano z' é o eixo z com direção oposta |
| z_0 | Altura de referência de mudança de comportamento |

Letras romanas maiúsculas

| | |
|-----------------|---|
| A | Área, função auxiliar |
| C | Taxa de compactação, constante da tremonha |
| C_d | Coefficiente de sobrepressão |
| $C_{d,h}$ | Coefficiente de sobrepressão horizontal |
| $C_{d,v}$ | Coefficiente de sobrepressão vertical no fundo |
| $C_{d,a}$ | Coefficiente de sobrepressão para a força de atrito |
| D | Diâmetro do silo, menor dimensão de um silo com forma retangular |
| E | Módulo de elasticidade |
| E_{si} | Módulo de elasticidade do aço da barra |
| F_r | Fator de rajada |
| FF | Função fluxo |
| K | Relação entre a pressão horizontal e a vertical |
| H | Altura do silo na cota de referência, altura da tremonha |
| R | Raio hidráulico, variável aleatória de resistência |
| U | Perímetro |
| V | Volume |
| T | Período, tempo, temperatura |
| X | Constante para o modelo de pressões para o fluxo de funil de Jenile |
| Y | Constante para o modelo de pressões para o fluxo de funil de Jenile |
| P_w | Força de atrito acumulada |
| $P_{wc,d(max)}$ | Força de atrito de descarregamento máximo acumulada |

Letras gregas minúsculas

| | |
|-------------|---|
| ϕ_w | Ângulo de atrito entre o produto armazenado e o material da parede do corpo do silo |
| ϕ_r | Ângulo de repouso do produto |
| ϕ_i | Ângulo de atrito interno |
| ϕ_c | Ângulo de atrito interno |
| ϕ_{ef} | Ângulo de atrito efetivo |
| γ | Peso específico, deformação angular |
| μ | Coefficiente de atrito do produto com a parede. |
| σ | Tensão normal, desvio padrão |

| | |
|----------------|--|
| σ_{si} | Tensão de tração no centro de gravidade da armadura |
| σ_{ξ} | Tensão circunferencial |
| σ_w | Tensão normal na parede |
| τ | Tensão de cisalhamento |
| τ_w | Tensão de cisalhamento na parede |
| ν | Coefficiente de Poisson |
| ρ_{ri} | Taxa de armadura passiva ou ativa aderente em relação à área da região de envolvimento |
| λ | Multiplicador de Lagrange, parâmetro de locação da distribuição lognormal |
| δ | Coefficiente de variação, deslocamento ou variação |
| η_1 | Coefficiente de conformação superficial da armadura |
| θ | Ângulo ou parâmetro a ser estimado |
| Δt | Intervalo de tempo |

Lista de índices subscritos

| | |
|--------|--------------------------------------|
| c | Carregamento |
| d | Dinâmico ou descarregamento |
| w, c | Parede do corpo do silo |
| n | Número de operações, período de anos |
| max | Valor máximo |
| min | Valor mínimo |

SUMÁRIO

| | |
|---|-------------|
| RESUMO | vii |
| ABSTRACT | viii |
| LISTA DE FIGURAS | ix |
| LISTA DE TABELAS | x |
| LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS | xi |
| LISTA DE SÍMBOLOS | xii |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. Contextualização e aplicações..... | 4 |
| 1.2. Bibliografias e pesquisas pertinentes para o trabalho..... | 5 |
| 1.3. Objetivos da pesquisa | 6 |
| 1.4. Delimitações..... | 6 |
| 1.5. Organização do trabalho..... | 7 |
| 2. SILOS..... | 7 |
| 2.1. Classificação dos silos e tipos de fluxos..... | 8 |
| 2.1.1. Geometria do silo | 8 |
| 2.1.2. Tipo do fluxo durante o descarregamento | 10 |
| 2.1.3. Geometria de fluxo | 11 |
| 2.1.4. Tipo de fundo..... | 12 |
| 2.1.1. Obstrução do fluxo..... | 13 |
| 2.2. Propriedades físicas dos materiais armazenados..... | 14 |
| 2.2.1. Parâmetros medidos | 15 |
| 2.2.1.1. Granulometria | 15 |
| 2.2.1.2. Ângulo de atrito interno e ângulo de atrito interno efetivo..... | 16 |
| 2.2.1.3. Ângulo de atrito do produto com a parede | 18 |
| 2.2.1.4. Função fluxo (FF) | 18 |
| 2.2.1.1. Fator fluxo (ff) | 19 |
| 2.2.1.2. Densidade..... | 20 |
| 3. CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO..... | 20 |
| 3.1. Pressões de projeto | 21 |
| 3.1.1. Propriedades do sólido armazenado..... | 22 |
| 3.1.2. Cargas nas paredes verticais | 22 |
| 3.1.2.1. Cargas de enchimento do silo | 23 |
| 3.1.2.2. Cargas de esvaziamento do silo | 28 |

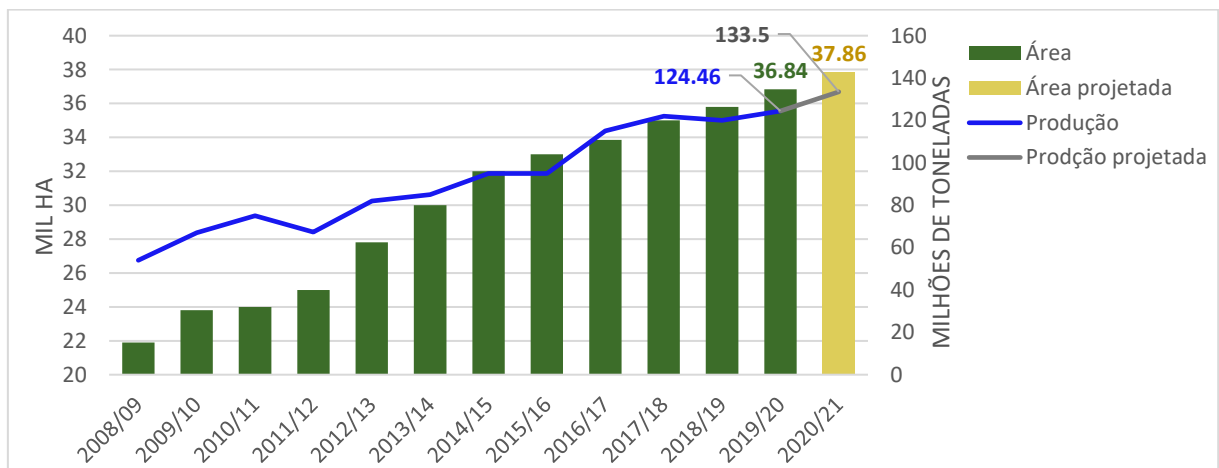
| | |
|---|-----------|
| 3.1.2.1. Pressões adicionais | 28 |
| 3.1.2.2. Pressões devido ao vento | 32 |
| 3.1.3. Cargas permanentes e laje superior da cobertura..... | 38 |
| 3.1.4. Cargas térmicas..... | 38 |
| 3.2. Combinações de ações | 38 |
| 3.3. Modelagem numérica | 40 |
| 3.4. Dimensionamento da estrutura | 42 |
| 3.4.1. Paredes verticais | 42 |
| 3.4.1.1. Armadura vertical | 42 |
| 3.4.1.2. Armadura de tração (circunferencial) | 46 |
| 4. CONCLUSÃO..... | 50 |
| 4.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 51 |
| REFERÊNCIAS | 53 |
| ANEXO A – RESULTADOS DA MODELAGEM | 57 |
| ANEXO B – MODELO DO PROJETO DE SILO EM CONCRETO ARMADO | 67 |

1. INTRODUÇÃO

O Brasil tem grande capacidade produtiva agrícola devido à riqueza de recursos naturais e da vasta extensão em área do seu solo. Nestes últimos anos, o setor teve crescimentos significativos mesmo com o cenário do enfrentamento da Pandemia do COVID-19, que tem impactado nas produtividades de diversos setores da economia. Nesse sentido, o segmento agrícola tem enfrentado o desafio de manter a capacidade de armazenamento dos produtos e seus processamentos proporcional ao crescente potencial produtivo.

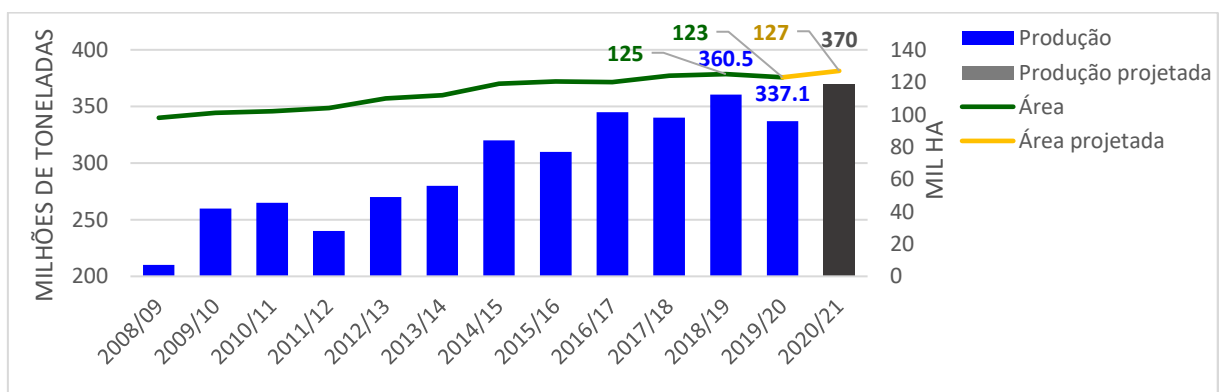
Para a safra de grãos, a produção principal é a de soja. O Brasil continua a ser o maior produtor de soja do mundo, com 35,37% da produção mundial, seguido dos EUA, com 32,51%. Para o ano de 2021, temos novamente uma expectativa de crescimento da área e da produção no País para valores recordes, ver Figura 1 e 2. A safra 2020/21 é a maior da produção da série histórica, estimada em 133.508,3 milhões de toneladas (CONAB, 2020).

Figura 1 – Área e produção nacional de soja entre 2008/09 e 2020/21 (projetado).



Fonte: CONAB, volume 8 (2020).

Figura 2 – Área e produção de soja mundial entre 2008/09 e 2020/21 (projetado).



Fonte: USDA apud CONAB, volume 8 (2020).

Durante a Pandemia, devido as altas da soja, a mistura do biodiesel foi antecipada de B12% para B13% em 2020 e agora, para abril de 2021, na nota conjunta da Agencia Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biodiesel (ANP), a mistura foi reduzida provisoriamente para B10%, já que o consumo de óleo tem mercado garantido na produção de biodiesel e o mercado mundial terá forte demanda pela soja, principalmente em decorrência dos baixos estoques do produto nos EUA, de problemas de safras da Argentina e da crescente demanda da China (ANP, 2021). Isso acarretou a baixa expectativa de aumento dos processamentos de soja a partir de maio de 2021.

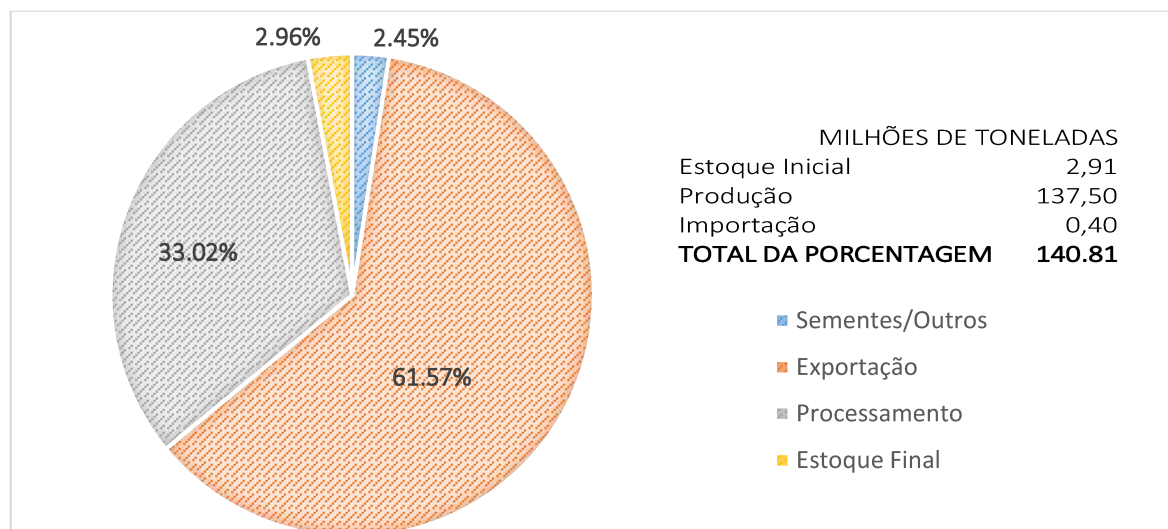
É esperada uma exportação de soja próxima de 86,70 milhões de toneladas, conforme representada na projeção na Tabela 1. A demanda interna total (soja, esmagamentos, sementes e perdas) está estimada em 49,95 milhões de toneladas (ABIOVE, 2020). O balanço de oferta e as porcentagens do destino da soja brasileira estão ilustradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Balanço de oferta/demanda de janeiro a dezembro dos anos 2020 e 2021 (projetado).

| Discriminação | 2020 (ESTIMADA) | 2021 (PROJEÇÃO) |
|--------------------------------|--------------------------|-----------------|
| 1. Soja | Unidades 1.000 toneladas | |
| 1.1. Estoque Inicial | 7.224 | 2.910 |
| 1.2. Produção | 127.989 | 137.500 |
| 1.3. Importação | 822 | 400 |
| 1.4. Sementes/Outros | 3.307 | 3.446 |
| 1.5. Exportação | 82.973 | 86.700 |
| 1.6. Processamento | 46.845 | 46.500 |
| 1.7. Estoque Final | 2.910 | 4.164 |
| 2. Farelo | | |
| 2.1. Estoque Inicial | 1.338 | 1.473 |
| 2.2. Produção | 36.021 | 35.539 |
| 2.3. Importação | 5 | 6 |
| 2.4. Exportação | 16.938 | 16.900 |
| 2.5. Vendas no Mercado Interno | 18.952 | 17.400 |
| 2.6. Estoque Final | 1.473 | 2.718 |
| 3. Óleo | | |
| 3.1. Estoque Inicial | 299 | 415 |
| 3.2. Produção | 9.557 | 9.398 |
| 3.3. Importação | 199 | 200 |
| 3.4. Exportação | 1.110 | 1.200 |
| 3.5. Vendas no Mercado Interno | 8.530 | 8.700 |
| 3.6. Estoque Final | 415 | 113 |

Fonte: ABIOVE - Gerência de Economia (2020).

Figura 3 – Destino da soja brasileira 2021 (projetado)



Fonte: Adaptado de ABIOVE - Gerência de Economia (2020).

O destino da soja pode ser verificado na Figura 3. A China deve continuar a ser o maior destino da soja brasileira, com aproximadamente 80% de todas as exportações de 2021.

Embora esse cenário seja satisfatório para a produção agrícola do país, em que o setor produtivo de grãos no Brasil segue evoluindo, a armazenagem não acompanha esta tendência. “A questão da deficiência de espaço de armazenagem no Brasil é uma situação atual. E a solução está na construção de mais unidades de armazenagem, agilização de fluxos, utilização de estruturas temporárias, como os silos bolsa, e planejamento logístico com informações regionalizadas”, conforme afirma Stelito Reis, superintendente de armazenagem da CONAB (2021).

Pesquisas indicam ainda que no 1º semestre de 2020, a capacidade disponível para armazenamento no Brasil foi de 176,5 milhões de toneladas, 0,7% inferior ao semestre anterior. Silos representam 48,7% da capacidade total de armazenagem do país (IBGE, 2020).

O Rio Grande do Sul possui o maior número de estabelecimentos de armazenagem (1.920) e o Mato Grosso a maior capacidade (43,8 milhões de toneladas). O maior volume estocado era de soja (30,8 milhões de toneladas), seguido pelos estoques de milho (13,3 milhões), arroz (4,1 milhões), trigo (1,9 milhão) e café (839,4 mil). Estes produtos constituem 96,2% do total estocado entre os produtos monitorados (IBGE, 2020).

Neste contexto, faz-se necessário o desenvolvimento de projetos estruturais para silos que possam garantir o armazenamento adequado dos grãos e também dos seus processamentos.

1.1.Contextualização e aplicações

Com base nas informações dadas pela CONAB, IBGE e da ABIOVE, percebe-se a importância da ampliação da capacidade estática de rede de armazenagem do país com a construção de silos verticais, seguindo técnicas fundamentadas em normas construtivas, bem como o uso de materiais adequados para tal finalidade.

Os recipientes verticais são utilizados para armazenamento de grãos há alguns séculos e, com o aumento da produção e da comercialização de grãos, a partir da metade do século XIX, é que se teve o início as construções dos silos de grande porte. As unidades armazenadoras de grãos, recebendo a produção que não encontra consumo imediato, formam os estoques que permitem a distribuição cronológica dos produtos e impedem as flutuações de preços que resultam das safras e entressafras (PUZZI, 1977). Já para o processamento, armazenamento de farelo, advindo do esmagamento de soja é armazenado para produção de ração, principalmente.

Neste presente trabalho, será abordado a construção de um silo em concreto armado, cujo modelo se viabiliza para silo com maiores cargas estáticas, quando comparada aos materiais mais pesados como clínquer – fora do contexto da agrícola – e como, por exemplo, armazenagens de farelos, onde grandes diâmetros e altura são possíveis, ao contrário de armazém de grãos cujas dimensões do silo são limitadas devido às quebras dos grãos. Por outro lado, os armazéns em silos metálicos têm sido usados mais frequentemente por sua versatilidade para grãos, ainda mais com os novos modelos em sistemas herméticos, sistemas de aerações ou secadores.

Segundo SAFARIAN E HARRIS, (1985), o uso de concreto armado possui algumas vantagens como:

- a) Por apresentar maior espessura de paredes, são menos propensas ao amassamento ou flambagens;
- b) Normalmente requer menos manutenção em relação aos outros materiais;
- c) É um tipo de material que pode assumir diversas formas necessárias, pois é flexível quanto à moldagem.
- d) É um material relativamente inerte, não exigindo instalação de revestimento protetor entre os grãos e a parede.

No entanto, o concreto armado possui desvantagens frente aos silos de aço, como alto custo de implantação, maior tempo de execução, maior incidência de quebra do grão devido à altura do silo, cargas pesadas e fundações mais sofisticadas e suscetíveis a fissuração. Embora o silo apresente melhor conservação dos grãos frente as variações de temperatura, a fissuração deve ser avaliada com cuidado.

O dimensionamento correto, seguro e econômico de silos envolve um conhecimento técnico para execução e acompanhamento das operações, além de ser indispensável o conhecimento das propriedades físicas e de fluxos dos produtos armazenados (HENZEL, 2007; SILVA, 2003).

1.2. Bibliografias e pesquisas pertinentes para o trabalho

As estruturas em silo têm sido utilizadas em todo o mundo, porém o cálculo das pressões exercidas pelo produto armazenado é muito variado entre os pesquisadores e as normas existentes (FREITAS, 2001; HENZEL, 2007).

É necessário fundamentar-se em normas estrangeiras para os cálculos dos esforços atuantes na estrutura do silo provocados por grãos ou farelo.

Nos últimos anos, em função das rupturas e colapsos ocorridos em silos, as ações têm sido majoradas além do necessário, segundo MCLEAN (1985 apud FREITAS, 2001).

Dentre as dissertações de mestrado e teses de doutorado, são citadas algumas a fim de formar um ponto de partida para a pesquisa sobre o assunto.

CALIL (1990), em sua tese de Livre Docência intitulada “Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais” realiza o estudo das teorias e práticas que envolvem as várias fases de carregamento e fluxo de produtos armazenados, propondo recomendações para o armazenamento destes produtos em silos. É um dos primeiros trabalhos de considerações de fluxos e pressões para elaboração de projetos de silos, tendo direcionamento importante para este trabalho.

MILANI (1993) desenvolveu sua tese de Doutorado intitulada “Determinação das Propriedades de Produtos Armazenados para Projetos de Pressões e Fluxos de Silos” na tentativa de contribuir com o desenvolvimento de uma norma nacional para o projeto e construção de silos, apresentou definição de uma metodologia para a determinação das propriedades dos produtos armazenados, com base em estudos teóricos e experimentais. Como as pressões dos silos dependem do comportamento dos materiais armazenados, a determinação correta das propriedades é importante neste presente trabalho.

PALMA (2005) realizou um estudo teórico das pressões e do fluxo em silos verticais esbeltos exercidas pelo produto armazenado, na sua dissertação de mestrado intitulada “Pressões e Fluxo em Silos Esbeltos ($h/d \geq 1,5$)”, faz uma revisão bibliográfica aprofundada entre normas estrangeiras e este estudo irá dar direcionamento para o presente trabalho nas escolhas das normas estrangeiras para cálculo de pressões de armazenamento do silo.

CHEUNG (2007), em sua tese de doutorado, apresentou um estudo teórico, numérico e experimental das pressões exercidas nas paredes de silos esbeltos pelos produtos granulares armazenados, propondo a incorporação de parâmetros com propriedades estocásticas nos modelos de pressões conhecidos.

MADRONA (2008) apresenta, em sua dissertação de mestrado intitulada “Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica” um estudo teórico e numérico das pressões devidas ao produto armazenado em silos verticais com descarga excêntrica. As pressões de cargas excêntricas são importantes pois os silos, caso o procedimento de descarregamento dos produtos ocorra excentricidade de fluxo, deverá ser dimensionado com cargas adicionais adequadas. Silos dimensionados sem excentricidade não poderão ocorrer descarregamento excêntrico, seja em qualquer etapa da operação deles.

1.3.Objetivos da pesquisa

O objetivo geral é apresentar um estudo das pressões nas paredes do silo de dimensões pré-definidas e dimensionamento de armaduras em uma seção intermediária da parede do silo cilíndrico em concreto armado para armazenagem de farelos de soja (processamento do esmagamento).

1.4.Delimitações

O trabalho refere-se ao estudo de caso das pressões nas paredes do silo e dimensionamento de uma seção da parede de um silo cilíndrico esbelto de capacidade de armazenagem pré-definida. O estudo recorre à utilização de software de análise estrutural via método dos elementos finitos:

- Programa STRAP© (Atirsoft, 2021, versão demonstração para uso acadêmico)

O estudo de caso seguirá as seguintes delimitações:

- a) será válido apenas para silos de armazenagem de farelo de soja;
- b) silo tipo cilíndrico, com fundo plano, fluxo de funil e rosca extratora;
- c) localização da obra na cidade de Uberlândia no Estado de Minas Gerais;
- d) considerações de equipamentos, cujas cargas variam de cada fornecedor;
- e) cálculo e dimensionamento das aberturas das paredes não serão contemplados;
- f) cálculo e dimensionamento da laje de cobertura não serão contemplados;
- g) cálculo e dimensionamento da tremonha não serão contemplados;
- h) cálculo e dimensionamento das fundações não serão contemplados.

Sendo esse tipo de estrutura considerada especial e no Brasil por não existirem normas que fundamentem cálculos dos esforços atuantes na estrutura de um silo provocados por grãos ou farelo, fundamentar-se-á da norma europeia, EN 1991-4-2006 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION), da americana, ACI 313-2016 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE) e da australiana AS 3774-1996 (STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIAN).

Para o cálculo do dimensionamento de ferragem do concreto armado e das pressões de vento serão usadas as normas brasileiras: a NBR 6118 (ABNT, 2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento) e a NBR 6123 (ABNT, 1988 - Forças devido ao vento em edificações).

1.5. Organização do trabalho

1º Capítulo – introdução do tema e objetivos da pesquisa.

2º Capítulo – apresenta-se um estudo bibliográfico do tema onde são abordados os diversos fatores importantes e necessários para o estudo de caso em pauta como classificação de silos, comportamento dos grãos, tipos de fluxo, etc;

3º Capítulo – estudo de caso, determinação das pressões de paredes e tremonhas, dimensionamento das paredes, detalhamento, análises e outros;

4º Capítulo – conclusões finais sobre os objetivos do trabalho.

2. SILOS

Silo, em uma definição mais genérica, é toda construção destinada ao armazenamento de produtos sólidos (ROTTER, 2001, *apud* LOPES, 2009).

As normas estrangeiras que serão adotadas como referência deste trabalho, apresentam as definições de silos:

“[...] silos são estruturas verticais utilizadas para armazenamento de material granular”, (ACI-313, 2016).

“[...] silos são estruturas utilizadas para o armazenamento de partículas discretas e independentes”. (EN 1991- 4, 2006).

Serão apresentados modelos usuais de silo, alguns estão ilustrados na Figura 4.

- (a) Silo fundo plano metálico: atualmente são as melhores opção para armazenagens de grãos de longos períodos, atende produtores de todos os portes, pois os silos possuem várias capacidades e tamanhos;
- (b) Silo fundo elevado: são utilizados para armazenagens temporárias de recepção ou secagem e também para expedições dos grãos;
- (c) Silos de concreto: pode alcançar alturas e diâmetros elevados. Assim como os silos metálicos, possui boa hermeticidade se as aberturas estiverem devidamente seladas. Poder ser apoiados ou com fundo elevados;
- (d) Armazéns graneleiros: os produtos estocados são armazenados em piso com paredes de contenção lateral concreto ou em alvenarias e coberturas normalmente em estruturas metálicas. Rapidez na construção, baixo custo em relação ao silo metálico, não é indicado para armazenagens de longos período, pois o processo de aeração (ventilação) ocorre lentamente, o qual dificulta o expurgo;
- (e) Silo bolsa: utilizado para armazenagens de curtos períodos e para produtores de pequeno porte, possui uma capacidade de 180 a 250 toneladas. Além disso, o grão deve ser armazenado com baixa umidade, ou seja, totalmente seco, pois neste sistema não há processo de secagem;
- (f) Silos herméticos: é uma estrutura em tubo cilíndrico totalmente vedada. Assim, não há entrada de oxigênio na parte interna do silo, essa falta, aumenta o gás carbônico que facilita o controle das pragas. É um tipo de armazenamento moderno.

2.1. Classificação dos silos e tipos de fluxos

Para classificação técnica e dimensionamento de acordo da norma estrangeira EN 1991-4:2006, que é referência neste estudo, os silos classificam-se quanto a sua (i) geometria do silo, (ii) tipo de fluxo durante o descarregamento, (iii) geometria do fluxo e o (iv) tipo de fundo (FREITAS, 2001).

2.1.1. Geometria do silo

Os silos possuem classificação da geometria quanto a sua esbeltez, conforme norma EN 1991-4:2006:

Figura 4 – Modelos diversos de silos utilizados no armazenamento de produtos agrícolas em Uberlândia.
 a) Silo metálico apoiado modelo Kepler Weber na Uberzem Ltda. b) Silo metálicos elevados da Ambev.
 c) Silo em concreto armado fundo elevado em indústria de processamento e esmagamento de soja.
 d) Graneleiro na ADM do Brasil. e) Silos bolsa para armazenagem de sorgo.



Fonte: a) Google Earth (2021). b) Matec Engenharia (2021). c) Autor (2021).
 d) Conel Construtora (2021). e) Autor (2021).

- Silos esbeltos: $h/d \geq 2,0$;
- Silos de esbeltez intermediária: $1,0 \leq h/d < 2,0$;
- Silos entroncados: $0,4 \leq h/d < 1,0$;
- Silos de retenção: $h/d \leq 0,4$ e com fundo plano;

Sendo:

h : Altura do silo;

d : Diâmetro do silo.

A classificação pode variar de norma para norma, conforme representada na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação dos silos segundo a relação h/d .

| Norma | Classificação | | |
|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| | Baixo | Medianamente Esbelto | Esbelto |
| Australiana AS3774-1996 | $h/d < 1,0$ | $1 \leq h \leq 3$ | $h/d > 3,0$ |
| Europeia EN1991-4-2006 | $0,4 \leq h/d < 1,0$ | $1,0 \leq h/d < 2,0$ | $h/d \geq 2,0$ |
| Americana ACI-2016* | $h/d \leq 2,0$ | — — — | $h/d > 2,5$ |

* Não possui essa classificação. No cálculo teórico das pressões há diferenciação quando o silo tem a relação geométrica indicada.

Fonte: Adaptado de PALMA (2005) e CHEUNG (2007).

2.1.2. Tipo do fluxo durante o descarregamento

A descarga do produto armazenado por gravidade pode ocorrer conforme dois tipos principais de fluxo: por fluxo de massa e fluxo de funil (Figura 5).

O fluxo de funil caracteriza-se pela formação de um canal de fluxo, alinhado com a boca de descarga, cercado por uma zona na qual o produto permanece estático (zona parada ou estagnada). O fluxo de funil tende a ocorrer quando as paredes da tremonha são rugosas e seu ângulo de inclinação da tremonha é tal que gere uma transição abrupta entre o corpo do silo e a tremonha (JENIKE 1964, *apud* PALMA, 2005).

O fluxo de massa é caracterizado quando todas as partículas do produto armazenado estão em movimento durante a operação de descarga, sendo este fluxo o ideal a ser obtido sempre que possível. Todas as partículas estarão em movimento na descarga e o fluxo sendo uniforme poderá ser controlado, diminuindo a possibilidade de obstrução e melhor determinação das pressões das paredes.

Quando o fluxo de massa ocorre, o produto se move todo de uma vez, fazendo com que ocorra uma remistura na tremonha, permitindo maior homogeneização e diminuindo segregações dentro do silo. As situações de fluxo estão resumidas na Tabela 3.

Tabela 3 – Situações do fluxo.

| Fluxo | Situações do fluxo |
|----------------|---|
| Fluxo de funil | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Menor desgaste das paredes ao atrito do produto; ▪ Pressões variadas na parede, onde pressões menores ocorrem zona estagnada e altas pressões na região em que o canal de fluxo se encontra com a parede (transição efetiva). Picos de pressões na região de transição efetiva. ▪ A remistura será impossível para produtos que segregam com o carregamento do silo. ▪ Sujeito a flutuações de vazão, segregação dos sólidos, efeitos de consolidação com o tempo e obstrução de fluxos. ▪ Redução da capacidade de armazenamento devido áreas estagnadas e necessidade de esvaziamento total para renovação do produto armazenado. |
| Fluxo de massa | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Maior desgaste nas paredes e maior energia de elevação. ▪ O primeiro material a entrar no silo é o primeiro a sair, evitando-se que produtos suscetíveis se deterioreem com o tempo de permanência; ▪ O tempo de permanência do produto armazenado pode ser constante pois todas as partículas estão em movimento de descarga, renovando o produto. ▪ Determinação de pressões mais controladas e pressões maiores nas paredes localizadas próximas a transição do corpo do silo para a tremonha. Campos de tensões mais previsíveis. ▪ Possibilidade de homogeneização do material, diminuição da segregação. ▪ Toda a capacidade de armazenamento da unidade pode ser aproveitada. |

Fonte: Autor.

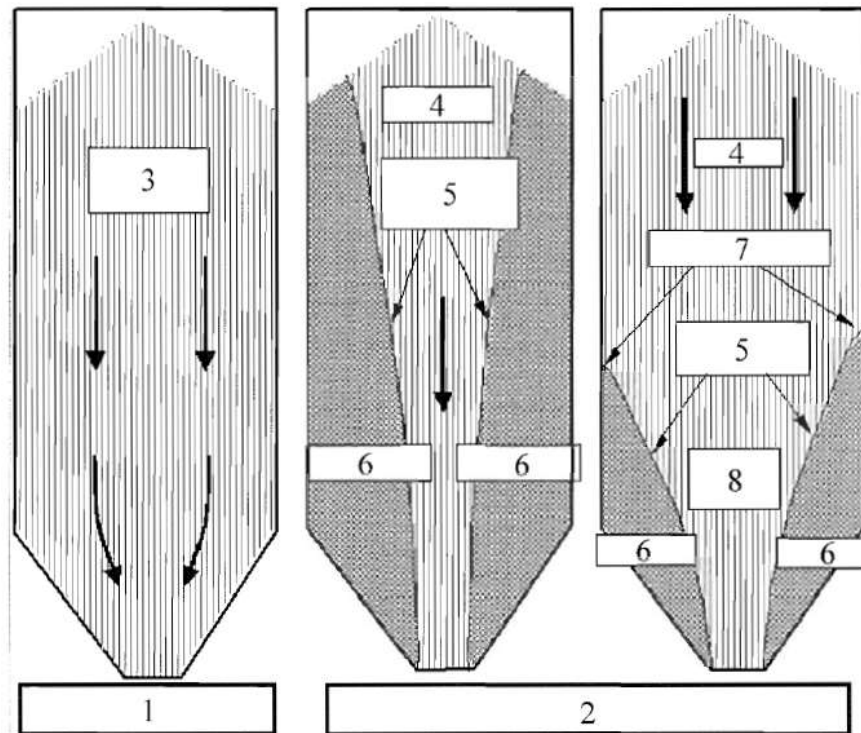
2.1.3. Geometria de fluxo

A geometria do fluxo, conforme FREITAS (2001) pode ser descrita como:

- a) Trajeto axissimétrico: o centro de gravidade do material em descarga coincide com o eixo vertical do silo;
- b) Trajeto planar: ocorre em silos de seção transversal retangular ou quadrada e com tremonhas em forma de cunha, no qual uma das dimensões da boca de saída é paralela e de igual comprimento a uma das paredes do silo. Ocorre um fluxo uniforme e simétrico em relação ao plano que passa pelo eixo longitudinal da abertura de saída.
- c) Trajeto excêntrico: o canal do fluxo não é simétrico em relação ao eixo vertical do silo.

Estão representados na Figura 6 os padrões de fluxo de funil.

Figura 5 – Padrões básicos de fluxo



Fluxo de massa

Fluxo de funil

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 1 Fluxo de massa | 5 Limites do canal de fluxo |
| 2 Fluxo de funil | 6 Zona estagnada |
| 3 Todos os sólidos em movimento | 7 Transmissão efetiva |
| 4 Funil | 8 Tremonha/funil eficaz |

Fonte: Tradução do Autor. Retirado da norma EN 1991.4.2006 p 29.

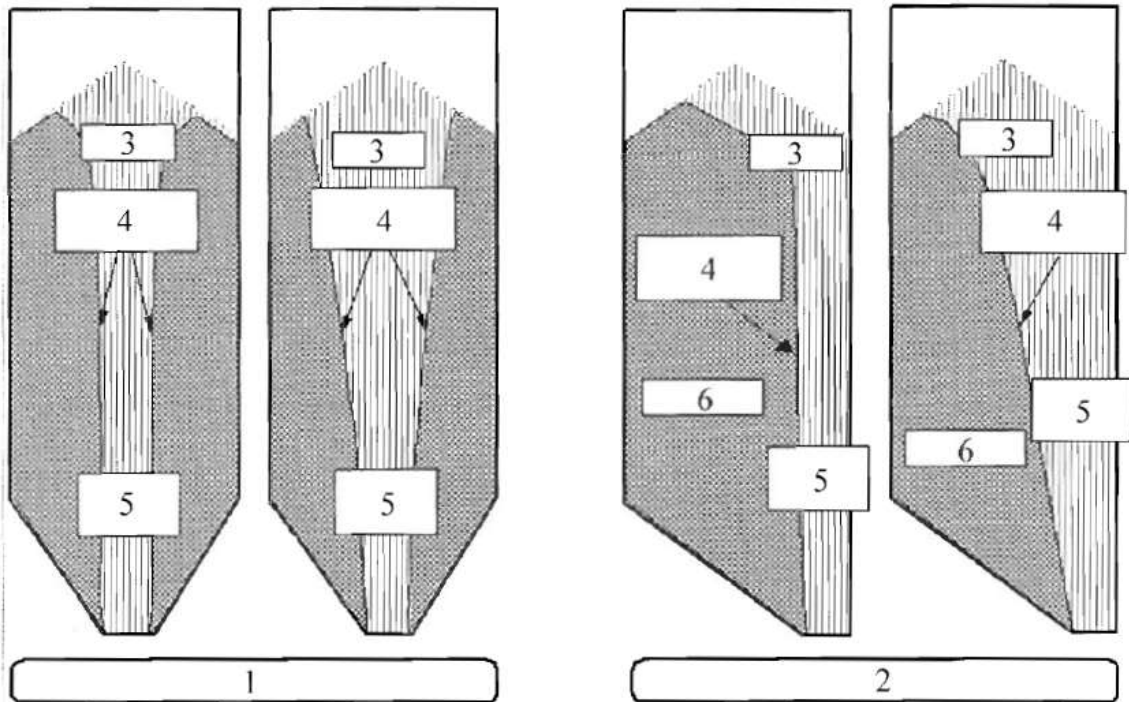
2.1.4. Tipo de fundo

Os silos podem ter os seguintes fundos:

- Fundo plano: o fundo do silo é horizontal ou com paredes inclinadas de um ângulo $\alpha \leq 20^\circ$ com relação a horizontal.
- Fundo com tremonha: fundo em formato de funil. Formas mais comuns são as troncocônicas e as tronco-pirâmides.

Os tipos de fundo da tremonha estão representados na figura 7.

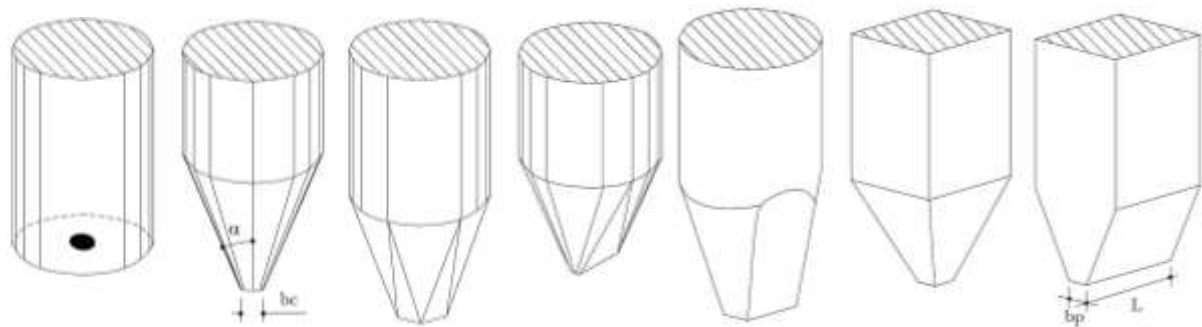
Figura 6 – Padrões de fluxo de funil



- | | | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Fluxo de tubo paralelo concêntrico | Fluxo de tubo inclinado concêntrico | Fluxo de tubo paralelo excêntrico | Fluxo de tubo inclinado excêntrico |
| 1 Canal de fluxo central | | 4 Limites do canal do fluxo | |
| 2 Canal de fluxo excêntrico | | 5 Fluxo de tubo | |
| 3 Fluxos | | 6 Zona estagnada | |

Fonte: Retirado da norma EN 1991.4.2006, p 30.

Figura 7 – Tipos mais comuns de tremonhas.



- FUNDO PLANO CÔNICA SAÍDA QUADRADA TRANSIÇÃO BISEL PIRAMIDAL CUNHA

Fonte: CHEUNG (2007).

2.1.1. Obstrução do fluxo

O produto armazenado, quando adquire resistência suficiente para suportar o seu peso próprio, forma uma obstrução do fluxo. Se o produto não se consolidar e durante o

esvaziamento não ocorrer obstrução, poderá ter um fluxo satisfatório (funil ou massa). Os tipos de obstrução de fluxo são em tubo e em arco com ou sem formação de abóbadas.

Para produtos finos e coesivos, a força de adesão existente entre partículas é a principal razão para formação de abóbadas, enquanto que, para produtos maiores (grãos), a principal causa é o entrosamento entre as partículas (PALMA, 2005).

A obstrução causa sérios danos aos silos e principalmente na tremonha, pois quando as massas consolidadas se rompem, podem causar impactos e também comprimem o ar existente na tremonha, levando a danos na boca de descarga e paredes laterais.

2.2. Propriedades físicas dos materiais armazenados

O comportamento das pressões que o produto exerce sobre as paredes verticais e fundo dependem das propriedades físicas dos produtos armazenados. As formas de determinações e seus valores variam significativamente entre as normas existente (FREITAS, 2001).

A determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados, também chamadas de propriedades de fluxo, de produtos coesivos ou não, depende do conhecimento do lugar geométrico da tensão de cisalhamento *versus* a tensão normal para o produto deslizando sobre si mesmo e sobre a parede do silo.

ROTTER *et al.* (1998) define os termos “propriedades” e “parâmetros”, segundo o qual o termo propriedade de um produto é um comportamento com respeito a influências externas (pressão, adensamento, etc.), enquanto um “parâmetro” é uma constante matemática que aparece em um modelo matemático e tenta descrever a propriedade ou uma parte dela.

Para determinação dos parâmetros apropriados para produtos de armazenagem, é utilizado o aparelho de “Jenike Shear Cell”, embora algumas limitações, tais como a baixa velocidade de cisalhamento e o limitado deslocamento (BENINK, 1989).

Os parâmetros dos materiais determinados são:

- Granulometria, ρ ;
- Peso específico, γ ;
- Ângulo de atrito interno, ϕ_i ;
- Ângulo de atrito efetivo, ϕ_{ef} ;
- Ângulo de atrito com a parede, ϕ_w

As propriedades dos produtos armazenados em silo podem variar durante a vida útil do silo (CALIL Jr *et al.* 1997 *apud* PALMA, 2002), por isso na norma europeia EN 1991-4:2006 (australiana e outras), em termos de projeto, deverão ser determinados dois limites para cada

parâmetro, de modo a delimitar a sua faixa de variação e, com isso, obter-se as combinações mais desfavoráveis para cada caso (PALMA, 2005). Na Tabela 4 estão representados os limites de propriedades em função da análise a ser realizada.

Tabela 4 – Limites das propriedades em função da análise a ser realizada.

| Análise | Aplicação das propriedades | | |
|--|--|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | Coeficiente de atrito com a parede μ | Coeficiente de empuxo lateral K | Ângulo de atrito interno ϕ_i |
| Para paredes verticais: | | | |
| Máxima pressão normal na parede vertical | Inferior | Superior | Inferior |
| Máxima pressão de atrito na parede vertical | Superior | Superior | Inferior |
| Máxima carga vertical na tremonha ou no fundo do silo | Inferior | Inferior | Superior |
| Para paredes da tremonha: | | | |
| Máxima pressão na parede da tremonha durante o carregamento | Inferior | Inferior | Inferior |
| Máxima pressão na parede da tremonha durante o descarregamento | Inferior | Superior | Superior |

Fonte: Modificada pelo autor (EN 1991-4, 2006, p26).

A norma europeia, EN 1991-4:2006 fornece o valor K em sua tabela C.2 para mais de 20 produtos para paredes lisas e rugosas, excluindo os de chapas onduladas horizontalmente (irregulares com classe D4). Para os produtos que não constam na tabela da norma, o valor de K pode ser determinado, experimentalmente, por metodologia definida em anexo da norma (obtenção direta com a determinação da pressão horizontal e vertical) ou de forma indireta, pela expressão de Jaky, considerando um coeficiente de segurança igual a 1,1, como a seguir:

$$K = 1,1(1 - \text{sen}(\phi_i)) \quad (1)$$

2.2.1. Parâmetros medidos

2.2.1.1. Granulometria

Como regra geral, os produtos que não contêm partículas menores do que 0,25 mm são produtos de fluxo livre (CALIL Jr., 1990), porém existem outros fatores que impedem que a massa flua, como por exemplo grãos que tendem a fermentar sob teores de umidades e condições atmosféricas adversos, adquirem resistência e deixam de ter um fluxo livre.

CALIL JR. (1984) recomenda que o produto armazenado seja classificado em função do diâmetro das partículas, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação dos produtos em função do diâmetro das partículas

| Diâmetro (mm) | Classificação |
|---------------------|--------------------------------|
| $D > 0,420$ | Granular |
| $0,420 > D > 0,149$ | Pulverulento coesivo |
| $0,149 > D > 0,079$ | Pulverulento coesivo fino |
| $D < 0,079$ | Pulverulento coesivo extrafino |

Fonte: CALIL Jr. (1984).

2.2.1.2. Ângulo de atrito interno e ângulo de atrito interno efetivo

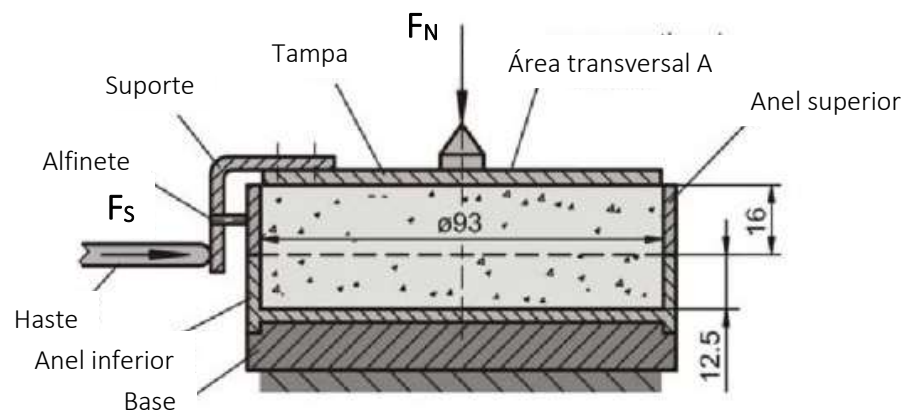
A determinação dos ângulos de atrito interno é realizada através do ensaio com a célula de carga de Jenike.

O aparelho de cisalhamento direto translacional desenvolvido por Jenike (1964) conhecido como célula de carga de Jenike ou *Jenike Shear Cell* (ver Figura 8), tem sido utilizado para medir as propriedades físicas de produtos a serem armazenados, visto que os resultados obtidos com a utilização de aparelhos específicos para solos não eram satisfatórios.

Os valores de cisalhamento devem ser determinados em função do número de cargas normais aplicadas na célula de carga de Jenike.

A partir de três pontos determinados, pode-se então desenhar o círculo de Mohr de estado estável, passando pelo ponto de pré-cisalhamento e tangenciando o lugar geométrico de deslizamento extrapolado, e o círculo de Mohr de resistência inconfínada, que passa pela origem e tangencia o lugar geométrico de deslizamento extrapolado.

Figura 8 – Teste de Cisalhamento em Célula de Carga de Jenike ou *Jenike Shear Cell*.



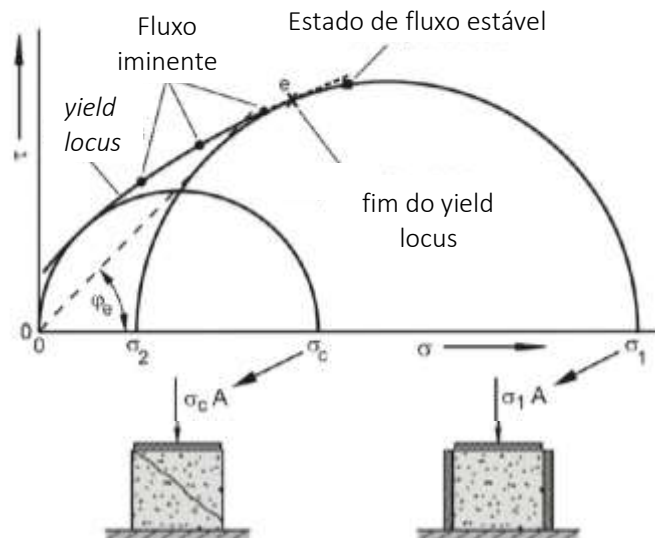
Fonte: Schulze D. (Flow Properties of Powders and Bulk Solids, 2011).

O ângulo de atrito interno do produto ϕ_i será o ângulo de inclinação da reta tangente do lugar geométrico de deslizamento do produto (YL – *yield locus*), ver Figura 9 e 10.

Para produtos de fluxo livre a reta que representa o YL passa pela origem, enquanto que para os demais produtos a reta construída da forma acima indicada não passa pela origem, sendo denominado de coesão c o ponto em que esta reta corta o eixo das ordenadas.

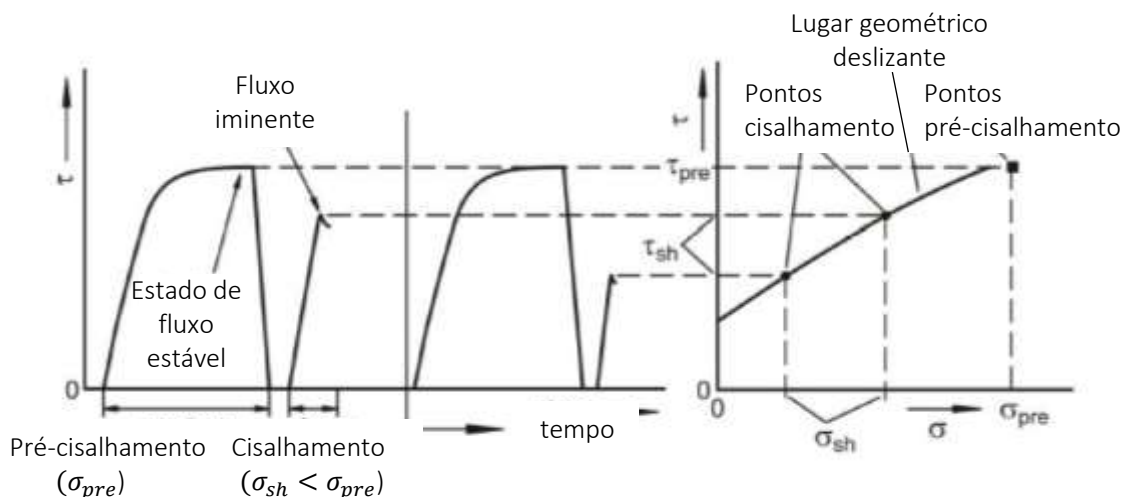
Construindo uma reta que una o ponto de tangência do lugar geométrico de deslizamento com o círculo de Mohr de maior tensão à origem obter-se-á o lugar geométrico de deslizamento efetivo instantâneo (EYL – *effective yield locus*) e o ângulo de inclinação desta reta será o ângulo de atrito interno efetivo ϕ_e . Desta forma, pode-se dizer que para produtos de fluxo livre $\phi_i = \phi_e$.

Figura 9 – Lugar geométrico deslizante (*yield locus*), analogia com o teste de compressão uniaxial.



Fonte: SCHULZE (2011).

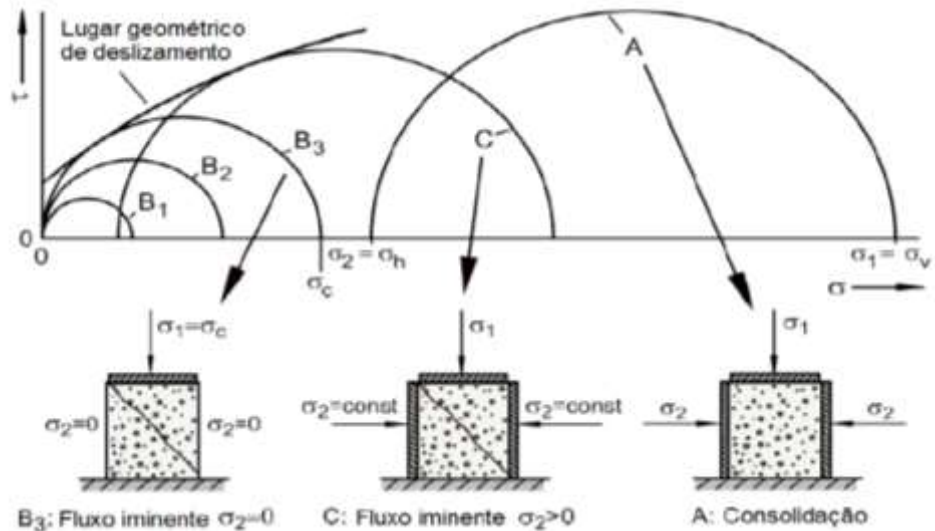
Figura 10 – Medição da tensão de escoamento não confinada em um diagrama σ, τ



Fonte: SCHULZE (2011).

A Figura 11 ilustra os vários estados de condição da amostra.

Figura 11 –Estado de tensão para várias condições da amostra.



Fonte: Schulze (2011).

2.2.1.3. Ângulo de atrito do produto com a parede

As retas obtidas pelo lugar Geométrico Instantâneo de Deslizamento com a Parede (WYL – *wall yield locus*) são determinados na mesma célula de cisalhamento usada para a determinação do IYL pela remoção da célula inferior, instalando-se um fundo do material da parede a ser testado.

O WYL é desenhado no mesmo diagrama do YL e seu ponto de intersecção determinado com o círculo de Mohr de maior consolidação. O ponto mais alto da intersecção é escolhido. O ângulo da linha que liga esse ponto à origem é o ângulo de atrito com a parede ϕ_w para a particular tensão de consolidação. Os testes são repetidos para outras tensões de consolidação.

2.2.1.4. Função fluxo (FF)

A capacidade do produto de fluir depende da resistência desenvolvida devido à consolidação e, como resultado da resistência, o produto é capaz de formar um arco estável, ou efeito tubo (CALIL Jr, 1990).

A diferença principal entre os produtos coesivos e não coesivos (ou de fluxo livre) é que os produtos coesivos apresentam tensão inconfínada de ruptura σ_c quando consolidados,

enquanto que nos não coesivos, o valor de σ_c é praticamente nulo, mesmo para grandes tensões de consolidação (MADRONA, 2008).

As curvas de σ_c versus σ_1 definem uma propriedade importante do produto, denominada Função Fluxo (FF), também definida por:

$$FF = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad (2)$$

Onde:

σ_1 : tensão máxima de consolidação;

σ_c : tensão resistente confinada.

JENIKE (1964) elaborou uma classificação dos produtos de acordo com o valor FF , que está representada na Tabela 6.

Tabela 6 – Classificação da capacidade de fluxo dos produtos.

| FF | Classificação |
|-------------|----------------------|
| FF < 2 | Muito coesivo |
| 2 > FF > 4 | Coesivo |
| 4 > FF > 10 | Flui facilmente |
| FF > 10 | Fluxo livre |

Fonte: JENIKE (1964).

A consolidação com o tempo é um fator importante a ser considerado também ao determinar as propriedades físicas dos produtos, pois a maioria dos produtos adquire resistência quando estocados por certo período de tempo, mesmo quando se mantém constante no seu estado de tensão (MADRONA, 2008).

No critério de Mohr-Coulomb, a ruptura do produto é expressa pela relação entre tensão normal com tensão de cisalhamento. A expressão matemática que exprime a condição da ruptura é:

$$f(\sigma) = c + \sigma \tan(\phi_i) \quad (3)$$

Onde:

c : coesão

ϕ_i : ângulo de atrito interno

2.2.1.1.Fator fluxo (ff)

O fator fluxo é usado para indicar a fluabilidade do canal. Para os canais de fluxo de massa, o produto fluirá, se um arco não se desenvolver no canal de fluxo. Em canais de fluxo

de funil é importante garantir simultaneamente que o produto seja incapaz de sustentar um tubo vertical vazio de altura excessiva (formação do efeito tubo).

A função fluxo (FF) e o fator fluxo (ff) da tremonha são utilizados na determinação da dimensão da abertura de saída e da inclinação das paredes da tremonha, em função do tipo de fluxo desejado.

2.2.1.2. Densidade

A densidade do produto ρ pode ser entendida como a relação entre a massa e o volume do material. Três densidades diferentes são definidas, de acordo com Guerra (2006):

- Densidade solta ρ e aerada ρ_a : utiliza-se a massa do produto não compactado para sua determinação. Devem ser utilizadas na determinação da capacidade do silo e da tremonha;
- Densidade compacta ρ_u a massa de uma amostra compactada por vibração, por exemplo, é usada no cálculo;
- Densidade de trabalho ρ_w : empregada para determinar o grau de velocidade no carregamento ou descarregamento do silo. Pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\rho_w = \frac{(\rho_u - \rho_a)^2}{\rho_u} + \rho_a \quad (4)$$

Onde:

ρ_u : densidade compacta;

ρ_a : densidade aerada;

ρ_w : densidade de trabalho.

O peso específico do produto γ é obtido naturalmente a partir da densidade, sendo que o mesmo é definido pela relação entre o peso do material e o seu volume.

3. CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O estudo de caso adotado para este trabalho representa um silo cilíndrico formado de uma estrutura de concreto armado, localizado na cidade de Uberlândia, Minas Gerais. O silo possui as características geométricas conforme representada no ANEXO B, cujas medidas, segue resumidas a seguir:

- Capacidade de armazenamento de 7580m³.
- Altura útil do silo de armazenamento 37,70m.
- Silo elevado de 4,5m, com tremonha plana e rosca extratora.
- Diâmetro externo de 16,50m e parede de 0,25m.

Método construtivo utilizado será em formas deslizantes.

3.1.Pressões de projeto

Na determinação das ações ocasionadas pelos sólidos armazenados, segundo a EN1991-4/2006, algumas considerações devem ser levadas em conta (European Committee for Standardization, 2006, tradução KEHL, 2015):

- As pressões causadas pelos sólidos devem ser consideradas quando o silo está na condição cheia;
- As cargas relativas ao enchimento e ao esvaziamento devem considerar as principais combinações que levam a estrutura aos seguintes estados limites últimos:
 - Máxima pressão normal na parede vertical;
 - Máxima força de atrito vertical na parede vertical;
 - Máxima pressão vertical no fundo do silo; e
 - Máxima carga na tremonha.
- O peso específico (γ) dos sólidos deve ser usado em todos os carregamentos relevantes;
- A avaliação de cada carregamento deve ser feita com um único conjunto de valores para as propriedades coeficiente de atrito (μ), razão de pressão lateral (K) e ângulo de atrito interno (φ), de forma que cada estado limite corresponda a uma condição definida dos sólidos;
- O projeto deve considerar as consequências dos diferentes tipos de fluxo durante o esvaziamento.
 - Fluxo de massa;
 - Fluxo de funil;
 - Fluxo misto.
- Também devem ser considerados possíveis ocorrência de descarregamento descentralizados.

- Temperatura e umidade.
- Degradação das paredes dos silos com o tempo.

3.1.1. Propriedades do sólido armazenado

O produto armazenado no silo é o farelo de soja, cujas propriedades estão apresentadas na Tabela 7 e 8.

Tabela 7 – Granulometria do farelo da soja. Dados dos produtos da empresa do projeto de estudo.

| Malha (mm) | Farelo Soja (%) |
|------------|-----------------|
| 4,76 | - |
| 2,38 | - |
| 2,00 | 0,23 |
| 1,68 | 0,90 |
| 1,00 | 12,94 |
| 0,50 | 49,25 |
| 0,42 | 8,72 |
| 0,21 | 16,35 |
| 0,053 | 11,40 |

Fonte: Empresa de estudo (2021).

Tabela 8 – Propriedades físicas do farelo de soja. Dados dos produtos da empresa do projeto de estudo.

| Produtos | Peso Específico γ | Ângulo de atrito interno ϕ_i | Ângulo de repouso ϕ_r | Coefficiente de atrito da parede μ_h | Razão de pressão lateral K | Teor de umidade % (b.u.) |
|-------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|----------------------------|--------------------------|
| Farelo-soja | 6,5kN/m ³ | 25° 22°/29° | 29° | 0,38 0,33/0,44 | 0,63 0,57/0,70 | 13 |

Fonte: Empresa de estudo (2021).

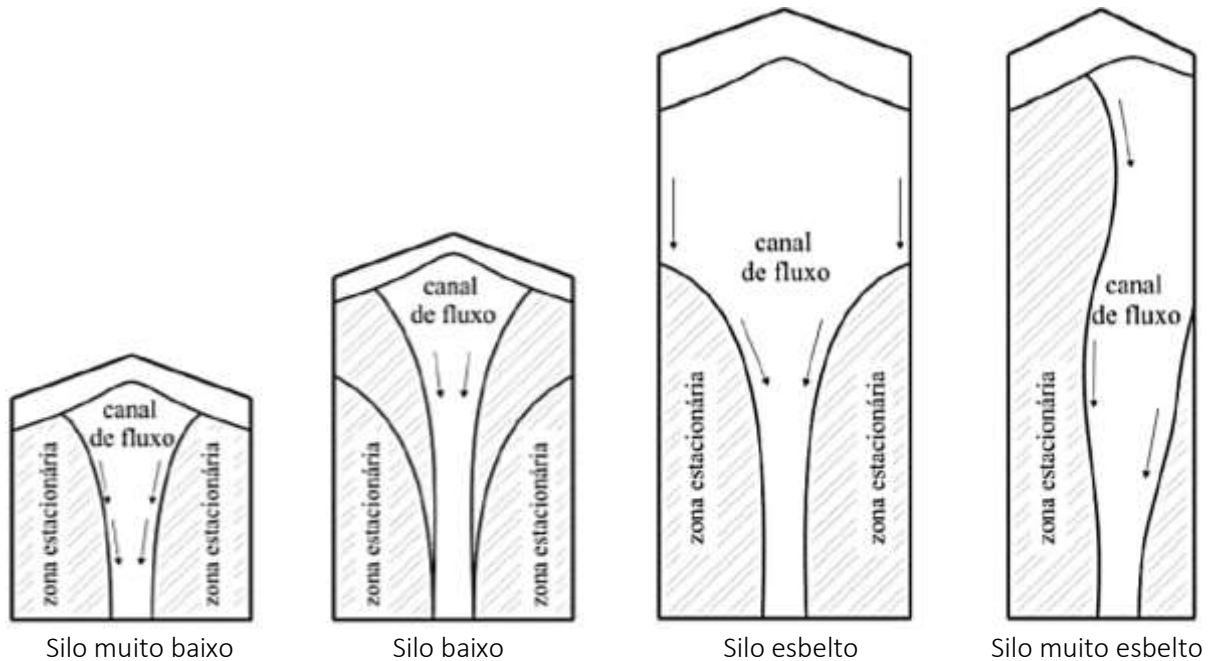
3.1.2. Cargas nas paredes verticais

Para o projeto e construção de silos é essencial o correto conhecimento das determinações das ações que atuam sobre as paredes e fundo do silo. Para projetar um silo com segurança, economia e eficiência, é necessário conhecer as máximas pressões possíveis sobre as paredes do silo durante sua vida operacional.

O silo em questão apresenta relação H/D superior a 2, portanto é classificado como silo esbelto conforme critério do Eurocode EN 1991-4. O fluxo em tremonha de fundo plano será em funil (fluxo-plug), contorno deste fluxo haverá zonas estacionárias onde o produto permanece após a descarga e posteriormente somente a rosca extratora é possível retirar o

armazenado. Neste fluxo de descarregamento, os grãos se movimentam em canal de fluxo e em parte da parede do silo se mantem estacionada (ver Figura 12).

Figura 12 – Efeitos da esbeltez do silo no fluxo.



Fonte: Adaptado de EN 1991.4.2006 (CALIL Jr.& CHEUNG, 2007)

3.1.2.1. Cargas de enchimento do silo

As pressões no corpo do silo dadas pelas cargas de enchimento do silo (pressões estáticas ou iniciais) serão analisadas pela formulação proposta por JANSSEN (1895) para o cálculo das pressões horizontais, pressões verticais e pressões de atrito na parede, variando apenas o valor do coeficiente de majoração utilizado para a obtenção da pressão vertical na base do silo com fundo plano.

Formulações de JANSSEN (1895):

$$p_h(z) = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{A}{U} \left(1 - e^{-z \cdot K \cdot \mu \frac{U}{A}} \right) \quad (5)$$

$$p_v(z) = \frac{p_h}{K} \quad (6)$$

$$p_w(z) = \mu \cdot p_h \quad (7)$$

Sendo:

p_h : pressão horizontal (normal) à parede do corpo do silo.

p_v : pressão vertical atuando sobre a seção transversal da massa;

p_w : pressão de atrito na parede;

A : área da sessão transversal;

K : razão entre as pressões horizontal e vertical;

U : perímetro da seção A;

μ : coeficiente de atrito do produto com a parede, determinados pela empresa de estudo.

Parâmetro constante obtida também pela formulação teórica de JANSSEN, $\mu = tg(\phi_w)$, sendo ϕ_w o ângulo de atrito do produto com a parede.

A pressão de atrito na parede p_w causa um esforço de compressão na parede e pode ser integrada verticalmente para o cálculo da força de compressão resultante sobre a parede $P_w(z)$ por unidade de perímetro de parede atuando na profundidade z , fornecida pela seguinte equação (PALMA, 2005):

$$P_w(z) = \mu \int p_h dz = \gamma \cdot \frac{A}{U} \left[z - \frac{A}{\mu \cdot K \cdot U} \left(1 - e^{-z \cdot K \cdot \mu \cdot \frac{U}{A}} \right) \right] = \frac{A}{U} (\gamma \cdot z - P_v) \quad (8)$$

Sendo:

P_v : resultante da pressão vertical;

z : profundidade medida do topo de armazenamento;

γ : peso específico do produto armazenado.

Os resumos das formulações e dos dados e parâmetros de entradas do projeto encontram-se nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Pressões e parâmetros K para silos com fundo plano.

| Norma | Pressões estáticas | | | Silos com fundo plano | P_w | K |
|----------------------------|--------------------|---------|---------|------------------------------|---------|---------|
| | p_h | p_v | p_w | Pressão vertical na base | | |
| EUROCODE EN 1991-4/2006 | Eq. (5) | Eq. (6) | Eq. (7) | Eq. (6) multiplicada por 1,2 | Eq. (8) | Eq. (1) |
| AS 3774/1996 | Eq. (5) | Eq. (6) | Eq. (7) | Eq. (9) e Eq. (10)* | Eq. (8) | * |

* A norma Australiana apresenta formulações diferentes para a pressão vertical na base de silos com fundo planos e para a determinação do parâmetro K, consultar norma para ver equação da determinação de K.

Fonte: Palma (2005)

Os resultados das pressões das paredes encontram-se na Tabela 11.

A norma Australiana AS 3774/1996 apresenta formulações diferentes para a pressão vertical na base do silo com fundo plano, de acordo com o tipo de seção transversal do silo (PALMA, 2005).

Tabela 10 – Dados e parâmetros de entrada do projeto.

| Geometria - Dados de entrada | | Parâmetros (paredes) - Dados de entrada | |
|---------------------------------|----------------------|---|------|
| Altura Z do topo com platibanda | 43,70m | C_h | 1,15 |
| Altura Z útil do silo | 4,50 a 42,2m | C_w | 1,10 |
| Altura útil da armazenagem | 37,7m | $\mu_{h, sup}$ | 0,44 |
| dc externo | 16,50m | $\mu_{h, inf}$ | 0,33 |
| dc médio | 16,25m | K, sup | 0,70 |
| Espessura parede | 0,25m | K, inf | 0,57 |
| Área (dc médio) | 207,39m ² | ϕ_i, inf | 29° |
| U | 51,05m | ϕ_i, sup | 22° |

Fonte: Autor (2021)

Para silo cilíndricos, a pressão vertical na base será determinada pela seguinte equação:

$$p_{veb}(r) = 1,25 \cdot p_v \left[1 - 1,6 \left(\frac{r}{d} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Sendo:

p_v : equação 6 aplicada na base do silo;

r : coordenada radial no silo circular;

d : diâmetro do silo.

A base de silos cilíndricos de fundo plano, também deverá ser projetada para resistir a trações devidas ao cisalhamento horizontal que atua no centro para as extremidades (Figura 13). Ainda conforme a norma AS 3774, estes esforços de cisalhamento (p_{wb}) ocorre devido ao atrito do produto armazenado com o material do fundo do silo, sendo dado pela seguinte equação:

$$p_{wb}(r) = 0,3 \cdot p_v \left[\left(\frac{2r}{d} \right) - \left(\frac{2r}{d} \right)^2 \right] \quad (10)$$

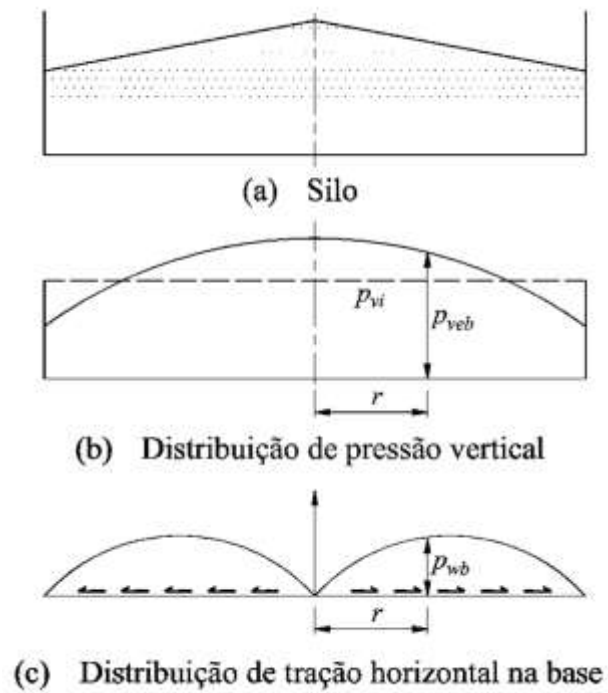
As cargas resistidas na base da tremonha pela norma europeia Eurocode EN 1991-4 são determinadas por meio do equilíbrio de força usando o p_v na transição multiplicada pelo fator empírico de 1,2. Ver na Tabela 9 a comparação das formulações entre as normas europeia e australiana.

Tabela 11 – Distribuição de pressões de carregamento nas paredes do silo.

| <i>Z(m)</i> | <i>h/H</i> | <i>p_h (kPa)</i> | <i>p_v (kPa)</i> | <i>p_w (kPa)</i> |
|-------------|------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 42,20 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 42,00 | 0,99 | 2,24 | 3,21 | 0,98 |
| 41,00 | 0,96 | 6,54 | 9,42 | 2,84 |
| 40,00 | 0,93 | 10,60 | 15,34 | 4,56 |
| 39,00 | 0,91 | 14,44 | 21,00 | 6,15 |
| 38,00 | 0,88 | 18,07 | 26,40 | 7,63 |
| 37,00 | 0,86 | 21,49 | 31,56 | 9,00 |
| 36,00 | 0,83 | 24,72 | 36,48 | 10,27 |
| 35,00 | 0,80 | 27,78 | 41,19 | 11,45 |
| 34,00 | 0,78 | 30,67 | 45,67 | 12,54 |
| 33,00 | 0,75 | 33,40 | 49,96 | 13,56 |
| 32,00 | 0,72 | 35,97 | 54,05 | 14,49 |
| 31,00 | 0,70 | 38,41 | 57,96 | 15,36 |
| 30,00 | 0,67 | 40,71 | 61,69 | 16,17 |
| 29,00 | 0,64 | 42,88 | 65,25 | 16,92 |
| 28,00 | 0,62 | 44,93 | 68,65 | 17,61 |
| 27,00 | 0,59 | 46,87 | 71,89 | 18,25 |
| 26,00 | 0,57 | 48,71 | 74,99 | 18,85 |
| 25,00 | 0,54 | 50,44 | 77,95 | 19,40 |
| 24,00 | 0,51 | 52,07 | 80,78 | 19,91 |
| 23,00 | 0,49 | 53,62 | 83,47 | 20,39 |
| 22,00 | 0,46 | 55,08 | 86,05 | 20,83 |
| 21,00 | 0,43 | 56,45 | 88,51 | 21,23 |
| 20,00 | 0,41 | 57,76 | 90,85 | 21,61 |
| 19,00 | 0,38 | 58,99 | 93,09 | 21,96 |
| 18,00 | 0,36 | 60,15 | 95,23 | 22,29 |
| 17,00 | 0,33 | 61,25 | 97,28 | 22,59 |
| 16,00 | 0,30 | 62,29 | 99,23 | 22,86 |
| 15,00 | 0,28 | 63,27 | 101,09 | 23,12 |
| 14,00 | 0,25 | 64,19 | 102,87 | 23,36 |
| 13,00 | 0,22 | 65,07 | 104,56 | 23,59 |
| 12,00 | 0,20 | 65,89 | 106,19 | 23,79 |
| 11,00 | 0,17 | 66,67 | 107,73 | 23,98 |
| 10,00 | 0,14 | 67,41 | 109,21 | 24,16 |
| 9,00 | 0,12 | 68,11 | 110,62 | 24,32 |
| 8,00 | 0,09 | 68,77 | 111,97 | 24,48 |
| 7,00 | 0,07 | 69,39 | 113,25 | 24,62 |
| 6,00 | 0,04 | 69,98 | 114,48 | 24,75 |
| 4,50 | 0,00 | 70,80 | 116,22 | 24,93 |
| 4,50 | | Tremonha | | |
| 0,00 | | | | |

Fonte: Autor (2021).

Figura 13 – Distribuição de pressões no silo com fundo plano conforme norma AS 3774



Fonte: Retirado de AS 3774 (1996)

As distribuições de pressões calculadas na base da tremonha pela norma encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12 – Distribuições de pressões na base da tremonha.

| $r(m)$ | $p_{vb} (kPa)$ | $r(m)$ | $p_{wb} (kPa)$ |
|--------|----------------|--------|----------------|
| 0,00 | 145,27 | 0,00 | 0,00 |
| 0,58 | 144,98 | 0,58 | 2,31 |
| 1,16 | 144,09 | 1,16 | 4,27 |
| 1,74 | 142,61 | 1,74 | 5,87 |
| 2,32 | 140,53 | 2,32 | 7,12 |
| 2,90 | 137,86 | 2,90 | 8,00 |
| 3,48 | 134,60 | 3,48 | 8,54 |
| 4,06 | 130,75 | 4,06 | 8,72 |
| 4,64 | 126,30 | 4,64 | 8,54 |
| 5,22 | 121,26 | 5,22 | 8,00 |
| 5,80 | 115,63 | 5,80 | 7,12 |
| 6,38 | 109,40 | 6,38 | 5,87 |
| 6,96 | 102,58 | 6,96 | 4,27 |
| 7,54 | 95,17 | 7,54 | 2,31 |
| 8,13 | 87,16 | 8,13 | 0,00 |

Fonte: Autor (2021)

3.1.2.2. Cargas de esvaziamento do silo

Para o cálculo das pressões de esvaziamento, as normas em geral utilizam o coeficiente de majoração, também chamados de coeficientes de sobrepressão. Estes são aplicados às pressões estáticas para determinação das pressões dinâmicas.

Utilizando-se da norma europeia EN 1991-4, as pressões de descarga serão obtidas multiplicando as pressões de carregamento (equações 5 e 8) pelos coeficientes de sobrepressão C_w e C_h .

$$p_{wd} = C_w \cdot P_{we} \quad (11)$$

$$p_{hd} = C_h \cdot p_h \quad (12)$$

Sendo:

p_{hd} : pressão horizontal de descarga

Onde também $C_w = 1,1$ e $C_h = C_0$. O C_0 utilizado será igual a 1,15 para silos Classes 2 ou 3, conforme critérios do Eurocode EN 1991-4. As pressões de descarregamentos calculadas estão representadas na Tabela 13.

3.1.2.1. Pressões adicionais

Considerando que o silo será em fundo plano e com fluxo de funil, é inevitável que pressões assimétricas ocorram no silo, devido as alterações ocasionadas pelas flutuações nas zonas de fluxo.

Por estas razões, os silos devem ser projetados para resistir às pressões assimétricas, tendo especial atenção aos momentos de flexão induzidos por estas pressões (Palma, 2005).

A pressão adicional será considerada atuando sobre qualquer parte do silo, no carregamento e na descarga, sendo determinada pelas seguintes equações:

$$p_{pf} = C_{pf} \cdot p_{he} \text{ (carregamento)} \quad (13)$$

$$p_{pe} = C_{pe} \cdot p_{hd} \text{ (descarga)} \quad (14)$$

Sendo $h_c/d_c > 1,2$; C_{pf} e C_{pe} serão determinados pelas seguintes equações:

$$C_{pf} = 0,21 C_{op} [1 + 2E^2] (1 - \exp \{-1,5[(h_c/d_c) - 1]\}) \quad (15)$$

$$C_{pe} = 0,42 C_{op} [1 + 2E^2] (1 - \exp \{-1,5[(h_c/d_c) - 1]\}) \quad (16)$$

Onde também:

$$E = 2 \cdot e / d_c \quad (17)$$

Tabela 13 – Distribuições de pressões de descarregamento nas paredes do silo.

| $Z(m)$ | h/H | p_{hd} (kPa) | p_{wd} (kPa) |
|--------|-------|----------------|----------------|
| 42,20 | 1,00 | 0,00 | 0,00 |
| 42,00 | 0,99 | 2,58 | 1,08 |
| 41,00 | 0,96 | 7,52 | 3,12 |
| 40,00 | 0,93 | 12,19 | 5,02 |
| 39,00 | 0,91 | 16,61 | 6,77 |
| 38,00 | 0,88 | 20,78 | 8,40 |
| 37,00 | 0,86 | 24,71 | 9,90 |
| 36,00 | 0,83 | 28,43 | 11,30 |
| 35,00 | 0,80 | 31,95 | 12,60 |
| 34,00 | 0,78 | 35,27 | 13,80 |
| 33,00 | 0,75 | 38,41 | 14,91 |
| 32,00 | 0,72 | 41,37 | 15,94 |
| 31,00 | 0,70 | 44,17 | 16,90 |
| 30,00 | 0,67 | 46,81 | 17,79 |
| 29,00 | 0,64 | 49,31 | 18,61 |
| 28,00 | 0,62 | 51,67 | 19,37 |
| 27,00 | 0,59 | 53,90 | 20,08 |
| 26,00 | 0,57 | 56,01 | 20,73 |
| 25,00 | 0,54 | 58,00 | 21,34 |
| 24,00 | 0,51 | 59,88 | 21,90 |
| 23,00 | 0,49 | 61,66 | 22,42 |
| 22,00 | 0,46 | 63,34 | 22,91 |
| 21,00 | 0,43 | 64,92 | 23,36 |
| 20,00 | 0,41 | 66,42 | 23,77 |
| 19,00 | 0,38 | 67,84 | 24,16 |
| 18,00 | 0,36 | 69,17 | 24,51 |
| 17,00 | 0,33 | 70,44 | 24,84 |
| 16,00 | 0,30 | 71,63 | 25,15 |
| 15,00 | 0,28 | 72,76 | 25,44 |
| 14,00 | 0,25 | 73,82 | 25,70 |
| 13,00 | 0,22 | 74,83 | 25,94 |
| 12,00 | 0,20 | 75,78 | 26,17 |
| 11,00 | 0,17 | 76,68 | 26,38 |
| 10,00 | 0,14 | 77,52 | 26,58 |
| 9,00 | 0,12 | 78,32 | 26,76 |
| 8,00 | 0,09 | 79,08 | 26,92 |
| 7,00 | 0,07 | 79,80 | 27,08 |
| 6,00 | 0,04 | 80,47 | 27,22 |
| 4,50 | 0,00 | 81,42 | 27,42 |
| 4,50 | | Tremonha | |
| 0,00 | | | |

Fonte: Autor (2021).

A equação é válida para descarga excêntrica menor que $0,25d$ para silos cilíndricos, sendo:

p_{pf} : carga adicional da excentricidade no carregamento;

p_{pe} : carga adicional de excentricidade no descarregamento;

e : excentricidade da boca de descarga ou saída;

d_c : diâmetro do silo;

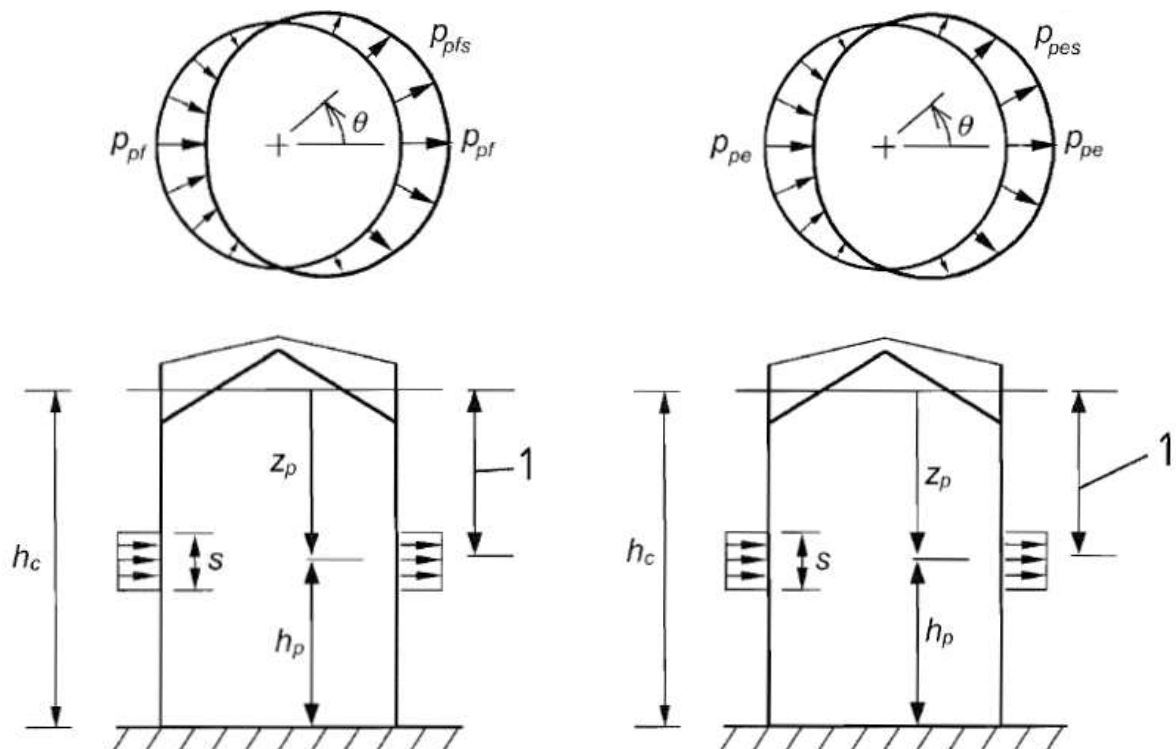
C_{op} : fator da carga do sólido.

Tabela 14 – Dados de entrada para as pressões adicionais de excentricidade de carregamento e descarregamento do silo.

| Pressões adicionais - Dados de entrada | |
|--|--|
| E | 0,5 |
| C_{op} | 1,00 (valor adotado como farelo de ração) |
| C_{pf} | 0,20 |
| C_{pe} | 0,41 |
| s | 3,19m (eq. 17) |
| e | Até $0,25R = 2,03m$ |

Fonte: Autor (2021)

Figura 14 – Pressões adicionais de carregamento e de descarregamento devido excentricidade em silo circulares de parede fina.



Fonte: Retirado da norma EN 1991.4.2006, p. 42; 48.

Tabela 15 – Distribuição das pressões adicionais de excentricidade aplicada na faixa s da parede do silo.

| <i>Z(m)</i> | <i>h/H</i> | <i>p_{pf} (kPa)</i> | <i>p_{pe} (kPa)</i> |
|-------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 42,20 | 1,00 | 0,00 | 0,00 |
| 42,00 | 0,99 | 0,53 | 1,06 |
| 41,00 | 0,96 | 1,54 | 3,08 |
| 40,00 | 0,93 | 2,49 | 4,99 |
| 39,00 | 0,91 | 3,40 | 6,79 |
| 38,00 | 0,88 | 4,25 | 8,50 |
| 37,00 | 0,86 | 5,05 | 10,11 |
| 36,00 | 0,83 | 5,82 | 11,63 |
| 35,00 | 0,80 | 6,53 | 13,07 |
| 34,00 | 0,78 | 7,21 | 14,43 |
| 33,00 | 0,75 | 7,85 | 15,71 |
| 32,00 | 0,72 | 8,46 | 16,92 |
| 31,00 | 0,70 | 9,03 | 18,07 |
| 30,00 | 0,67 | 9,57 | 19,15 |
| 29,00 | 0,64 | 10,09 | 20,17 |
| 28,00 | 0,62 | 10,57 | 21,14 |
| 27,00 | 0,59 | 11,02 | 22,05 |
| 26,00 | 0,57 | 11,46 | 22,91 |
| 25,00 | 0,54 | 11,86 | 23,73 |
| 24,00 | 0,51 | 12,25 | 24,49 |
| 23,00 | 0,49 | 12,61 | 25,22 |
| 22,00 | 0,46 | 12,95 | 25,91 |
| 21,00 | 0,43 | 13,28 | 26,56 |
| 20,00 | 0,41 | 13,58 | 27,17 |
| 19,00 | 0,38 | 13,87 | 27,75 |
| 18,00 | 0,36 | 14,15 | 28,29 |
| 17,00 | 0,33 | 14,41 | 28,81 |
| 16,00 | 0,30 | 14,65 | 29,30 |
| 15,00 | 0,28 | 14,88 | 29,76 |
| 14,00 | 0,25 | 15,10 | 30,20 |
| 13,00 | 0,22 | 15,30 | 30,61 |
| 12,00 | 0,20 | 15,50 | 31,00 |
| 11,00 | 0,17 | 15,68 | 31,36 |
| 10,00 | 0,14 | 15,86 | 31,71 |
| 9,00 | 0,12 | 16,02 | 32,04 |
| 8,00 | 0,09 | 16,17 | 32,35 |
| 7,00 | 0,07 | 16,32 | 32,64 |
| 6,00 | 0,04 | 16,46 | 32,92 |
| 4,50 | 0,00 | 16,65 | 33,30 |
| 4,50 | | Tremonha | |
| 0,00 | | | |

Fonte: Autor (2021).

A altura da zona em que a carga adicional de excentricidade é aplicada (ver Figura 14) deve ser considerada como:

$$s = \pi d_c / 16 \quad (18)$$

Resultados negativos da expressão de p_{pf} , C_{pf} será adotado como $C_{pf} = 0$:

Os dados de entrada para o cálculo de pressões adicionais encontram-se na Tabela 14 e as distribuições de pressões na faixa s estão apresentados na Tabela 15.

3.1.2.2. Pressões devido ao vento

As cargas de ventos são levantadas para resistir ao tombamento causado por ventos, principalmente quando estão vazios. A estabilidade é maior quando os silos estão cheios.

Os efeitos de vizinhança podem ser muito importantes para o projeto de silos, principalmente quando este envolve grupos ou baterias de silos (SAFARIAN; HARRIS, 1985, p. 66-67, tradução nossa). Neste estudo será adotado a ausência de outro silo próximo.

A norma usada como referência para se estimar as cargas de vento no Brasil é a NBR 6123/1988 - forças devidas ao vento em edificações.

- Determinação da velocidade básica do vento V_0 ; através de mapas de isoplelas fornecida na norma:

$$V_0 = 35m/s \text{ (Uberlândia-MG)}$$

- Determinação do fator topográfico S_1 :

$$S_1 = 1,0 \text{ (terreno plano ou fracamente acidentado)}$$

- Determinação do fator topográfico S_2 :

$$S_2 = b F_r \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (19)$$

Sendo:

z : Cota acima do terreno (m);

b : Parâmetro meteorológico usado na determinação de S_2 ;

p : Expoente da lei potencial de variação de S_2 ; e

F_r : fator de rajada.

Portanto:

$$S_2 = b F_r \left(\frac{z}{10}\right)^p = 0,94 \cdot 0,98 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,105} \geq 0,86 \text{ (classe B e categoria 3)}$$

O fator S_2 encontra-se calculado na Tabela 16.

Tabela 16 – Resumo do fator S_2 para classe B e categoria 3.

| z (m) | Categoria III |
|-------|---------------|
| | Classe B |
| ≤ 5 | 0,86 |
| 10 | 0,92 |
| 15 | 0,96 |
| 20 | 0,99 |
| 25 | 1,01 |
| 30 | 1,03 |
| 35 | 1,05 |
| 40 | 1,07 |
| 45 | 1,08 |

Fonte: Autor (2021)

- Determinação do fator estatístico S_3 :

$$S_3 = 0,95 \text{ (construção com baixo fator de ocupação)}$$

- Cálculo da velocidade característica V_k e pressão dinâmica q :

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \tag{20}$$

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \tag{21}$$

Portanto:

$$V_k = 35 \cdot 1,00 \cdot 0,94 \cdot 0,98 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,105} \cdot 0,95 = 30,6299 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,105} \text{ m/s}$$

$$\therefore q(z) = 0,613 \cdot V_k^2 = 575,1109 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,210} \text{ N/m}^2$$

- Coeficientes de pressão externa C_{pe} : definida conforme Tabela 17.

Tabela 17 – Coeficientes de pressão externa C_{pe}

| β | Coeficientes de pressão externa C_{pe} | | | |
|---------|--|--------------------|-------------------|--------------------|
| | Superfícies rugosas ou com saliências | | Superfícies lisas | |
| | $h_c/d_c = 10$ | $h_c/d_c \leq 2,5$ | $h_c/d_c = 10$ | $h_c/d_c \leq 2,5$ |
| 0° | +1,00 | +1,00 | 1,00 | +1,00 |
| 10° | +0,90 | +0,90 | 0,90 | +0,90 |
| 20° | +0,70 | +0,70 | 0,70 | +0,70 |
| 30° | +0,40 | +0,40 | 0,35 | +0,35 |
| 40° | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50° | -0,50 | 0,40 | 0,70 | -0,50 |
| 60° | -0,95 | 0,80 | 1,20 | -1,05 |
| 70° | -1,25 | 1,10 | 1,40 | -1,25 |
| 80° | -1,20 | 1,05 | 1,45 | -1,30 |
| 90° | -1,00 | 0,85 | 1,40 | -1,20 |
| 100° | -0,80 | 0,65 | 1,10 | -0,85 |
| 120° | -0,50 | 0,35 | 0,60 | -0,40 |
| 140° | -0,40 | 0,30 | 0,35 | -0,25 |
| 160° | -0,40 | 0,30 | 0,35 | -0,25 |
| 180° | -0,40 | 0,30 | 0,35 | -0,25 |

Fonte: Adaptada da Norma (NBR6123, 1988, p. 19).

- Coeficientes de pressão interna C_{pi} :

Para definição do coeficiente de pressão interna foi considerado a hipótese de edificações efetivamente estanques e com janelas/aberturas fixas que tenham uma probabilidade desprezível de serem rompidas por acidentes.

A norma Eurocode EN 1991-4, na qual está definido que para tanques com pequenas aberturas recomenda-se $C_{pi} = -0,4$. Assim será usado $C_{pi} = -0,4$ ou 0, o que for mais nocivo.

- Pressão efetiva Δ_p à edificação:

$$\Delta_p = \Delta C \cdot q \quad (21)$$

Sendo:

ΔC : coeficiente de pressão

q : pressão dinâmica atuante na estrutura (kN/m²);

Tabela 18 – Pressões efetiva sobre as paredes do silo. $C_{pi} = 0,00$.

| | | $C_{pi} = 0,00$ | | | | | | | | |
|---------------|-------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Z(m) | | 5,00 | 10,00 | 15,00 | 20,00 | 25,00 | 30,00 | 35,00 | 40,00 | 43,70 |
| Re (10^4) | | 3289 | 3538 | 3692 | 3805 | 3895 | 3970 | 4035 | 4092 | 4130 |
| β | Cpe | Δ_p (kN/m ²) | | | | | | | | |
| 0° | 1 | 0,50 | 0,58 | 0,63 | 0,67 | 0,70 | 0,72 | 0,75 | 0,77 | 0,78 |
| 10° | 0,9 | 0,45 | 0,52 | 0,56 | 0,60 | 0,63 | 0,65 | 0,67 | 0,69 | 0,71 |
| 20° | 0,7 | 0,35 | 0,40 | 0,44 | 0,47 | 0,49 | 0,51 | 0,52 | 0,54 | 0,55 |
| 30° | 0,4 | 0,20 | 0,23 | 0,25 | 0,27 | 0,28 | 0,29 | 0,30 | 0,31 | 0,31 |
| 40° | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 50° | -0,5 | -0,25 | -0,29 | -0,31 | -0,33 | -0,35 | -0,36 | -0,37 | -0,38 | -0,39 |
| 60° | -0,95 | -0,47 | -0,55 | -0,59 | -0,63 | -0,66 | -0,69 | -0,71 | -0,73 | -0,74 |
| 70° | -1,25 | -0,62 | -0,72 | -0,78 | -0,83 | -0,87 | -0,91 | -0,94 | -0,96 | -0,98 |
| 80° | -1,2 | -0,60 | -0,69 | -0,75 | -0,80 | -0,84 | -0,87 | -0,90 | -0,92 | -0,94 |
| 90° | -1 | -0,50 | -0,58 | -0,63 | -0,67 | -0,70 | -0,72 | -0,75 | -0,77 | -0,78 |
| 100° | -0,8 | -0,40 | -0,46 | -0,50 | -0,53 | -0,56 | -0,58 | -0,60 | -0,62 | -0,63 |
| 120° | -0,5 | -0,25 | -0,29 | -0,31 | -0,33 | -0,35 | -0,36 | -0,37 | -0,38 | -0,39 |
| 140° | -0,4 | -0,20 | -0,23 | -0,25 | -0,27 | -0,28 | -0,29 | -0,30 | -0,31 | -0,31 |
| 160° | -0,4 | -0,20 | -0,23 | -0,25 | -0,27 | -0,28 | -0,29 | -0,30 | -0,31 | -0,31 |
| 180° | -0,4 | -0,20 | -0,23 | -0,25 | -0,27 | -0,28 | -0,29 | -0,30 | -0,31 | -0,31 |

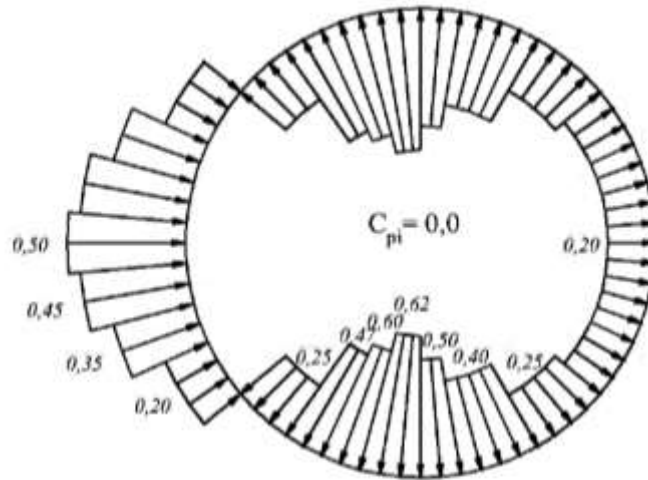
Fonte: Autor (2021)

Tabela 19 – Pressões efetiva sobre as paredes do silo. $C_{pi} = -0,40$.

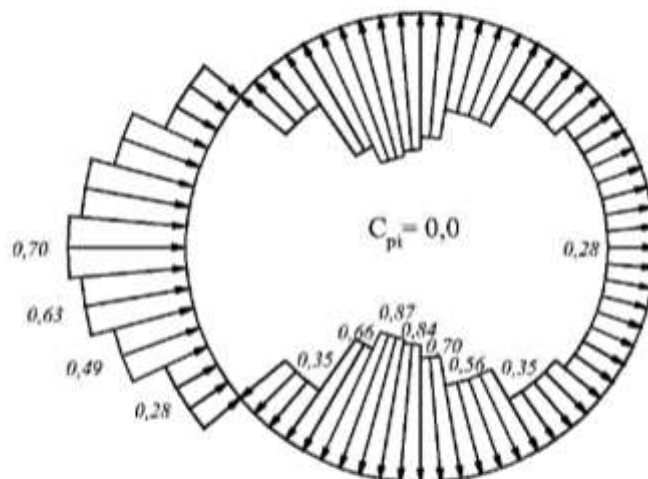
| | | $C_{pi} = -0,40$ | | | | | | | | |
|---------------|-------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Z(m) | | 5,00 | 10,00 | 15,00 | 20,00 | 25,00 | 30,00 | 35,00 | 40,00 | 43,70 |
| Re (10^4) | | 3289 | 3538 | 3692 | 3805 | 3895 | 3970 | 4035 | 4092 | 4130 |
| β | Cpe | Δ_p (kN/m ²) | | | | | | | | |
| 0° | 1 | 0,70 | 0,81 | 0,88 | 0,93 | 0,98 | 1,01 | 1,05 | 1,08 | 1,10 |
| 10° | 0,9 | 0,65 | 0,75 | 0,81 | 0,86 | 0,91 | 0,94 | 0,97 | 1,00 | 1,02 |
| 20° | 0,7 | 0,55 | 0,63 | 0,69 | 0,73 | 0,77 | 0,80 | 0,82 | 0,85 | 0,86 |
| 30° | 0,4 | 0,40 | 0,46 | 0,50 | 0,53 | 0,56 | 0,58 | 0,60 | 0,62 | 0,63 |
| 40° | 0 | 0,20 | 0,23 | 0,25 | 0,27 | 0,28 | 0,29 | 0,30 | 0,31 | 0,31 |
| 50° | -0,5 | -0,05 | -0,06 | -0,06 | -0,07 | -0,07 | -0,07 | -0,07 | -0,08 | -0,08 |
| 60° | -0,95 | -0,27 | -0,32 | -0,34 | -0,37 | -0,38 | -0,40 | -0,41 | -0,42 | -0,43 |
| 70° | -1,25 | -0,42 | -0,49 | -0,53 | -0,57 | -0,59 | -0,62 | -0,64 | -0,65 | -0,67 |
| 80° | -1,2 | -0,40 | -0,46 | -0,50 | -0,53 | -0,56 | -0,58 | -0,60 | -0,62 | -0,63 |
| 90° | -1 | -0,30 | -0,35 | -0,38 | -0,40 | -0,42 | -0,43 | -0,45 | -0,46 | -0,47 |
| 100° | -0,8 | -0,20 | -0,23 | -0,25 | -0,27 | -0,28 | -0,29 | -0,30 | -0,31 | -0,31 |
| 120° | -0,5 | -0,05 | -0,06 | -0,06 | -0,07 | -0,07 | -0,07 | -0,07 | -0,08 | -0,08 |
| 140° | -0,4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 160° | -0,4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 180° | -0,4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Fonte: Autor (2021)

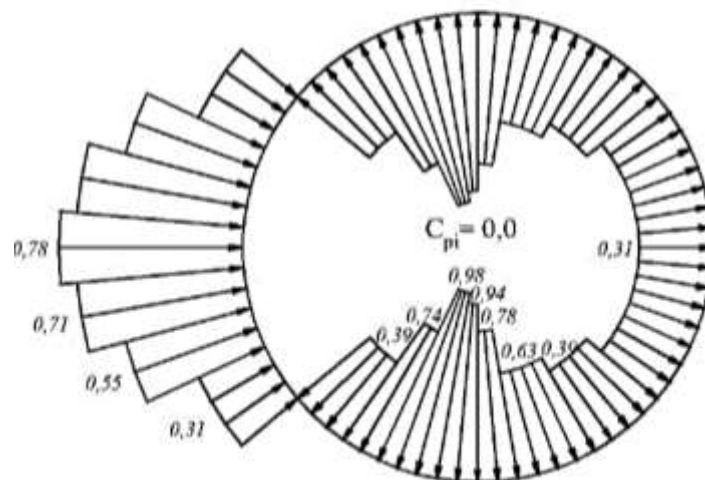
Figura 15 – Distribuição de pressões de vento nas paredes do silo com $C_{pi} = 0,00$ e $C_{pe} = -0,40$.
Unidades em kN/m^2



(a) Vento $Z = 5\text{m}$

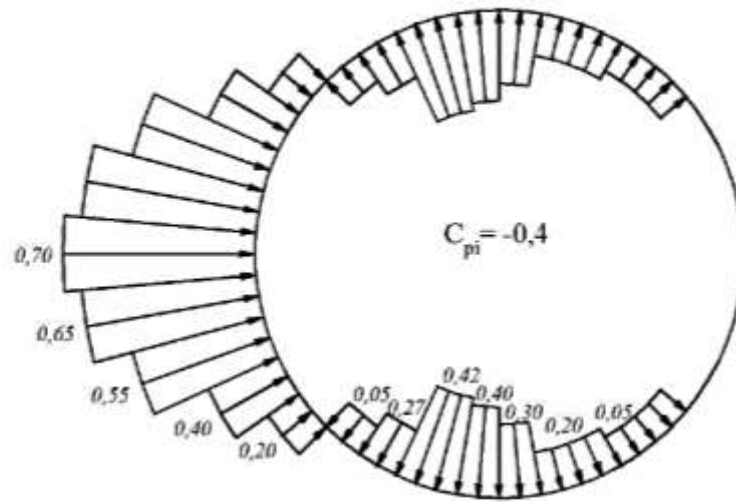
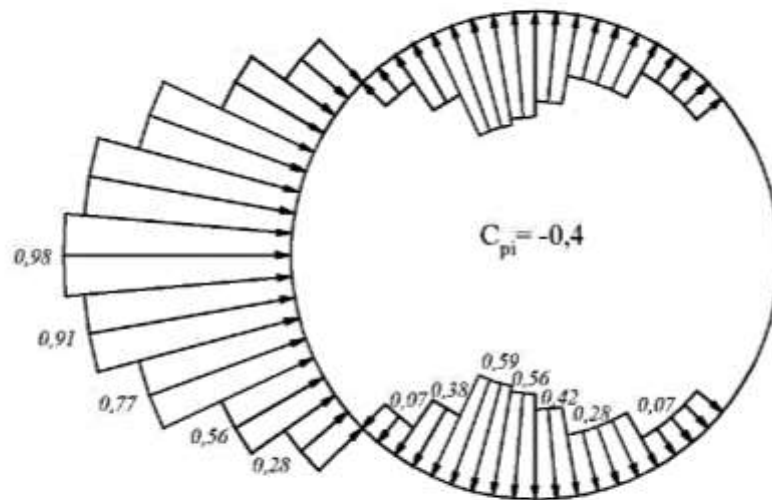
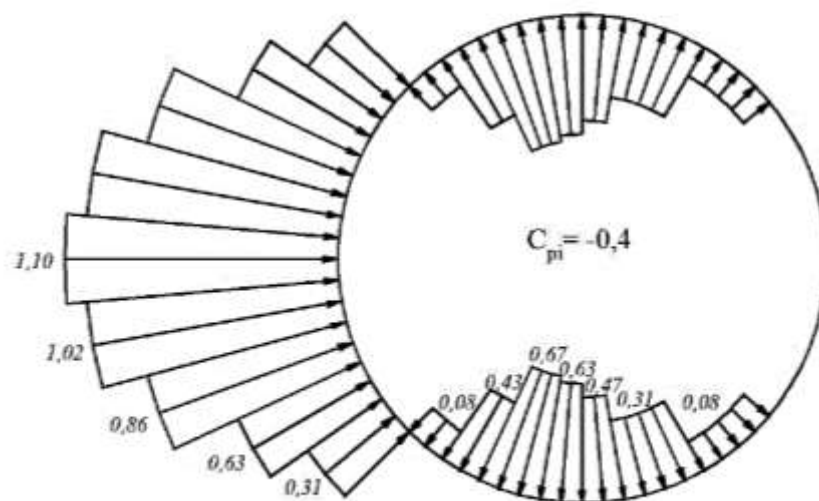


(b) Vento $Z = 25\text{m}$



(c) Vento $Z = 43,7\text{m}$

Continua

(d) Vento $Z = 5\text{m}$ (e) Vento $Z = 25\text{m}$ (f) Vento $Z = 43,7\text{m}$

Fonte: Autor (2021)

As distribuições de pressões de vento estão representadas nas Tabelas 18 e 19 e ilustradas na Figura 15.

3.1.3. Cargas permanentes e laje superior da cobertura

O peso próprio da laje de cobertura será em estrutura mista. As cargas consideradas estão descritas na Tabela 20.

Tabela 20 – Cargas consideradas da laje de cobertura.

| Laje de Cobertura | | |
|--|---|----------------------------|
| Tipo de carga | Descrição | |
| Peso próprio (PP) | Impermeabilização com proteção mecânica | 1,80 kN/m ² |
| Peso próprio (PP) | Concreto armado | 4,38 kN/m ² |
| Peso próprio (PP) | Estrutura metálica | 0,46 kN/m ² |
| Peso equipamentos (PP _{eq}) | Transportador descarregador | 0,63 kN/m ² |
| Carga adicional (CA) | Acesso cobertura acesso apenas manutenção | 3,00 kN/m ² |
| Área (D = 16,5m) | | 213,82m² |
| Perímetro U da parede do silo (D_{médio} = 16,375m) | | 51,44m |
| Tipo de carga | Descrição | |
| PP + PP _{eq} | Carga linear na parede do silo (laje) | 30,22 kN/m |
| CA | Carga linear na parede silo (laje) | 12,47 kN/m |

Fonte: Autor (2021).

3.1.4. Cargas térmicas

Há dois tipos de efeitos térmicos de grande importância para a estrutura de um silo (SAFARIAN; HARRIS, 1985, p. 67, tradução nossa). O primeiro é o gradiente de temperatura que atravessa a parede, causado pelo armazenamento de materiais mais quentes que a temperatura ambiente. O segundo é a variação de temperatura diária devido a radiação solar, que pode causar contrações e expansões problemáticas em grupos de silos.

Para as estruturas de concreto armado, a variação de temperatura pode provocar fissurações, permitindo entradas de umidades e redução do tempo de armazenamentos do material. O efeito da variação térmica diária é mais preocupante em silos metálicos, que podem chegar a compactar o material armazenado a cada iteração, formando abóbodas.

3.2. Combinações de ações

Cada elemento da estrutura deve ser calculado para carga e combinação de cargas apropriadas. Devem ser aplicados a cada elemento estrutural os valores característicos superior e inferior das cargas considerando o estado limite último e o estado limite de utilização.

As ações foram combinadas de acordo com as recomendações da ABNT NBR 8681:2004, de forma a determinar o efeito mais desfavorável para a estrutura. As ações permanentes ($F_{g,k}$) e variável principal ($F_{q,k}$), são ponderadas segundo os coeficientes abaixo:

- $\gamma_g=1,4$ (Peso próprio de estruturas de concreto)
- $\gamma_q=1,4$ (Coeficiente de majoração para pressões do produto)
- $\gamma_q=1,5$ (Coeficiente de majoração para sobrecargas de utilização/transportador)

- $\psi_0=0,7$ (Coeficiente de redução para pressões de produto e sobrecarga)
- $\psi_0=0,6$ (Coeficiente de redução para ações de vento)

- $\psi_1=0,6$ (Coeficiente de redução para pressões de produto e sobrecarga)
- $\psi_1=0,3$ (Coeficiente de redução para ações de vento)

- $\psi_2=0,4$ (Coeficiente de redução para pressões de produto e sobrecarga)
- $\psi_2=0$ (Coeficiente de redução para ações de vento)

As ações foram combinadas para o Estado Limite último (ELU), segundo as combinações normais dadas pela equação abaixo:

$$F_d = \gamma_g \Sigma F_{gi,k} + \gamma_q (F_{q1,k} + \Sigma \psi_{0j} F_{qj,k}) \quad (22)$$

Para o Estado Limite de Serviço foram verificados os deslocamentos segundo as combinações frequentes de serviço, dadas pela equação abaixo:

$$F_d = \Sigma F_{gi,k} + \psi_{1j} F_{q1,k} + \Sigma \psi_{2j} F_{qj,k} \quad (23)$$

Neste trabalho foi apresentado as combinações mais relevantes para o dimensionamento das paredes do silo, representadas na Tabela 21, do total de 37 combinações de ações distintas possíveis.

Tabela 21 – Combinações de Estado Limite Último e de Serviços aplicados no projeto para dimensionamento das paredes do silo.

| Combinação | | Cargas | | | | V1 | V2 |
|------------|-----|--------|------|--------------------------|-----------------------------|-----|-----|
| | | PP | CA | Pressões de carregamento | Pressões de descarregamento | | |
| 1 | ELU | 1,40 | 1,05 | | | 1,5 | |
| 2 | ELU | 1,40 | 1,05 | | | | 1,5 |
| 3 | ELU | 1,40 | 1,05 | 1,40 | | 1,5 | |
| 4 | ELU | 1,40 | 1,05 | 1,40 | | | 1,5 |
| 5 | ELU | 1,40 | 1,05 | | 1,40 | 1,5 | |
| 6 | ELU | 1,40 | 1,05 | | 1,40 | | 1,5 |
| 7 | ELS | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,3 | |
| 8 | ELS | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,3 | |
| 9 | ELS | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | | 0,3 |
| 10 | ELS | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | | 0,3 |

Fonte: Autor (2021).

3.3. Modelagem numérica

Com base nos valores de pressões obtidas pelas normas estrangeiras e brasileira, foi realizado a modelagem do silo no programa STRAP© (licença trial para uso acadêmico), que tem como base o método dos elementos finitos. A malha gerada manualmente para o cálculo no programa foi conforme representada na Tabela 22.

Para as condições de contorno para o cálculo, o silo foi considerado aberto no topo, sem a contribuição da laje de cobertura tanto no Estado Limite Último (ELU) como no Estado Limite de Serviços (ELS), e as bases do silo foram engastadas em todas as bordas da base, embora a fundação do silo seja composta por 45 pontos fixos (estacas da fundação) ao longo da circunferência da parede do silo. Além disso, há quatro pilares de sustentação da tremonha. Os detalhes do projeto do silo encontram-se no ANEXO B deste trabalho.

Tabela 22 – Malhas da modelagem do silo no software STRAP2021©.

| Descrição | Malha | | |
|--|---------------|----------|------------------------|
| | Dimensões | Divisões | Comprimento da divisão |
| <i>Altura do topo do silo sem platibanda</i> | <i>42,50m</i> | 170 | 0.250m |
| <i>Circunferência média da casca do silo</i> | <i>16,25m</i> | 13 | 0.627m |
| <i>Circunferência do cilindro</i> | <i>51,05m</i> | 204 | 0.250m |
| <i>Nós</i> | | 37084un | |
| <i>Elementos</i> | | 36981un | |

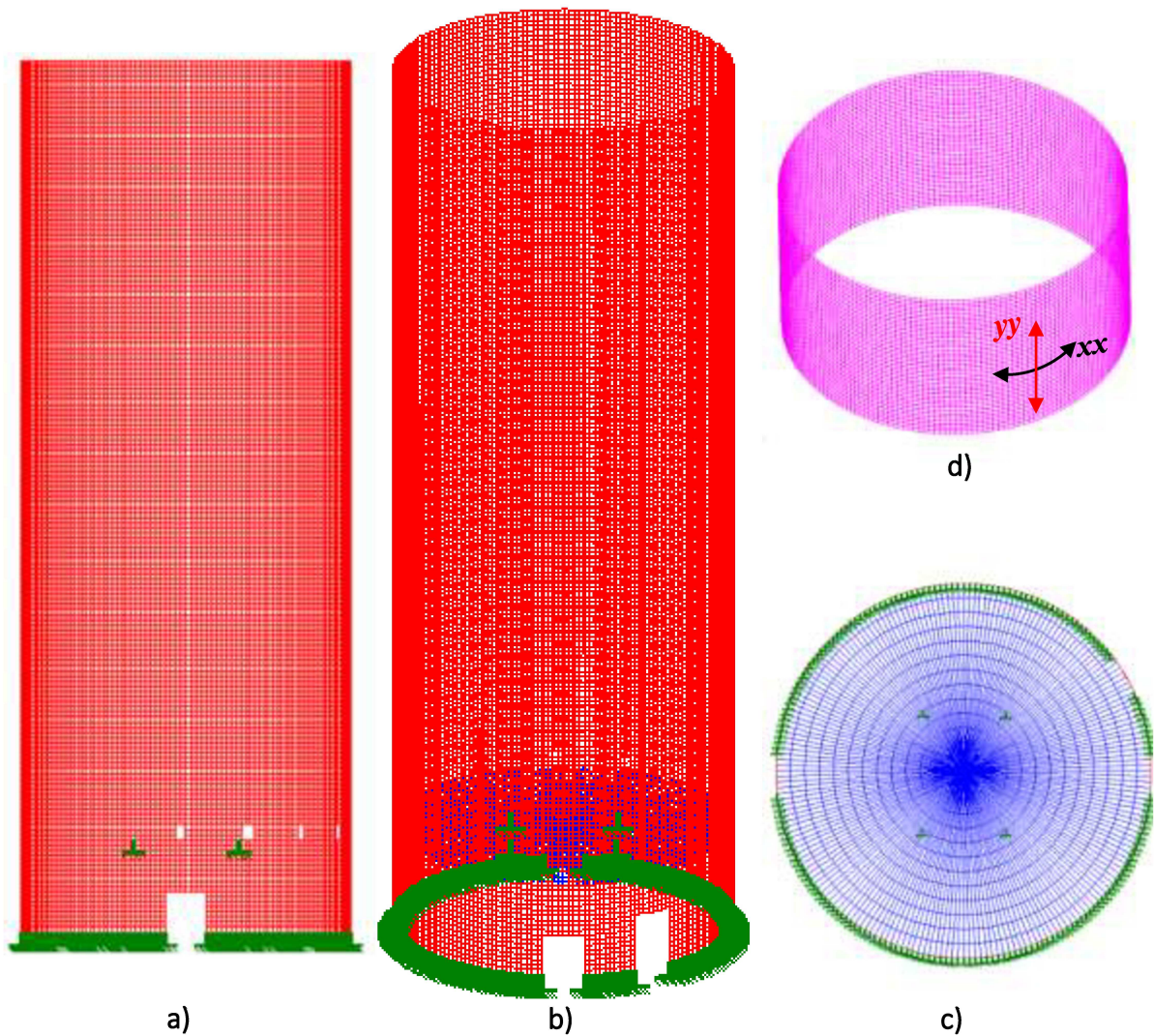
Fonte: Autor (2021).

Os dados da propriedade dos materiais utilizados na modelagem no software foram lançados com resistência do concreto F_{ck} utilizado de $40MPa$ e coeficiente de Poisson ν de 0,20. O Módulo de elasticidade inicial será de:

$$E_{ci} = \alpha_e \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} = 1,0 \cdot 5600 \cdot \sqrt{40} = 3,5417 \cdot 10^4 MPa \quad (24)$$

A malha do silo lançada no programa está ilustrada na Figura 16. Os resultados dos esforços mais relevantes das 10 combinações estão representados nas figuras do ANEXO A deste trabalho.

Figura 16 – Malha do silo do MEF no programa STRAP© e as referências de eixos dos esforços. a) Vista frontal. b) Vista 3D. c) Vista superior e da tremonha com 4 pilares. d) Eixos de referências do silo.



Fonte: Autor (2021)

3.4. Dimensionamento da estrutura

Neste subcapítulo serão apresentadas as solicitações de cálculo e o dimensionamento de armaduras em uma seção intermediária da parede do silo cilíndrico, correspondente entre os níveis +20,0m ao +30,0m do silo.

A cobertura (estrutura mista) e a tremonha (vigas, lajes e pilares) não serão estudadas neste presente trabalho.

3.4.1. Paredes verticais

Para o processo de dimensionamento, é importante a apresentação dos parâmetros e características do concreto e do aço que foram definidos neste estudo de caso, segundo a ABNT – NBR 6118/2014, bem como outras considerações a respeito da estrutura em estudo, os dados e alguns critérios calculados estão apresentados na Tabela 23.

As paredes verticais são dimensionadas de forma mais simplificadas, uma vez que os esforços mais significativos são os de tração e de compressão.

Neste trabalho, para a verificação do dimensionamento, as paredes do silo foram divididas em 7 seções na sua altura, conforme projeto no ANEXO B.

3.4.1.1. Armadura vertical

Para determinação da armadura vertical, pode-se utilizar os ábacos proposto por VENTURINI (1987) para dimensionar à flexão composta normal, utilizando parâmetros ν e μ .

Será apresentado o dimensionamento da seção 5. Os resultados da análise estrutural foram as seguintes, conforme esforços representados nas Figuras A-5 e A-6 do ANEXO A:

- Seção 5: Nível +20,0m ao +30,0m:

$$N_{d,yy,+20,0} = -780kN/m \text{ (compressão)}$$

$$M_{d,xx,+20,0,mín} = -11,5kNm/m$$

$$M_{d,xx,+20,0,máx} = 9,5kNm/m$$

As referências dos eixos dos esforços estão representadas na Figura 16, sendo os valores “xx” na direção circunferencial e “yy” na direção vertical da parede. Os valores negativos indicam compressão enquanto os positivos indicam tração. Para os dados de entrada, foram usados os parâmetros da Tabela 23.

Tabela 23 – Critérios e formulações utilizados para cálculo de armadura da parede do silo.

| Critérios do cálculo | Descrição |
|---|---|
| Tipo de estrutura | Parede cilíndrica em Concreto Armado |
| Classe de agressividade Ambiental | CA III $\rightarrow W_k \leq 0,3mm$ |
| Seção do concreto | Parede seccionada em seções conforme projeto em ANEXO B. Análise em dimensional em retangulares esp.=25cm e bw = 100cm |
| Seção da armadura (cm ²) | $(A_s + A'_s) = \gamma_c \cdot \frac{N_d}{\sigma_s}$ (25) |
| Perímetro U | 51,44m |
| Resistencia característica do concreto | $f_{ck} = 40MPa$ |
| Tipo de aço utilizado | CA-50 $\rightarrow f_{yk} = 50kN/cm^2$ |
| Tensão do aço | $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15} = 43,478kN/cm^2$ (26) |
| Resistência a tração média do concreto | $f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 3,5088MPa$ (27) |
| Resistência a tração inferior do concreto | $f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ct,m} = 2,4562MPa$ (28) |
| Valor de cálculo da resistência a tração do concreto | $f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} = 1,7544MPa$ (29) |
| Tamanhos da abertura de fissuras (mm) (NBR6118:2014 item 17.3.3) | $\begin{cases} W_k = \left(\frac{\phi_i \cdot \sigma_{si} \cdot 3 \cdot \sigma_{si}}{12,5 \cdot \eta_1 \cdot E_{si} \cdot f_{ct,m}} \right) \\ W_k = \frac{\phi_i \cdot \sigma_{si}}{12,5 \cdot \eta_1 \cdot E_{si}} \cdot \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) \end{cases} (30)$ |
| Módulo de elasticidade do aço | $E_s = 210000MPa$ |
| Parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade | $\alpha_E = 1$ (granito e gnaisse) |
| Módulo de deformação tangencial do concreto | $E_{ci} = 3,5417 \cdot 10^4 MPa$ |
| Módulo de deformação secante do concreto | $E_{cs} = E_{ci} \cdot \alpha_i = \left(0,80 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \right) E_{ci}$ $= 3,3809 \cdot 10^4 MPa$ (31) |
| Cobrimento das armaduras | CA III $\rightarrow c_{nom} = 40mm$ ($\Delta_c = 10mm$) |
| Estribos poligonais | $\emptyset_{est.} = 6,3mm$ |

Fonte: Autor (2021)

- Altura útil:

$$d' = c + \varphi t + \frac{\varphi l}{2} \rightarrow \quad (32)$$

$$d' = 4,0 + 1,0 + \frac{0,8}{2} \cong 5,4 \text{ cm} \therefore$$

$$d = h - d' = 25 - 5,4 \text{ cm} = 19,6 \text{ cm}$$

- Relação d'/h :

$$\frac{d'}{h} = \frac{5,4}{25} = 0,216 \quad (33)$$

Para verificar a taxa de armadura no ábaco de VENTURI (1987), é necessário o cálculo dos parâmetros ν e μ :

- Parâmetro ν (força normal adimensional):

$$\nu = \frac{N_{d,y}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{780 \text{ kN/m}}{25 \text{ cm} \cdot 100 \text{ cm} \cdot \frac{4}{1,4} \text{ kN/cm}^2} = 0,1092 \quad (34)$$

- Parâmetro μ (momento adimensional):

$$\mu = \frac{M_{d,y}}{A_c \cdot f_{cd} \cdot h} = \frac{1150 \text{ kNcm/m}}{25 \text{ cm} \cdot 100 \text{ cm} \cdot \frac{4}{1,4} \text{ kN/cm}^2 \cdot 25 \text{ cm}} = 0,00644 \quad (35)$$

Ao lançar os parâmetros nos ábacos de VENTURINI (1987), a taxa de armadura é nula (ver ábaco na Figura 18). Logo, é adotado a taxa mínima para a armadura vertical.

A norma americana ACI 313 (2016) estabelece uma taxa mínima da armadura vertical, a qual não deve ser menor que a armadura vertical mínima por unidade de perímetro, pois geralmente esse tipo de armadura solicitada para a parede do silo não é calculada a partir dos valores de pressão e de força que atuam na célula. (SAFARIAN & HARRIS, 1985, apud ALVES, 2001).

$$A_{sv,\text{mín}} = 0,0020 \cdot b \cdot t \text{ (cm}^2/\text{m)} \quad (36)$$

Onde:

$A_{sv,\text{mín}}$: Armadura vertical mínima por unidade de perímetro;

b : Largura unitária da parede da célula, igual a 100cm, medida ao centro da seção;

t : Espessura da parede de concreto.

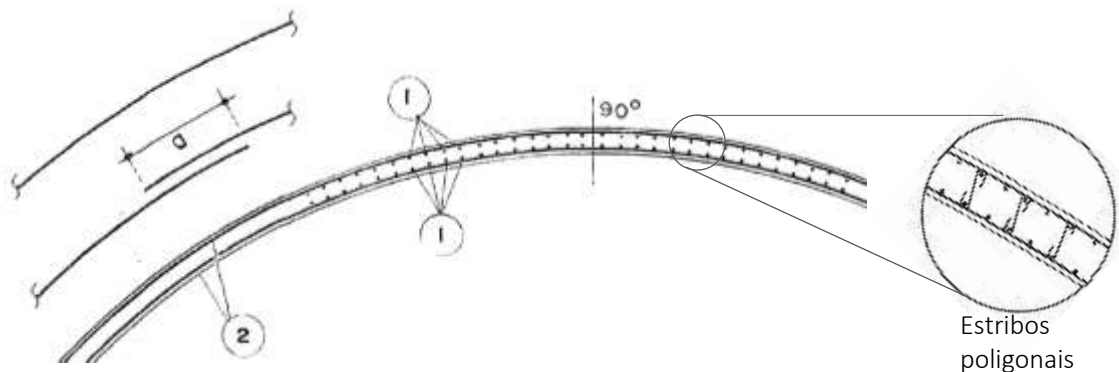
Assim, a taxa de armadura mínima será:

$$A_{sv} = A_{sv,min} = 0,0020 \cdot 25 \cdot 100 = 5,0cm^2/m$$

$$A_{s,min,face} = \frac{5,0cm^2/m}{2\ faces} = 2,5cm^2/m/face$$

A armadura vertical corresponderá a de número 1 da Figura 17. As armaduras circunferenciais, número 2, ficam externamente às armaduras verticais. Estes deverão ser travadas com estribos poligonais para proteção contra flambagens e são necessários comprimentos de emendas de transpasses obedecendo as distâncias recomendadas pela norma NBR 6118.

Figura 17 – Detalhes típicos das armaduras verticais e circunferências da parede do silo. Armadura (1) representa a vertical e a armadura (2) a circunferencial.



Fonte: Autor (2021)

Conforme a norma americana, o espaçamento entre barras verticais não pode exceder a 4 vezes a espessura da parede, não devendo ainda ser maior que 45 cm.

As armaduras podem ser distribuídas de duas formas, conforme ACI 313 (1997, apud ALVES, 2001):

- Para silos com espessura de parede até 20 cm, tanto a armadura horizontal quanto a armadura vertical deve ser distribuída em uma só camada, posicionada no centro da parede.
- Para silos com espessura de parede maiores que 20 cm, as armaduras deverão ser distribuídas em duas camadas, próximas às faces interna e externa da parede, respectivamente.

Para a armadura vertical nesta seção, foi adotado Aço CA 50, $\phi 8.0$ C/20cm para cada face (total $2\phi 8.0$ C/20cm; $5\text{cm}^2/\text{m}$). A Tabela 24 apresenta os comprimentos de ancoragem e de emenda por transpasse.

Tabela 24 – Armadura vertical e comprimentos de emendas por transpasse.

| Seção 5 - Armadura Circunferencial | Armadura e comprimentos de emenda por transpasse |
|--|--|
| Coeficiente de conformação superficial para barra de alta aderência CA-50 | $\eta_1 = 2,25$ |
| Coeficiente de conformação superficial para situações de boa aderência | $\eta_2 = 1,00$ |
| Coeficiente de conformação superficial para com $\phi < 32\text{mm}$ | $\eta_3 = 1,00$ |
| Coeficiente de conformação superficial para com $\phi < 32\text{mm}$ | $\eta_3 = 1,00$ |
| Resistência de aderência de cálculo (tensão última de aderência) entre a armadura passiva e o concreto (MPa) | $f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} = 2,25 \cdot 1,7544 = 3,9474\text{MPa}$ (37) |
| Constante de ancoragem (CA-50) | $K = \frac{f_{yd}}{4 \cdot f_{bd}} = \frac{434,78\text{MPa}}{4 \cdot 3,9474\text{MPa}} = 27,5360$ (38) |
| Comprimento de ancoragem (cm) | $l_{bi} = \phi_i \cdot K = 0,8 \cdot 27,5360 \cong 22\text{cm}$ (39) |
| Emendas por transpasse (cm) | $l_{ot} = \alpha_{ot} \cdot l_{bi} = 2 \cdot 22 = 44 \rightarrow 50\text{cm}$ (40) |

Fonte: Autor (2021)

3.4.1.2. Armadura de tração (circunferencial)

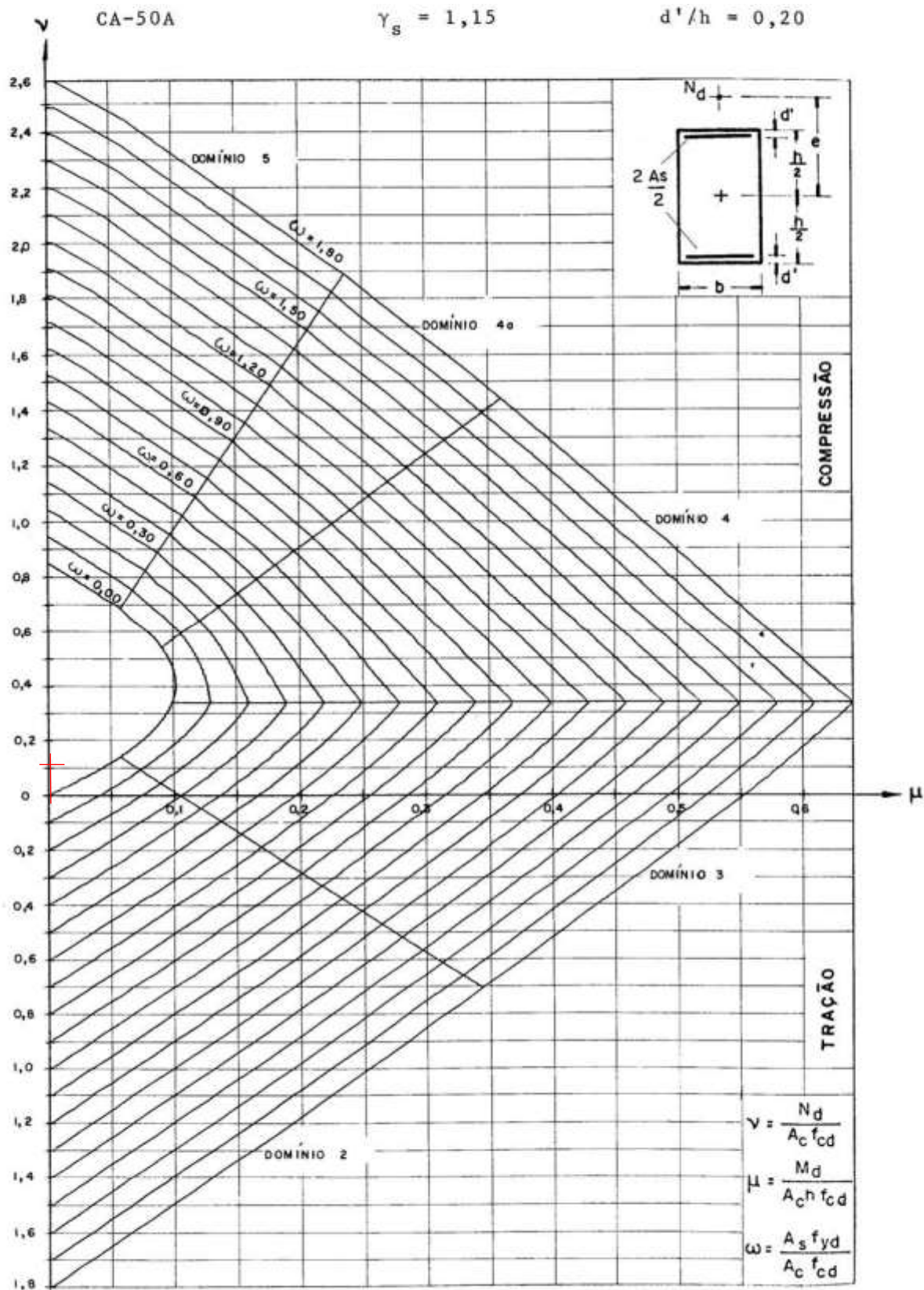
O principal dimensionamento da armadura circunferencial da parede é feito levando em consideração o esforço normal de tração.

Será apresentado o dimensionamento da seção 5. Os resultados da análise estrutural são encontrados as solicitações de forças $N_{d,xx,+20,0}$ no valor de 861kN/m (combinação 6), sendo os valores “xx” na direção circunferencial (ver referências na Figura 16). Os valores negativos indicam compressão enquanto os positivos indicam tração. Ver na Figura A-3 do ANEXO A os esforços da combinação 6 do estado limite último.

- Seção 5: Nível +20,0m ao +30,0m:

$$N_{d,xx,+20,0} = 861\text{kN/m} \text{ (combinação 6)}$$

Figura 18 – Ábaco para flexão composta normal. Ábaco A-4



Fonte: VENTURINI (1987)

Os valores de N_{xx} são calculados considerando-se que apenas a armadura de aço resistirá aos esforços, uma vez que o concreto não apresenta boa resistência a tração, conforme equação 25, adaptado de MONTROY *et al* (2011, p 438).

$$A_s = \frac{N_{sd}}{\sigma_{st}} \quad (41)$$

Onde:

A_s : é área da armadura circunferencial na parede;

σ_{st} : é a tensão de tração máxima permitida na armadura, imediatamente após a fissuração.

Pela equação 26, correspondente ao item 5.2.4 do anexo O da NBR 8800 (ABNT, 2008), para o concreto C40 e estimando uma barra de 10mm de diâmetro, a tensão de tração máxima, já minorada, vale 47,98 kN/cm².

$$\sigma_{st} = 810w_k^{0,50} \sqrt{\frac{f_{ck}^{2/3}}{\phi}} = 47,98 \text{ kN/cm}^2 \leq f_{ys} \quad (42)$$

Onde:

σ_{st} : tensão de tração máxima já minorada da armadura no início das aberturas de fissuras;

w_k : é a abertura máxima característica das fissuras dada pela O.4 da NBR 8800, em função da agressividade ambiental, expressa em milímetros (mm);

ϕ : diâmetro das barras da armadura, em milímetros, que não pode ser superior a 20mm;

f_{ys} : resistência ao escoamento do aço da armadura, expressa em megapascal (MPa);

f_{ck} : resistência característica do concreto à compressão megapascal (MPa).

Portanto:

$$A_s = \frac{861 \text{ kN/m}}{47,98 \text{ kN/cm}^2} = 17,95 \text{ cm}^2/\text{m}$$

O item 17.3.5.2.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014) recomenda o cálculo da armadura mínima de tração pela relação:

$$A_{s,\text{mín}} = \frac{k \cdot k_c \cdot f_{ct,ef} \cdot A_{ct}}{\sigma_s} \quad (43)$$

Onde:

$A_{s,min}$: área de armadura na zona tracionada;

A_{ct} : área de concreto na zona tracionada;

σ_s : tensão máxima permitida na armadura imediatamente após a formação de fissura, ver tabela 17.2 na norma NBR 6118:2014.

$f_{ct,ef}$: resistência média a tração efetiva do concreto no instante em que se formam as primeiras fissuras;

k : coeficiente que considera os mecanismos de geração de tensões de trações;

k_c : coeficiente que considera a natureza da distribuição de tensões na seção, imediatamente antes da fissuração.

Assim, temos que:

$$A_{s,min} = \frac{0,5 \cdot 1,0 \cdot 3MPa \cdot (25cm \cdot 100cm)}{360MPa} = 10,42cm^2/m$$

Porém, $A_{s,min}$ é dado para as duas faces. Para uma face, temos que a armadura circunferencial será:

$$A_{s,calculado,face} = 8,98cm^2/m \geq A_{s,min,face} = 5,21cm^2/m/face$$

Será adotado a armadura para cada face da parede circular, sendo disposta com Ø10mm c/8,5cm ($A_s = 9,41m^2/m/face$). A Tabela 25 apresenta os comprimentos de ancoragem e de emenda por transpasse.

Ainda, é necessário a verificação do controle de fissuração pela limitação das aberturas estimadas de fissuras.

Os esforços analisados serão de tração no estado limite de serviços, conforme representados na Figura A-7 no ANEXO A, teremos:

$$N_{d,xx,+20,0} = 614kN/m \text{ (combinação 7)}$$

A tensão na barra de aço será então:

$$\sigma_{si} = \frac{N_k}{A_s} = \frac{614kN/m}{18,82cm^2} = 32,63kN/cm^2m$$

Tabela 25 – Armadura circunferencial e comprimentos de emendas por transpasse.

| Seção 5 - Armadura Circunferencial | Armadura e comprimentos de emenda por transpasse |
|--|--|
| Coeficiente de conformação superficial para barra de alta aderência CA-50 | $\eta_1 = 2,25$ |
| Coeficiente de conformação superficial para situações de má aderência | $\eta_2 = 0,70$ |
| Coeficiente de conformação superficial para com $\phi < 32\text{mm}$ | $\eta_3 = 1,00$ |
| Coeficiente de conformação superficial para com $\phi < 32\text{mm}$ | $\eta_3 = 1,00$ |
| Resistência de aderência de cálculo (tensão última de aderência) entre a armadura passiva e o concreto (MPa) | $f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} = 1,575 \cdot 1,7544 = 2,763\text{MPa}$ |
| Constante de ancoragem em má aderência (CA-50) | $K = \frac{f_{yd}}{4 \cdot f_{bd}} = \frac{434,78\text{MPa}}{4 \cdot 2,763\text{MPa}} = 39,33$ |
| Comprimento de ancoragem em má aderência (cm) | $l_{bi} = \phi_i \cdot K = 1 \cdot 39,33 \cong 40\text{cm}$ |
| Emendas por transpasse (cm) | $l_{ot} = \alpha_{ot} \cdot l_{bi} = 2 \cdot 40 = 80\text{cm}$ |

Fonte: Autor (2021)

Calculando a taxa de concreto que encobre a barra de aço, no valor máximo de $7,5\phi_l$ da armadura, conforme recomendações do Item 17.3.2.1.2 da NBR6118:2014, teremos:

$$\rho_{ri} = \frac{A_{\phi 10\text{mm}}}{A_{cri}} = \frac{A_{\phi 10\text{mm}}}{(esp \cdot (cob + \phi_v + 7,5\phi_l))} = \frac{\frac{1^2 \cdot \pi}{4}}{(8,5 \cdot (4 + 1 + 7,5))} = 0,00739 \rightarrow \quad (32)$$

$$W_{k1} = \left(\frac{\phi_i \cdot \sigma_{si} \cdot 3 \cdot \sigma_{si}}{12,5 \cdot \eta_1 \cdot E_{si} \cdot f_{ct,m}} \right) = \left(\frac{10 \cdot 326,3 \cdot 3 \cdot 326,3}{12,5 \cdot 2,25 \cdot 210000 \cdot 3,5088} \right) \cong 0,154\text{mm} \quad (33)$$

$$W_{k2} = \frac{\phi_i \cdot \sigma_{si}}{12,5 \cdot \eta_1 \cdot E_{si}} \cdot \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) = \frac{10 \cdot 326,3}{12,5 \cdot 2,25 \cdot 210000} \cdot \left(\frac{4}{0,00739} + 45 \right) \cong 0,323\text{mm} \quad (34)$$

Se pelo menos um desses resultados for menor que 0.3 mm, a fissura não é nociva à estrutura. Nesse caso, um dos resultados é menor que o limite permitido. Então a fissura não é nociva à estrutura.

4. CONCLUSÃO

Reconhecendo sobre a importante necessidade de desenvolvimento de projetos construtivos em silos no Brasil para suprir a alta demanda produtiva agrícola no país, o estudo

instiga o tema com o aprendizado dos conceitos de pressões geradas por materiais armazenados em silos e aplicação de critérios de dimensionamentos de projetos em silos de concreto armado.

Foram apresentadas o cálculo das pressões de paredes do silo pelo armazenamento de farelo de soja através das normas estrangeira e do estudo dos tipos de fluxos, geometrias e formas de silo. Em sequência foi estudado outros fatores de dimensionamento como cálculo das cargas de vento e uma breve análise de dimensionamento de paredes cilíndricas finas esbeltas.

A análise foi realizada com base em um estudo de caso, procurando validar os resultados ao projeto exemplo.

Durante o processo de execução dos cálculos e dimensionamento, o trabalho limitou-se ao dimensionamento e da verificação do cálculo em uma única seção da parede do silo, seção 5, no nível +20,0m ao nível +30,0m. Foi recorrido ao uso de programa computacional com elemento de casca para análise dos esforços das paredes do silo.

Admitindo-se que o caso do projeto existente é válido, o cálculo de estabilidade global foi omitido neste estudo. No entanto, ele é parte fundamental para o dimensionamento correto das estruturas, sendo que a verificação foi necessária durante o dimensionamento real do silo.

É importante ainda ressaltar que há grande variação de pressões ao considera o descarregamento excêntrico. Os silos projetados para descarregamento concêntricos não poderão ser utilizados com excentricidade de descarregamento. A operação do silo deve atender ao fluxo de descarregamento dimensionado, podendo fora deste, acarretar sérios danos à estrutura e à segurança.

Conclui-se, neste trabalho, que o tema foi abordado brevemente com a aplicação dos cálculos de pressões de paredes. O objetivo inicial do trabalho foi alcançado, limitando-se à verificação das armaduras da parede do silo, que, visa auxiliar e dar direcionamento a futuros projetos estruturais.

4.1.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A principal sugestão é aplicar a continuação do desenvolvimento do dimensionamento das paredes concernentes a seção de apoio da laje da tremonha, das bases do silo na fundação, das verificações de aberturas e também análise da tremonha plana.

Sugere-se também implementar outros valores de propriedades físicas e também da utilização de softwares recentes, próprio para determinação de pressões em silos.

A análise de ocorrências de patologias em silos armado também é importante, uma vez que está relacionada com o efeito de flexão da parede decorrentes da ação de gradientes térmicos e fissurações.

REFERÊNCIAS

- ANTONIO SILVA REIS, MARCOS. **Dimensionamento de silos em concreto armado para armazenagem de grãos**. 2016. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS – ABIOVE. **Estatísticas da produção agrícola no país**. Disponível em: <https://abiove.org.br/estatisticas>. Acessado em 25 de julho de 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014
- _____. **NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Versão Corrigida. Rio de Janeiro, 2019.
- _____. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento**. Versão Corrigida. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação**. Rio de Janeiro, 2007
- _____. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Versão Corrigida 2. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. **Design Specification for Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials (ACI 313-16) and Commentary**. 2016.
- AUSTRALIAN STANDARD. AS 3774-1996. **Loads on bulk solids containers**. 1996.
- BENINK, E.J. **Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes**. Tese (Doutorado). 162p. Universiteit Twente. The Netherlands, 1989.
- CARDOSO, D.L.; HENZEL, C.R.; VANDERLEI, R.D.; CHRIST, D. **Método dos elementos finitos aplicado à análise tensão-deformação em silos**. In: II C3N – II CONGRESSO DA ACADEMIA TRINACIONAL DE CIÊNCIAS, 2007, Foz do Iguaçu – PR. II C3N – II CONGRESSO DA ACADEMIA TRINACIONAL DE CIÊNCIAS. Foz do Iguaçu – PR: Parque Tecnológico de Itaipu – PTI, 2007. V.1. P. 1-10
- CONEL CONSTRUTORA. Conel Construtora Portifólio: Graneleiros ADM do Brasil Ltda. Figura. Uberlândia, Minas Gerais. Disponível em <https://conel.com.br/site/br/detalhes-imovel/50/adm-do-brasil-em-uberlandia-mg>. Acessado em 31 de outubro de 2021.
- CARMONA, TIAGO GARCIA. **Esforços circunferenciais em tanques de concreto Armado com seção circular tensões originadas por gradiente térmico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

CALIL Jr., C.; NASCIMENTO, J.W.B; ARAÚJO, E. C. **Silos Metálicos Multicelulares. Serviço Gráfico** - EESC / USP – São Carlos – SP, 1997. 175p.

CALIL Jr., CARLITO. **Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais**. Tese (Livre Docência). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos – SP, 1990.

CALIL JR., CARLITO; CHEUNG, ANDRÉS BATISTA. **Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo**. São Carlos, EESC. 232p. 2007.

CHEUNG, ANDRÉS BATISTA. **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escolha de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

COSTA, TIAGO C. P. **Silos de concreto protendido utilizando cordoalhas engraxadas: cálculo e dimensionamento**. 2015. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

CONAB. **Conab finaliza seminário do déficit de armazenagem apontando soluções**. Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/3981-conab-finaliza-seminario-do-deficit-de-armazenagem-apontando-solucoes-emergenciais>. Acessado em 31 de maio de 2021.

CONAB. **Perspectivas para a Agropecuária**. Volume 8 - Safra 2020/2021 - Edição Grãos. P.1-75, ago. Brasília, 2020.

EUROPEAN STANDARD. em-1991-4. **Eurocode 1 - Actions on structures - Part 4: Silos and tanks**. 2006.

FREITAS, E. das G. A. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escolha de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

IBGE. **Capacidade de armazenagem agrícola fica em 176,5 milhões de toneladas no 1º semestre de 2020**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/29405-capacidade-de-armazenagem-agricola-fica-em-176-5-milhoes-de-toneladas-no-1-semester-de-2020>. Acessado em 31 de maio de 2021

JENIKE, A. W.; JOHANSON, J.R. (1968). **Bin loads**. Journal of Structural Division ASCE, V.94. p.1011-1041.

JENIKE, A. W. (1964). **Storage and Flow of Solids**. Bulletin 123. Utah Engineering Experiment Station. University of Utah. Salt Lake City. Utah. Estados Unidos. 197 p.

JENIKE, A. W. (1985). **New developments in the theory of particulate solids flow**. EFCE, Serie N49, Bergen, Norway, 7 p.

JENIKE, A. W. (1987). **A theory of Flow of Particulate Solids in Converging and Diverging Channels Based on a Conical Yield Function**. Powder Technology. V.50 p. 229-236.

MADRONA, FERNANDA SCARAMAL. **Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MATEC ENGENHARIA. **Portifólio Matec: AMBEV**. Figura. Uberlândia, Minas Gerais. Disponível em: <https://www.mateconnect.com.br/en/portfolio-item/ambeve-manufacturing-plant/>. Acessado em 31 de outubro de 2021.

MILANI, A. P. **Determinação das propriedades de produtos armazenados para o projeto de pressões e fluxo em silos**. EESC-USP, 1993, 272p.

PALMA, G. **Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d > 1,5$)**. Exame de Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

PUZZI, D. **Manual de armazenamento de grãos: armazéns e silos**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1977.

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenagem de grãos**. Campinas, SP: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986.

ROTTER, J. M. **Guide for the economic design of circular metal silos**. London: Spon Press, 28p. 2001.

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

SCHULZE, DIETMAR. 1996: Flowability of bulk solids – Definition and measuring techniques, Part I and II, Powder and Bulk Engineering 10 4, pp. 45-61, and 10 (1996) 6, pp. 17-28.

SCHULZE, DIETMAR. **Powders and Bulk Solids – Behavior, Characterization, Storage and Flow**. Springer International Publishing, 2nd ed. 2021

SCHULZE, DIETMAR. **A comprehensive comparison of two processes for testing of powder flow properties** - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Plot-of-shear-stress-vs-time-left-and-yield-locus-right-Figure-from-Schulze-2013_fig3_276278595. Accessed 12 Oct, 2021]

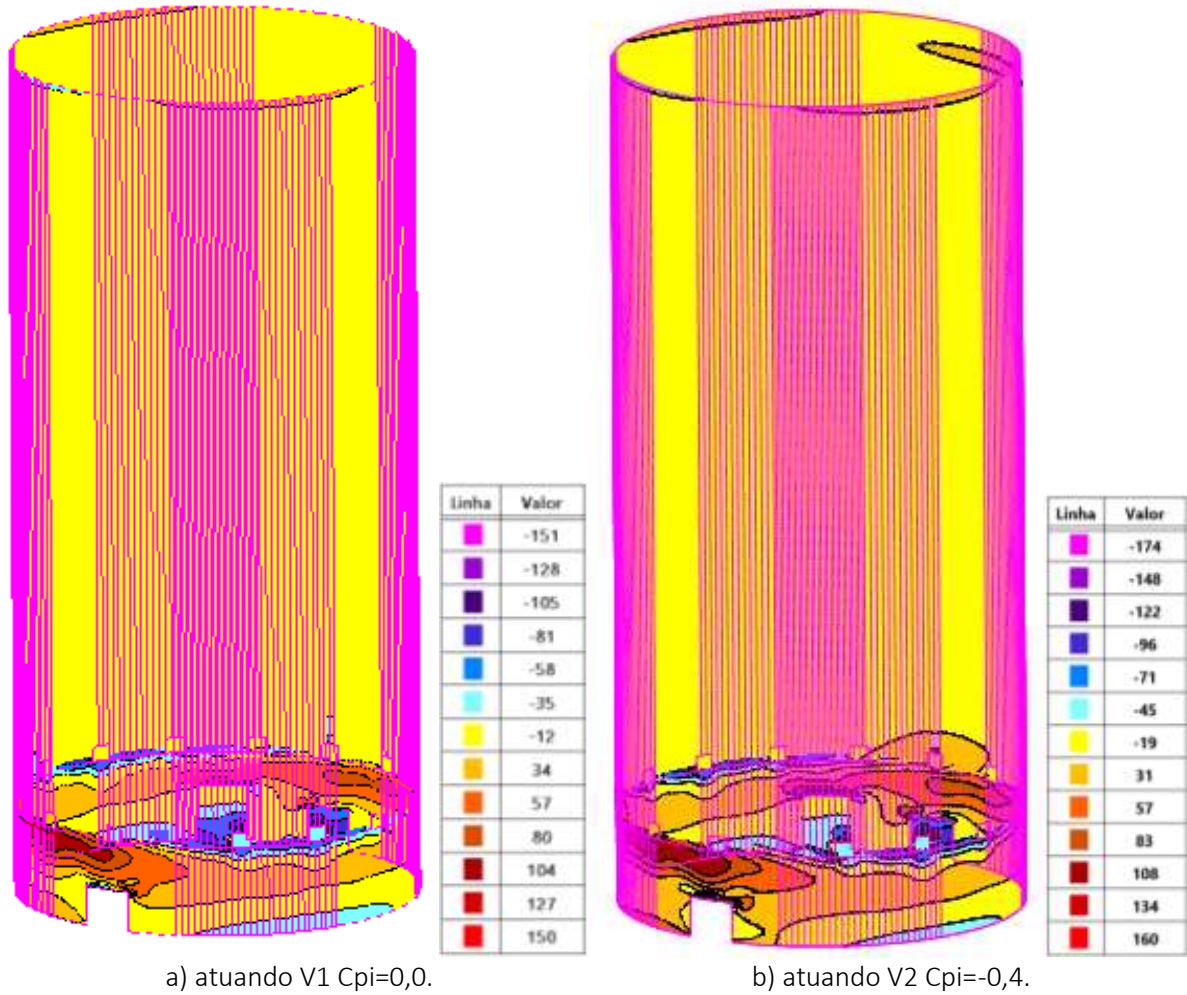
SILVA, ALESSANDRA MAEVA ESTHER FÁVARO; GRADOWSKI, JESSICA WENDHAUSEN; LETÍCIA DE FÁTIMA DOS SANTOS; TUREK, YASMIN LOREN; JUNIOR MAURÍCIO KUEHNE. **Análise da viabilidade de instalação de um sistema de armazenagem de soja: um estudo de caso em uma propriedade de médio porte no estado do Paraná**. FAE Centro Universitário. Núcleo de Pesquisa Acadêmica – NPA. Memorial TCC – Caderno da Graduação, p. 39, 2016.

VENTURINI, Wilson Sérgio; RODRIGUES, Rogério de Oliveira. **Dimensionamento de Peças Retangulares de Concreto Armado Solicitados à Flexão Reta**. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo. São Carlos, 1987.

WEBER, É. A. **Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos**. Panambi: Salles, 2005.

ANEXO A – RESULTADOS DA MODELAGEM

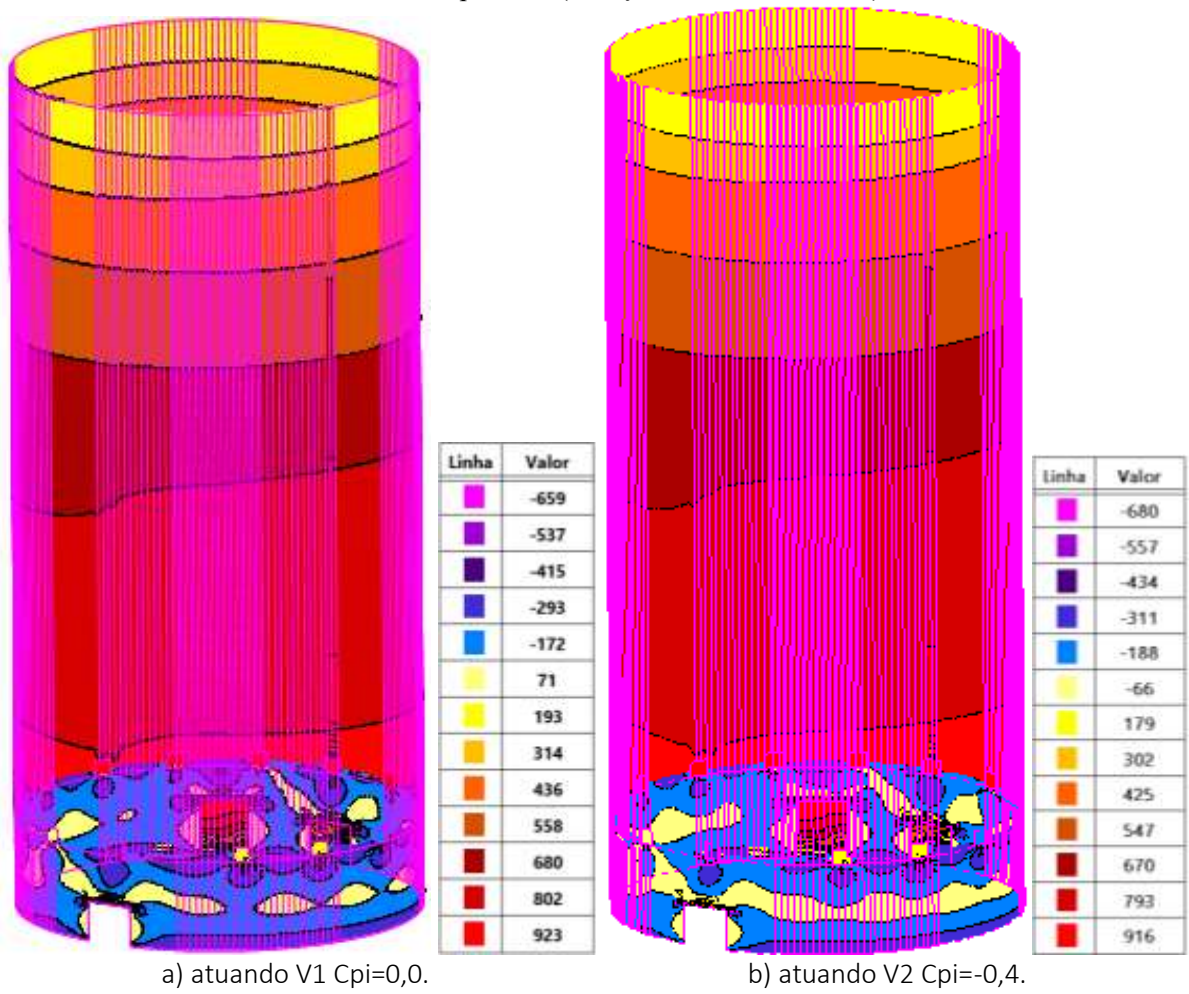
Figura A.1 – Força na direção X. Combinação ELU – 1 e 2. Capacidade do silo vazio.
Software Strap2021© (licença trial uso acadêmico)



kN/m
Força na direção X

Fonte: Autor (2021)

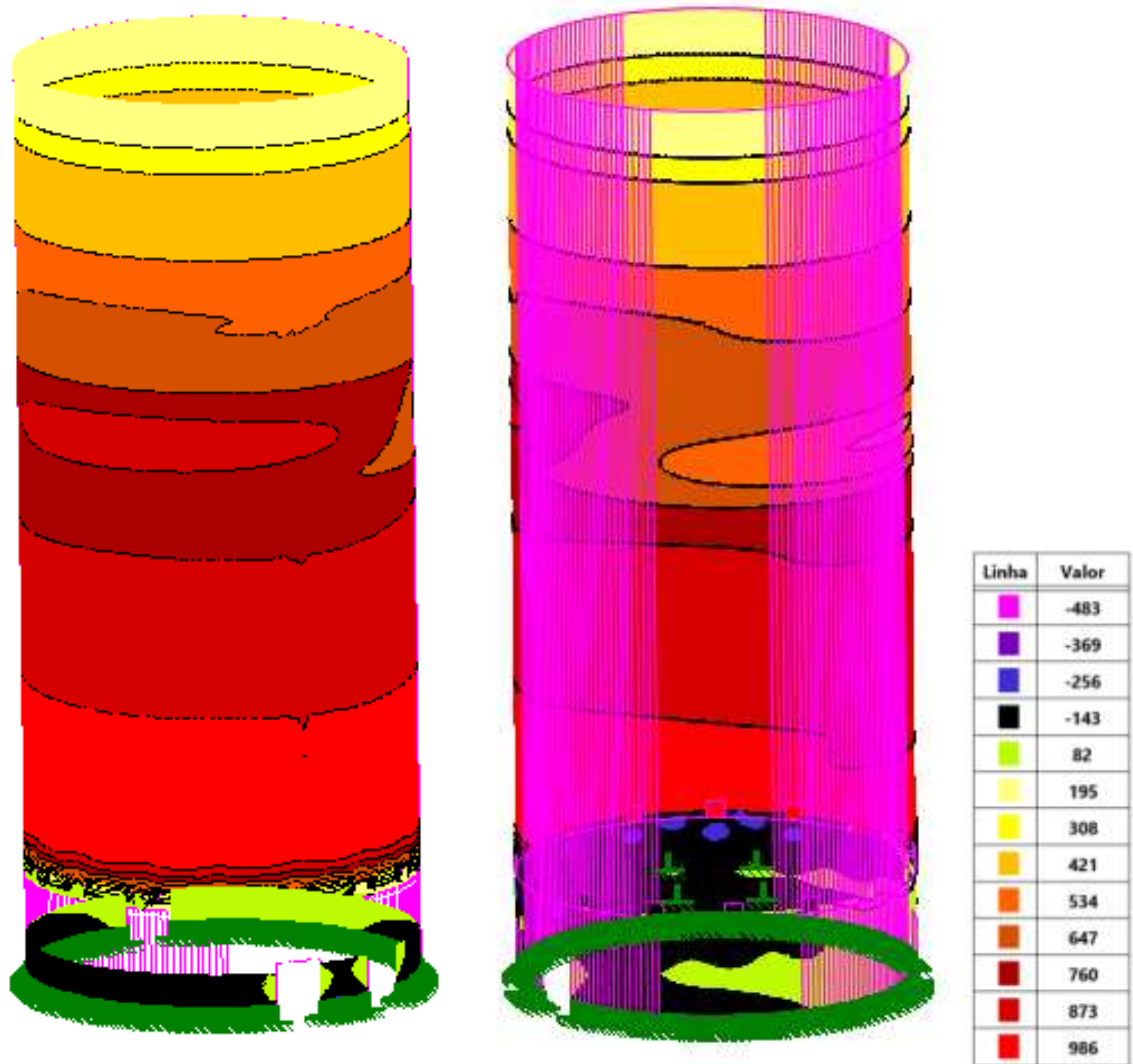
Figura A.2 – Força na direção X. Combinação ELU – 3 e 4. Capacidade do silo cheio em carregamento.
Software Strap2021© (licença trial uso acadêmico)



kN/m
Força na direção X

Fonte: Autor (2021)

Figura A.3 – Força na direção X. Combinação ELU – 6. Capacidade do silo cheio para o descarregamento.
Software Strap2021© (licença trial uso acadêmico)



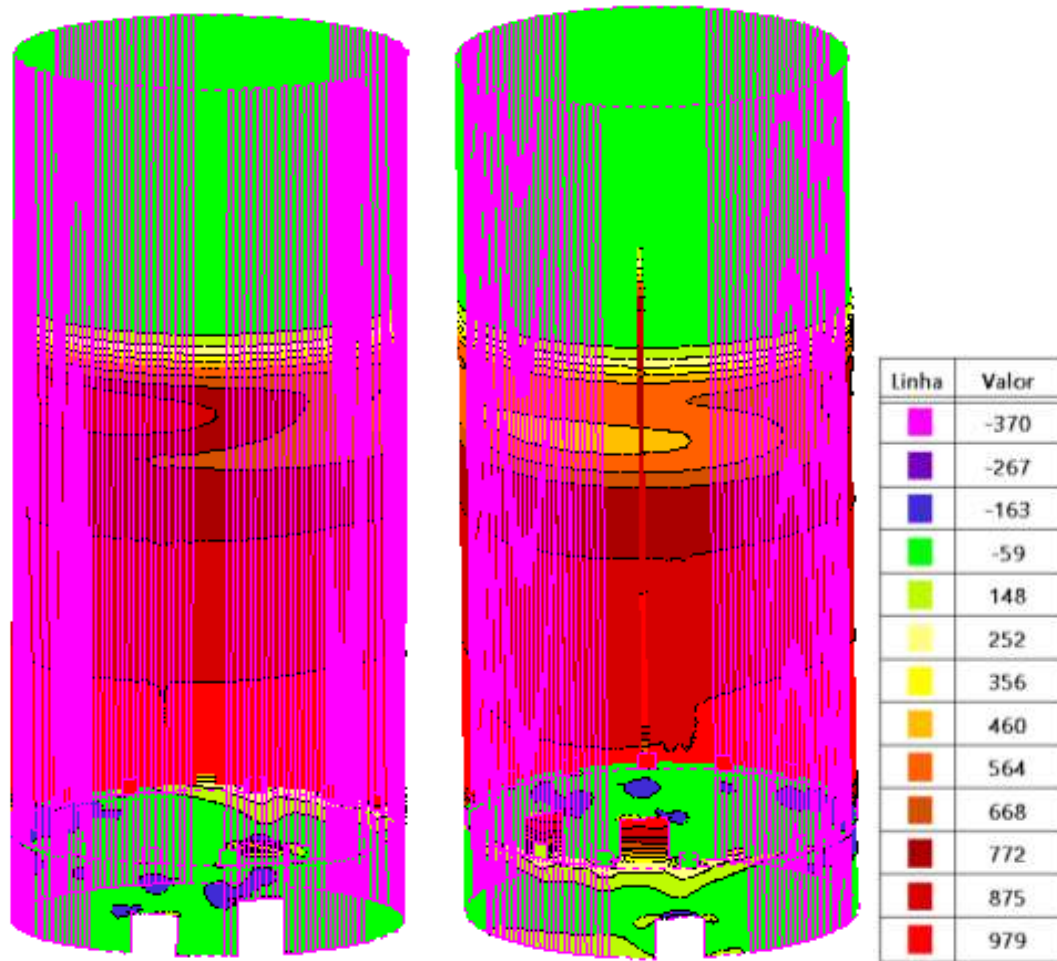
atuando $V2 C_{pi} = -0,4$.

kN/m

Força na direção X

Fonte: Autor (2021)

Figura A.4 – Força na direção X. Combinação ELU – 6. Capacidade com 3/4 para o descarregamento.
Software Strap2021© (licença trial uso acadêmico)



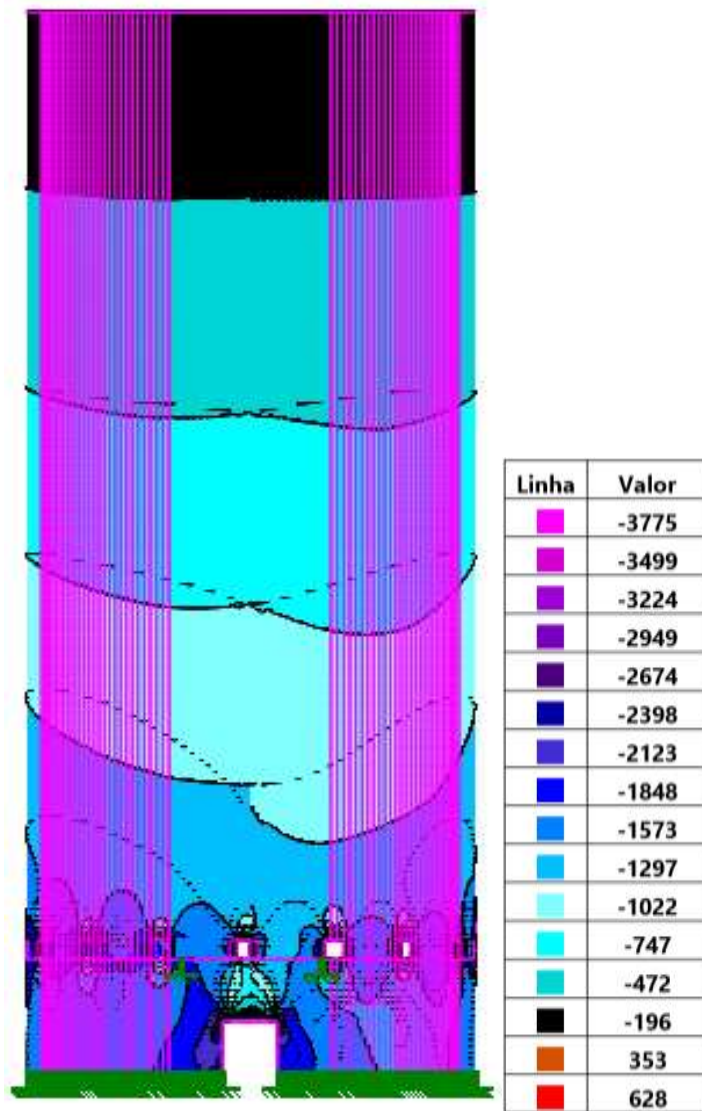
atuando $V_2 C_{pi} = -0,4$.

kN/m

Força na direção X

Fonte: Autor (2021)

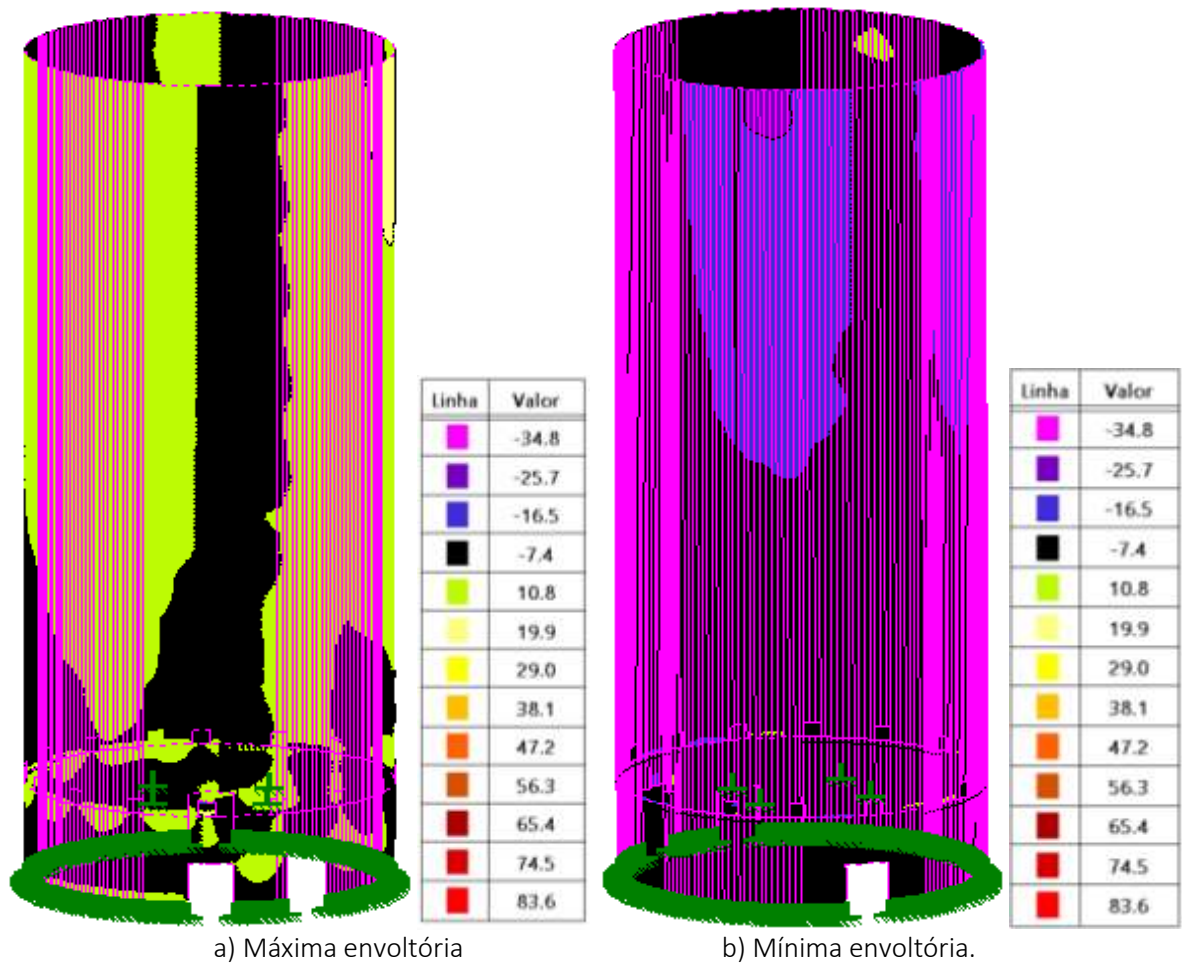
Figura A.5 – Força na direção Y. Máxima envoltória ELU (compressão).
Software Strap2021© (licença trial uso acadêmico)



kN/m
Força na direção Y

Fonte: Autor (2021)

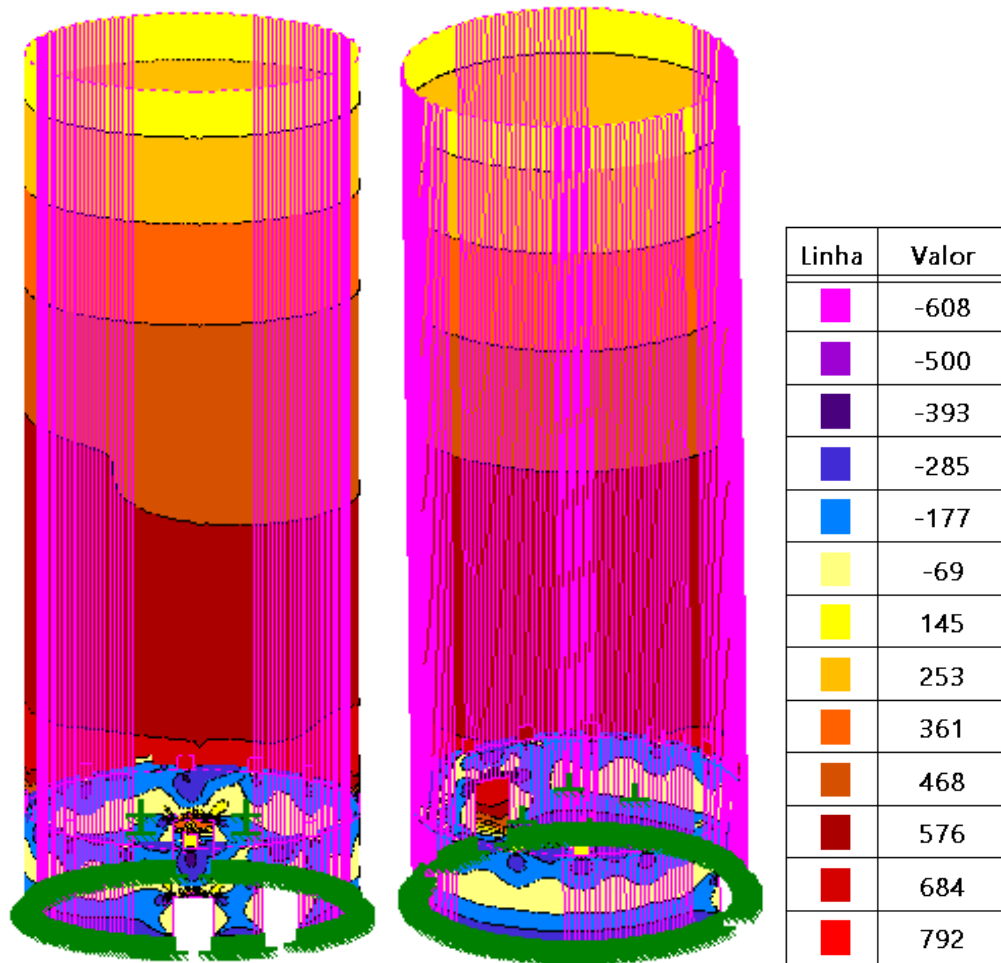
Figura A.6 – Momentos da direção X. Envoltórias ELU de momentos máximos e mínimos.
Software Strap2021© (licença trial uso acadêmico)



kNm/m
Momentos na direção X.

Fonte: Autor (2021)

Figura A.7 – Força na direção X. Combinação ELS – 7. Capacidade do silo cheio no enchimento.
Software Strap2021© (licença trial uso acadêmico)

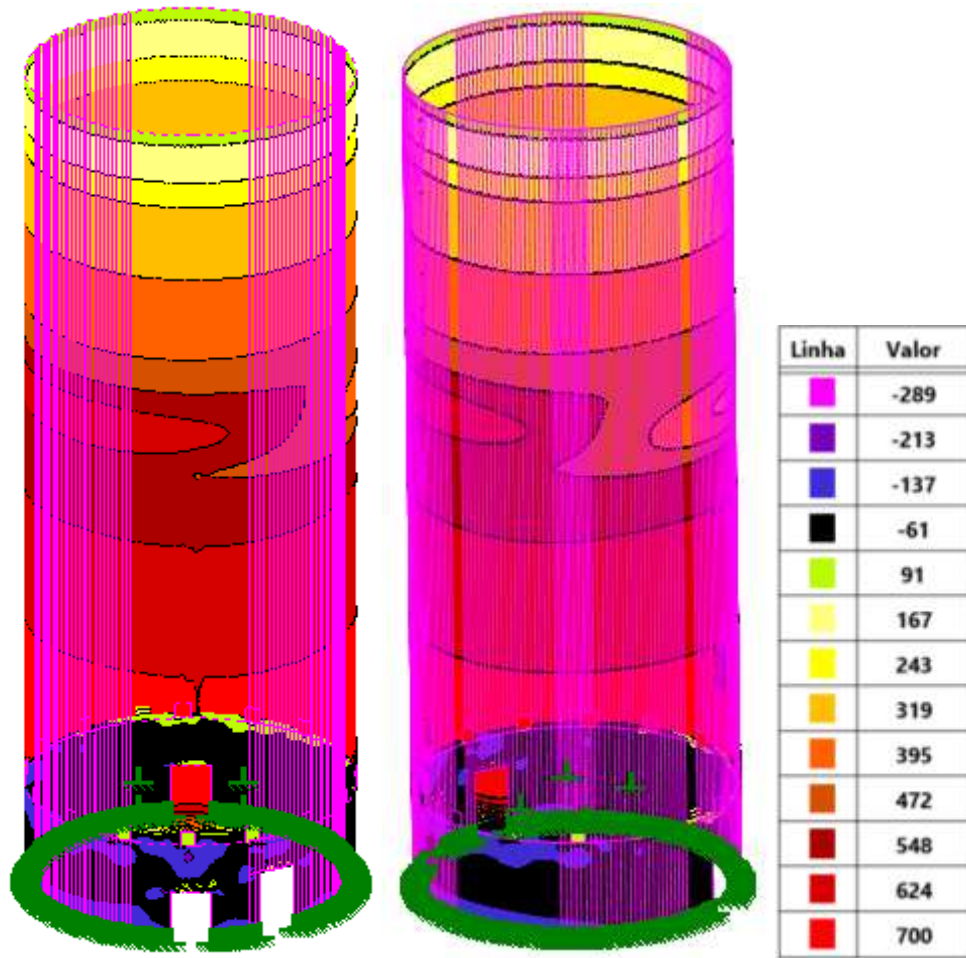


atuando V_2 $C_{pi} = -0,4$.

kN/m
Força na direção X

Fonte: Autor (2021)

Figura A.8 – Força na direção X. Combinação ELS – 8. Capacidade do silo cheio para o descarregamento.
Software Strap2021© (licença trial uso acadêmico)



atuando $V2 C_{pi} = -0,4$.

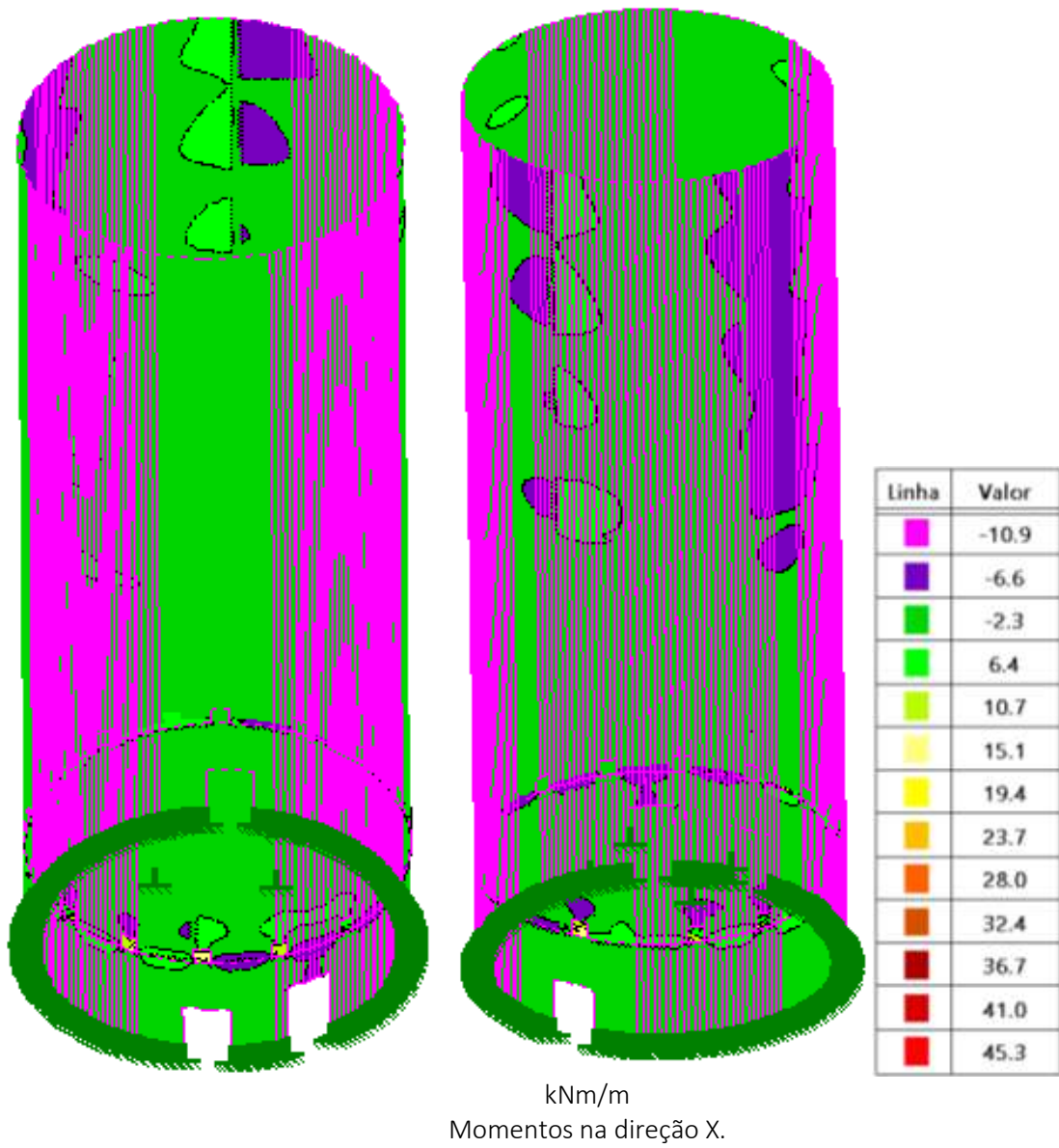
kN/m

Força na direção X

Fonte: Autor (2021)

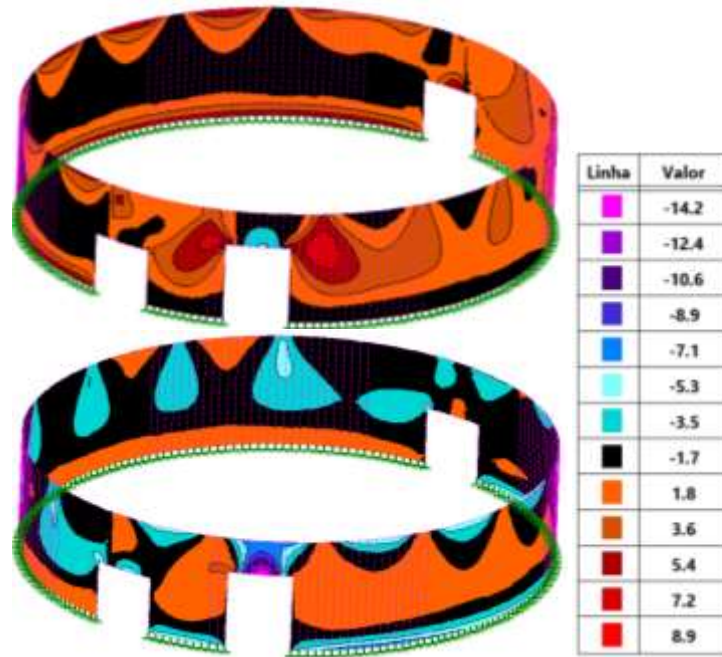
Figura A.9 – Momentos da direção X. Combinação ELS – 8. Capacidade do silo cheio para o descarregamento.

Software Strap2021© (licença trial uso acadêmico)

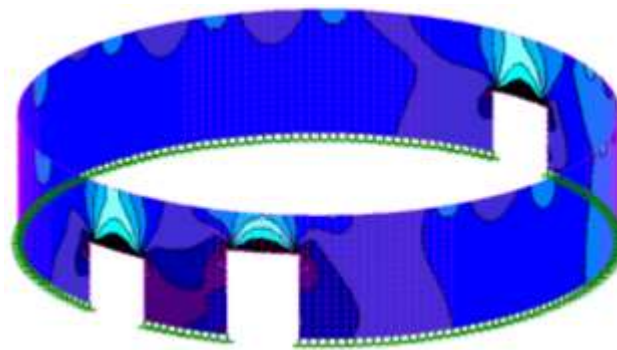


Fonte: Autor (2021)

Figura A.10 – Combinação ELU – 6. Capacidade do silo cheio para o descarregamento na seção 1. a) Momentos máximo e mínimos na direção X. b) Força na direção Y. c) Força na direção X. Software Strap2021© (licença trial uso acadêmico)



kNm/m
a) Momentos na direção X



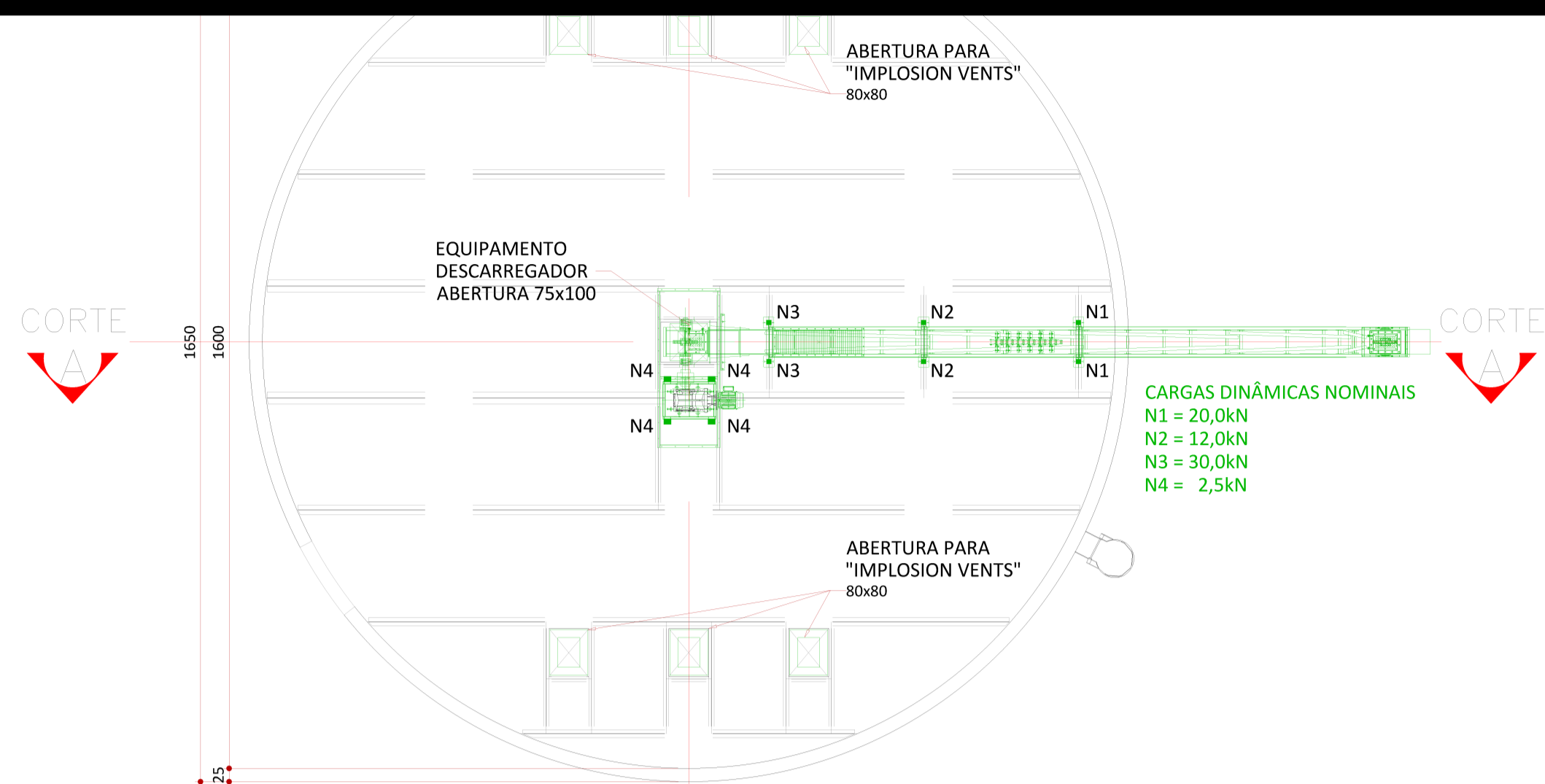
kN/m
b) Força na direção Y

| Linha | Valor |
|-------|-------|
| 1 | -483 |
| 2 | -414 |
| 3 | -346 |
| 4 | -278 |
| 5 | -210 |
| 6 | -141 |
| 7 | -73 |
| 8 | 62 |
| 9 | 131 |
| 10 | 199 |
| 11 | 267 |
| 12 | 335 |
| 13 | 403 |

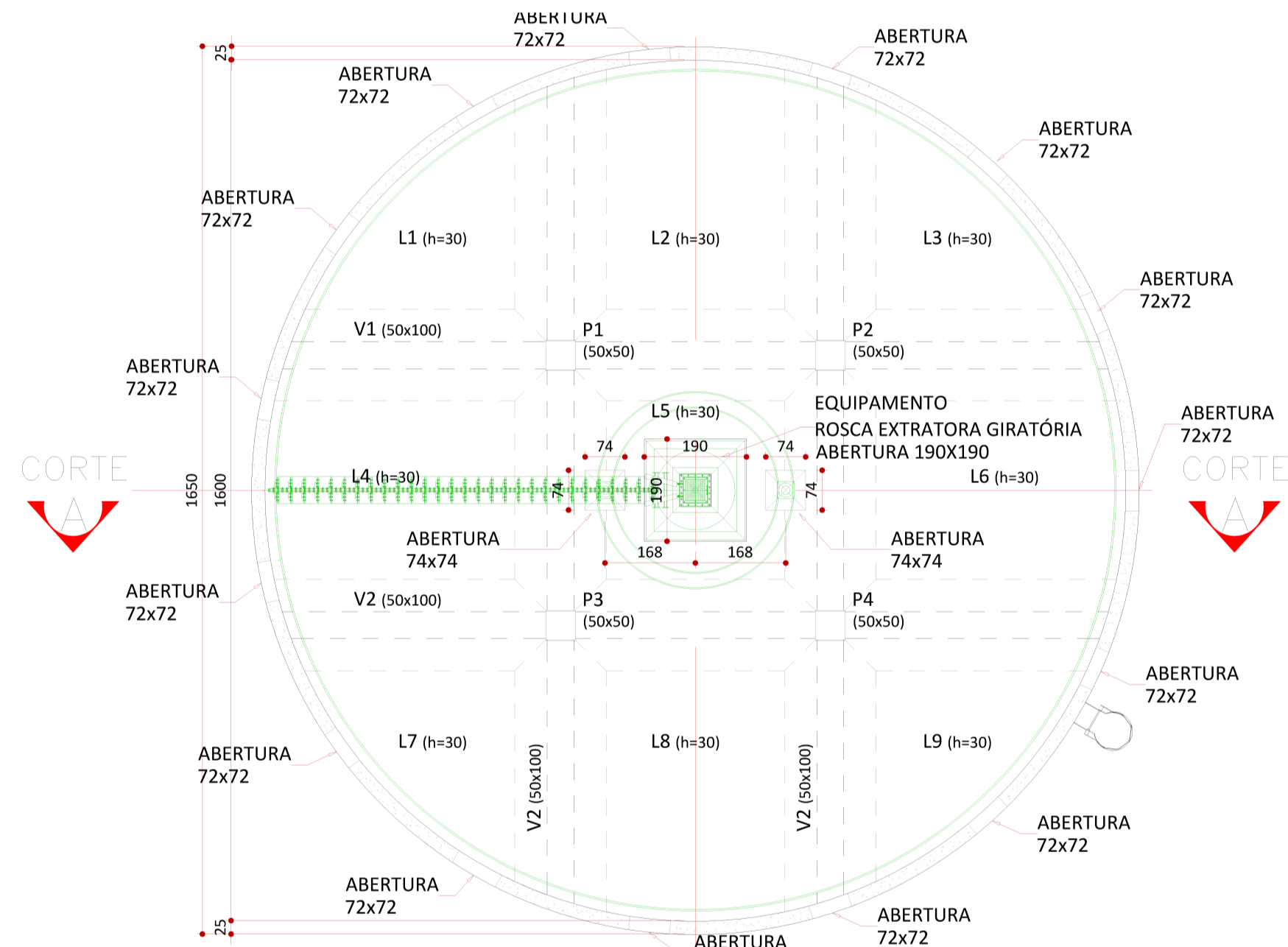


kN/m
c) Força na direção X

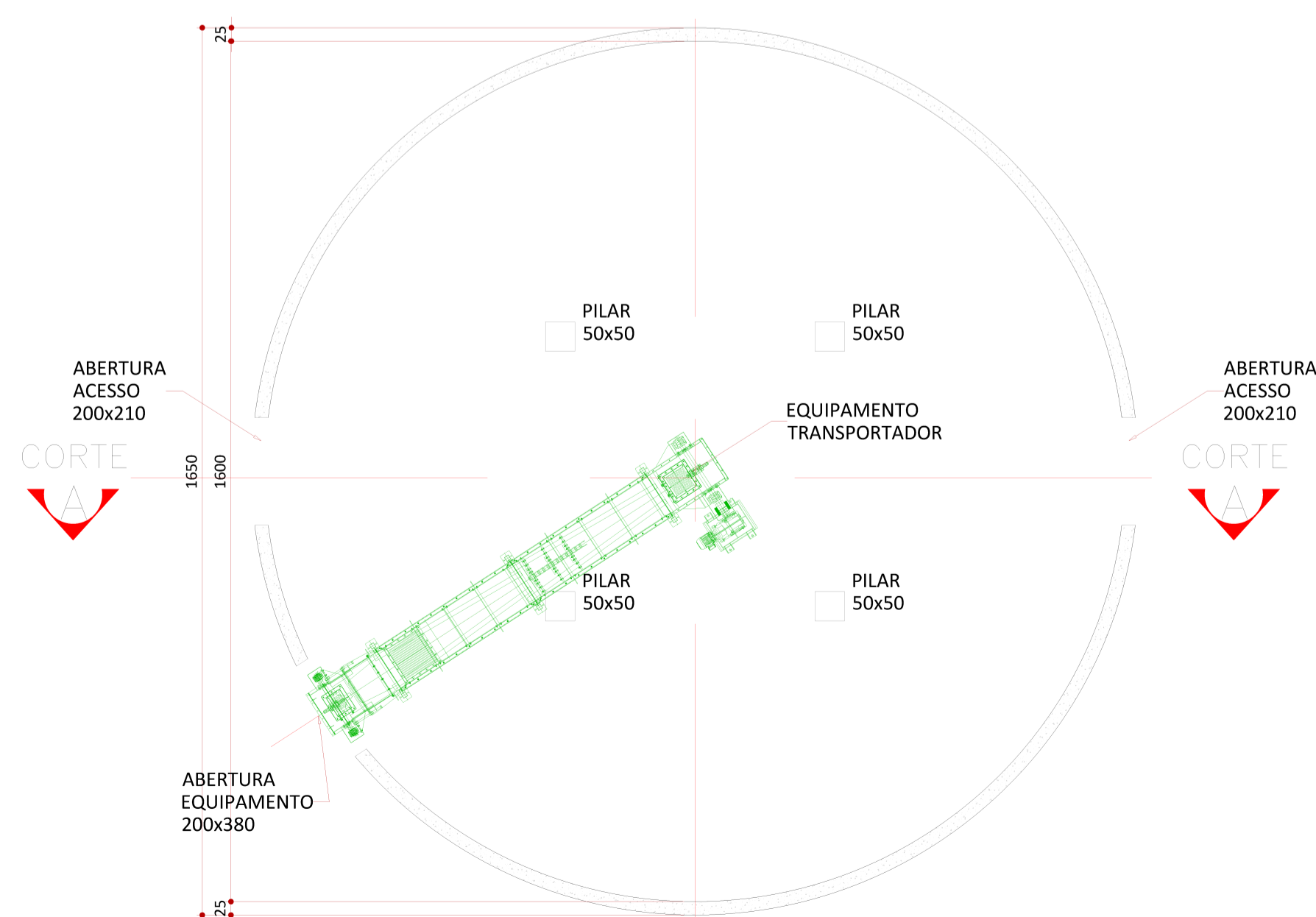
Fonte: Autor (2021)



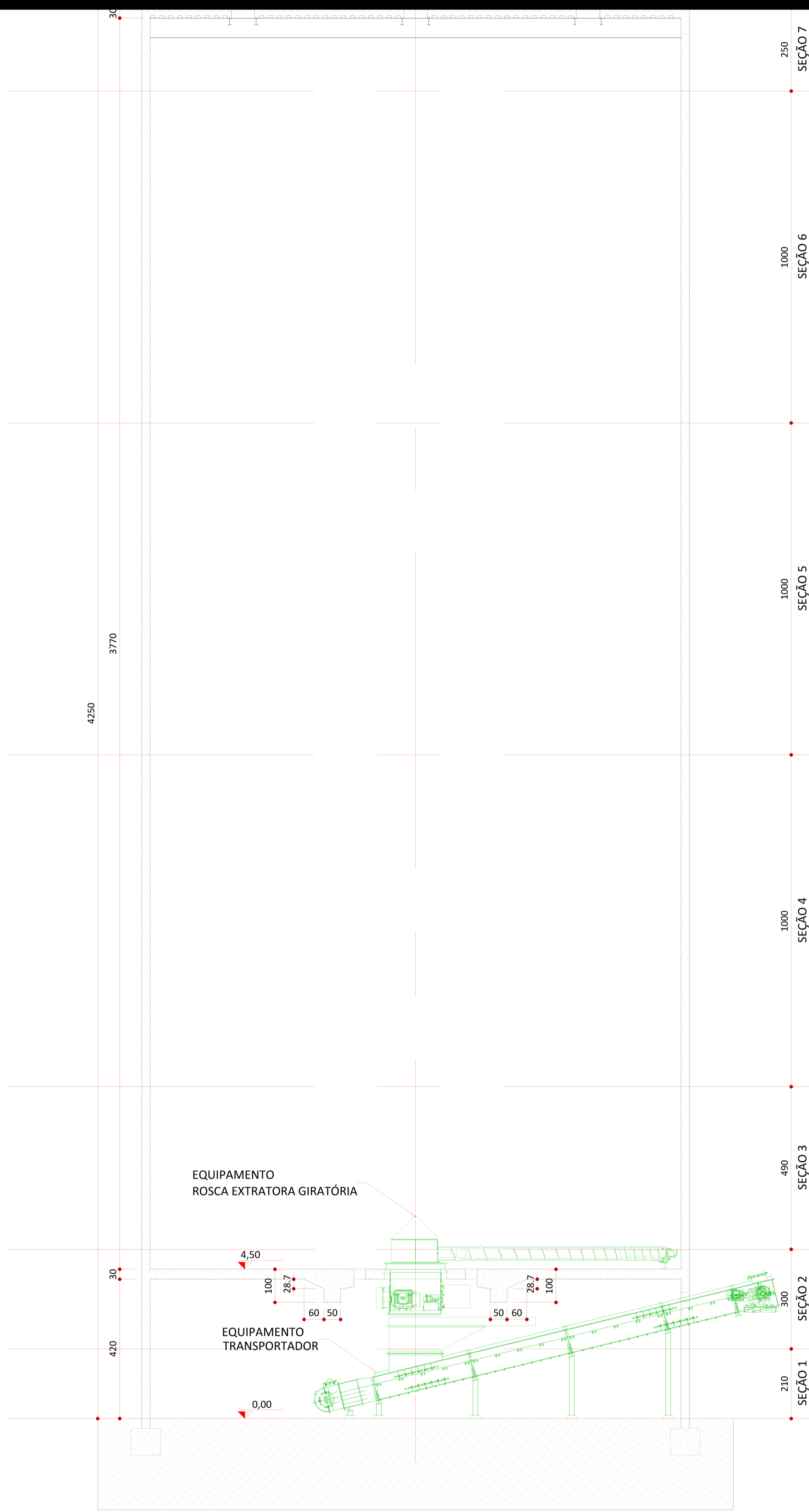
PLANTA NÍVEL +42,50



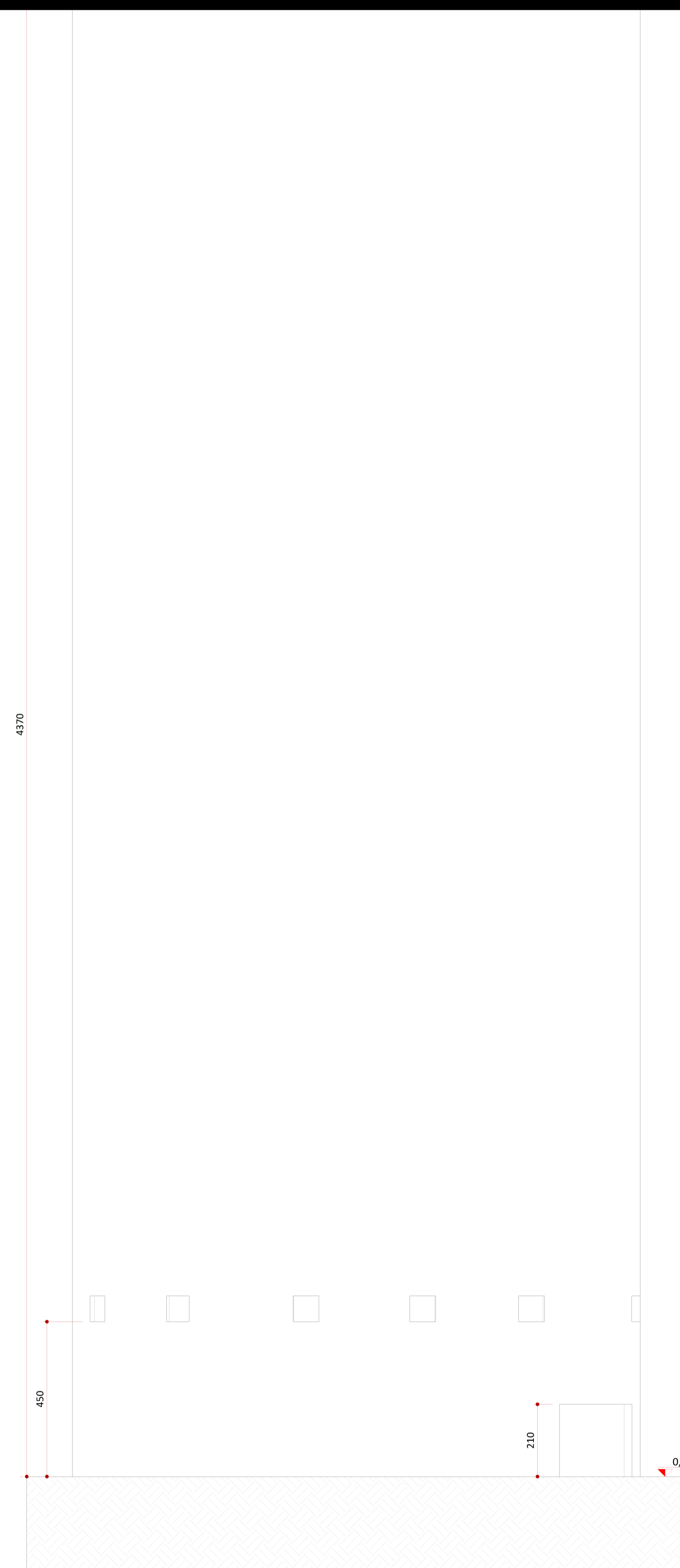
PLANTA NÍVEL +4,50



PLANTA NÍVEL +0,00



CORTE AA



VISTA FRONTAL

NOTAS GERAIS

1-UNIDADES EM CM, SALVO ONDE INDICADO.

| | | |
|--|--------|---------------------------------------|
| TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: ANEXO B - PROJETO DO MODELO DE ESTUDO | | |
| DATA | OUT/21 | PROJETO ESTRUTURAL DE CONCRETO ARMADO |
| FOLHA | 01/01 | SILO DE ARMAZENAMENTO DE FARELO |
| PROJEÇÃO | | CAPACIDADE 7580m ³ |
| ESCALA | 1:100 | DESCRIÇÃO |
| | | MODELO DE ESTUDO: |
| | | PLANTAS DE FORMAS, CORTES E VISTA |
| | | FOLHA |
| | | A1 - 841 X 594 MM |
| | | REV. |
| | | 04 |

