

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Ana Paula Tanscheit

**DIMENSIONAMENTO DE SILO EM CONCRETO ARMADO COM FUNDO  
PLANO, CONSIDERANDO AS PRESCRIÇÕES DE NORMAS BRASILEIRAS E  
INTERNACIONAIS PARA AVALIAÇÃO DAS PRESSÕES EXERCIDAS PELOS  
GRÃOS**

Santa Maria, RS  
2024

Ana Paula Tanscheit

**DIMENSIONAMENTO DE SILO EM CONCRETO ARMADO COM FUNDO PLANO, CONSIDERANDO AS PRESCRIÇÕES DE NORMAS BRASILEIRAS E INTERNACIONAIS PARA AVALIAÇÃO DAS PRESSÕES EXERCIDAS PELOS GRÃOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. André Lübeck

Santa Maria, RS  
2024

**Ana Paula Tanscheit**

**DIMENSIONAMENTO DE SILO EM CONCRETO ARMADO COM FUNDO PLANO, CONSIDERANDO AS PRESCRIÇÕES DE NORMAS BRASILEIRAS E INTERNACIONAIS PARA AVALIAÇÃO DAS PRESSÕES EXERCIDAS PELOS GRÃOS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Civil**.

Aprovado em 29 de julho de 2024.

---

**André Lübeck, Doutor (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Almir Barros da Silva Santos Neto, Dr. (UFSM)**

---

**Alisson Simonetti Milani, Dr. (UNIPAMPA)**

Santa Maria, RS  
2024

## AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos familiares, pais e irmão, e aqueles que se tornaram parte da família, expresso minha mais profunda gratidão. A vocês, que sempre acreditaram em mim e me proporcionaram todo o apoio necessário para perseguir meus sonhos. Obrigada por me receberem sempre com sorrisos calorosos em nosso lar, mesmo quando a distância entre nós se fez presente. Cada ligação e demonstração de preocupação foram alicerces essenciais em momentos em que nossos caminhos se separaram por diferentes residências. Desde pequena, vocês me ensinaram a valorizar a importância do estudo e foram minha fonte constante de força, amor incondicional e encorajamento ao longo de minha jornada acadêmica. Sem dúvida, vocês foram a força propulsora por trás de todas as minhas conquistas.

Ao meu noivo, Juliano, por ser minha base sólida. Tua presença trouxe luz para meus dias e força pro meu coração. Obrigada pelo apoio inabalável, por celebrar comigo as vitórias e me encorajar nos momentos difíceis. Sou imensamente grata pelo teu amor e compreensão para que eu pudesse seguir meus estudos e ir em busca dos meus sonhos. Agradeço pelo teu carinho incondicional e apoio incansável. Obrigada por compartilhar comigo cada parte desse caminho.

Ao meu orientador, André Lubeck, pelo auxílio neste trabalho, pela sua prontidão sempre que precisei de ajuda. Obrigada por compartilhar seu conhecimento, profissionalismo, experiências e tempo para que este trabalho pudesse acontecer. Obrigada também à Universidade Federal de Santa Maria por me proporcionar um ensino de qualidade e gratuito.

Aos meus amigos, tanto aqueles que a faculdade me presenteou quanto os que conheci fora dos muros acadêmicos, vocês foram uma parte essencial desta jornada. Aos que conheci na universidade, obrigada por estarem ao meu lado durante esses anos, compartilhando alegrias e por termos superado juntos os perrengues universitários, tudo isso fortaleceu nossos laços e enriqueceu nossa caminhada acadêmica.

Aos amigos que não fazem parte do ambiente universitário, meu profundo agradecimento por me incentivarem com palavras de apoio, oferecerem um sorriso reconfortante nos momentos difíceis e compartilharem seus sábios conselhos. A presença de vocês em minha vida trouxe leveza para enfrentar as adversidades do dia a dia.

Aos meus avós paternos, minha avó materna e ao meu avô materno (In memoriam), à família do meu namorado, expresso minha imensa gratidão. Seu apoio incondicional, abraços reconfortantes, incentivo constante e capacidade de sempre me levantar foram fundamentais para que tudo pudesse acontecer.

“Nós somos do tecido de que são feitos os sonhos.”

William Shakespeare

## RESUMO

### **DIMENSIONAMENTO DE SILO EM CONCRETO ARMADO COM FUNDO PLANO, CONSIDERANDO AS PRESCRIÇÕES DE NORMAS BRASILEIRAS E INTERNACIONAIS PARA AVALIAÇÃO DAS PRESSÕES EXERCIDAS PELOS GRÃOS**

AUTORA: Ana Paula Tanscheit  
ORIENTADOR: André Lübeck

A armazenagem de grãos tornou-se uma grande necessidade no Brasil devido ao crescimento da produção de grãos no país. O concreto armado surge como uma alternativa viável para a construção de estruturas de armazenagem de grãos. Compreender os principais tipos de pressões exercidas sobre essas estruturas é fundamental para o seu dimensionamento correto. Atualmente, a norma nacional existente que se refere a essas pressões, a NBR 17066 (2022), menciona que a avaliação deve ocorrer de acordo com algumas normas estrangeiras, de acordo com o fluxo que acontece dentro do silo. Para esse estudo, foram avaliadas as principais considerações sobre as pressões dos grãos e elencadas as principais diferenças das normas ANSI S 4331 (ASAE, 2019), EN 1991-4 (EUROCODE, 2006), ISO 11697 (ISO, 2012), AS 3774 (2016) e NBR 17066 (2022). Além disso, não há normativas nacionais específicas para o dimensionamento desse tipo de estruturas. Portanto, é de fundamental importância a busca por bibliografias e normas estrangeiras confiáveis para realizar esse dimensionamento.

**Palavras-chave:** Armazenagem de grãos. Concreto armado. Pressão exercidas pelos grãos. Normas estrangeiras. Dimensionamento.

## ABSTRACT

### **DESIGN OF REINFORCED CONCRETE SILO WITH FLAT BOTTOM, CONSIDERING BRAZILIAN AND INTERNATIONAL STANDARDS FOR EVALUATION OF GRAIN PRESSURES**

AUTHOR: Ana Paula Tanscheit

ADVISOR: André Lübeck

Grain storage has become a significant necessity in Brazil due to the country's increased grain production. Reinforced concrete emerges as a viable alternative for constructing grain storage structures. Understanding the main types of pressures exerted on these structures is fundamental for their correct design. Currently, the existing national standard that refers to these pressures, NBR 17066 (2022), states that the evaluation should be conducted in accordance with some foreign standards, depending on the flow inside the silo. For this study, the main considerations regarding grain pressures were evaluated, and the primary differences between the standards ANSI S 4331 (ASAE, 2019), EN 1991-4 (EUROCODE, 2006), ISO 11697 (ISO, 2012), AS 3774 (2016), and NBR 17066 (2022) were listed. Furthermore, there are no specific national regulations for the design of these types of structures. Therefore, it is of fundamental importance to seek reliable bibliographies and foreign standards to carry out this design.

**Keywords:** Grain storage. Reinforced concrete. Grain pressures. Foreign standards. Design.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capacidade de armazenagem de grãos <i>versus</i> produção de Soja e Milho.....	12
Figura 2 - Rosca Varredora .....	17
Figura 3 - Sistema de aeração.....	18
Figura 4 - Construção de canaletas de aeração.....	18
Figura 5 - Espalhador de grãos no topo do silo .....	19
Figura 6 - Dimensões do compartimento. ....	23
Figura 7 - Geometria do silo.....	25
Figura 8 - Pressões e trações conforme a norma EN 1991-4 (2006).....	26
Figura 9 - Excentricidade gerada pelo carregamento excêntrico. ....	27
Figura 10 - Tipos de fluxo .....	28
Figura 11 - Pressões de enchimento simétricas no segmento de parede vertical .....	33
Figura 12 - Aplicação de cargas locais conforme a norma EN 1991-4 (2006). ....	35
Figura 13 - Pressões no fundo de um silo baixo ou intermediário .....	40
Figura 14 - Tipos de Fluxo .....	42
Figura 15 - Representação dos tipos de geometrias .....	46
Figura 16 - Modos de fluxo simétricos.....	47
Figura 17 - Configurações do canal de fluxo excêntrico.....	47
Figura 18 - Condições não simétricas em recipientes baixos.....	48
Figura 19 - Parâmetros geométricos característicos .....	50
Figura 20 - Pressões atuando nas bases de um silo de fundo plano. ....	61
Figura 21 - multiplicador de pressão de parede normal .....	63
Figura 22 - Mapa de Isopletas .....	67
Figura 23 - Fator topográfico S1 .....	68
Figura 24 - SPT analisado .....	73
Figura 25 - Disposição de barras verticais e horizontais nas paredes .....	85
Figura 26 - Valores máximos de diâmetro $\phi$ e espaçamentos com barras de alta aderência. ..	87
Figura 27 - Pressão horizontal na viga do anel.....	88
Figura 28- Exigências mínimas de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.....	89
Figura 29- Valor do coeficiente de aderência $\eta_1$ .....	89
Figura 30 - Arranjo da armadura na galeria. ....	90
Figura 31 - Características do silo .....	96
Figura 32 - Comparativos entre pressões simétricas horizontais de carregamento entre as diferentes normas.....	99
Figura 33 - Propriedades dos grãos estipulados por Cheung (2007) e mensurados por Carvalho (2018). ....	100
Figura 34 - Outras propriedades dos grãos estipulados por Cheung (2007) e mensurados por Carvalho (2018).....	100
Figura 35 - Pressões de carregamento horizontais por Carvalho (2018).....	101
Figura 36 - Comparativos entre pressões simétricas de atrito vertical de carregamento entre as diferentes normas.....	103
Figura 37 - Pressões de carregamento de atrito por Carvalho (2018). ....	103
Figura 38 - Comparativos entre pressões no fundo do silo pelas diferentes normas.....	105
Figura 39 - Pressões no fundo obtidas por Carvalho (2018).....	105
Figura 40 - Comparativos entre pressões simétricas horizontais de descarregamento entre as diferentes normas.....	107

Figura 41 - Pressões simétricas horizontais de descarregamento obtidas por Carvalho (2018)	107
Figura 42 - Comparativos entre pressões simétricas de atrito vertical no descarregamento entre as diferentes normas	109
Figura 43 - Pressões simétricas de atrito de descarregamento obtidas por Carvalho (2018).	109
Figura 44 - Carga vertical no carregamento em kN/m obtidas por Fank (2017).	110
Figura 45 - Carga vertical no descarregamento em kN/m obtidas por Fank (2017).	111
Figura 46 - Distribuição do empuxo.	113
Figura 47 - Posição das estacas	116
Figura 48 - Força última nas paredes	119
Figura 49 - Força de acordo com a Combinação de Serviço	121
Figura 50 - Momento de acordo com a Combinação de Serviço	121
Figura 51 - Armadura horizontal do silo.	124
Figura 52 - Detalhamento da armadura vertical.	124
Figura 53 - Detalhamento da viga	125
Figura 54 - Esforço cortante na viga	126
Figura 55 - Momento na viga	126
Figura 56 - Armadura inferior da laje de fundo.	127
Figura 57 - Armadura superior das lajes	128
Figura 58 - Força Normal em kN no estado limite último	129
Figura 59 - Força Cortante em kN no estado limite último	129
Figura 60 - Momento em kNm no estado limite último	130
Figura 61 - Força Normal em kN no estado limite de serviço.	130
Figura 62 - Força Cortante em kN no estado limite de serviço	131
Figura 63 - Momento em kNm no estado limite de serviço.	131
Figura 64 - Armadura da galeria em tela	134
Figura 65 - Armadura da galeria em barra solta.	134

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Coeficientes de proporção de acordo com o material. ....	22
Quadro 2 - Fatores de conversão .....	30
Quadro 3 - Definição da superfície das paredes. ....	32
Quadro 4 - Características dos materiais. ....	43
Quadro 5 - Classificação de Materiais conforme a ISO 11697:2012 .....	43
Quadro 6 - Classificação da rugosidade da superfície.....	48
Quadro 7 - Valores da função de profundidade Janssen .....	52
Quadro 8 - Valores característicos das propriedades físicas do sólido a granel.....	53
Quadro 9 - Classificação e combinação de cargas .....	54
Quadro 10 - Fatores de carga para projeto .....	56
Quadro 11 - Valores apropriados para as propriedades.....	57
Quadro 12 - Fator S2 .....	69
Quadro 13 - Fator S3 .....	70
Quadro 14 Coeficientes de pressão externa $C_{pe}$ .....	71
Quadro 15 - Peso específico de solos argilosos.....	74
Quadro 16 - Peso específico de solos arenosos .....	74
Quadro 17 - Relação entre o tipo de solo e tensão admissível .....	76
Quadro 18 - Relação entre tensão admissível e coeficiente de mola.....	77
Quadro 19 - Coeficiente de ponderação e fatores de combinação .....	81
Quadro 20 - Siglas para representação dos carregamentos nas combinações .....	81
Quadro 21 - Combinações utilizadas.....	82
Quadro 22 - Características dos grãos de acordo com as normas estudadas.....	98
Quadro 23 - Comparativos entre pressões simétricas horizontais de carregamento entre as diferentes normas.....	98
Quadro 24 - Valores de coeficiente de atrito e K. ....	100
Quadro 25 - Comparativos entre pressões simétricas de atrito vertical de carregamento entre as diferentes normas .....	102
Quadro 26 - Comparativos entre pressões no fundo do silo pelas diferentes normas. ....	104
Quadro 27 - Comparativos entre pressões simétricas horizontais de descarregamento entre as diferentes normas.....	106
Quadro 28 - Comparativos entre pressões simétricas de atrito vertical no descarregamento entre as diferentes normas .....	108
Quadro 29 - Carga vertical na base do silo em kN/m.....	110
Quadro 30 - Pressões do vento .....	111
Quadro 31 - Empuxos na galeria .....	113
Quadro 32 - Coeficientes de mola aplicados nas estacas do anel.....	114
Quadro 33 - Cálculo da área de aço vertical.....	117
Quadro 34 - Armadura horizontal mínima .....	118
Quadro 35 - Armadura horizontal adotada .....	119
Quadro 36 -Verificação quanto à fissuração .....	122
Quadro 37 - Cálculo da armadura da galeria.....	132
Quadro 38 - Verificação da resistência à força cortante.....	133
Quadro 39 - Verificação quanto à fissuração. ....	133

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	14
1.2	OBJETIVOS .....	15
<b>1.2.1</b>	<b>Geral</b> .....	<b>15</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Específicos</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
2.1	SILOS .....	16
<b>2.3.1</b>	<b>Peso próprio</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Pressão de grãos nas paredes e fundo</b> .....	<b>21</b>
2.3.2.1	Norma americana ANSI/ASAE S433.1 (2019).....	21
2.3.2.1.1	Pressões estáticas .....	21
2.3.2.1.2	Pressões dinâmicas .....	23
2.3.2.1.3	Cargas térmicas.....	24
2.3.2.2	Norma europeia (EUROCODE EN 1991-4:2006) .....	24
2.3.2.2.1	Restrições geométricas .....	24
2.3.2.2.2	Pressões devido à carga e descarga de silos .....	25
2.3.2.2.3	Propriedades dos sólidos .....	28
2.3.2.2.4	Cargas simétricas nas paredes verticais no carregamento .....	32
2.3.2.2.4	Cargas assimétricas nas paredes verticais no carregamento.....	34
2.3.2.2.5	Cargas simétricas nas paredes verticais no descarregamento.....	36
2.3.2.2.6	Cargas assimétricas nas paredes verticais no descarregamento .....	36
2.3.2.2.7	Cargas no fundo.....	38
2.3.2.2.8	Cargas térmicas.....	40
2.3.2.3	Norma ISO 11697:2012 .....	40
2.3.2.3.1	Pressões no carregamento e descarregamento.....	41
2.3.2.3.2	Pressões no fundo .....	44
2.3.2.4	Norma australiana.....	45
2.3.2.4.1	Classificações .....	45
2.3.2.4.2	Propriedades do sólido a granel.....	51
2.3.2.4.3	Classificação e combinação de carga .....	54
2.3.2.5	Norma brasileira .....	66
<b>2.3.3</b>	<b>Carregamento devido ao vento</b> .....	<b>66</b>
2.3.3.1	Velocidade característica do vento .....	67
2.3.3.2	Pressões externas e forças de arrasto .....	71
<b>2.3.4</b>	<b>Empuxo de terra na galeria</b> .....	<b>72</b>

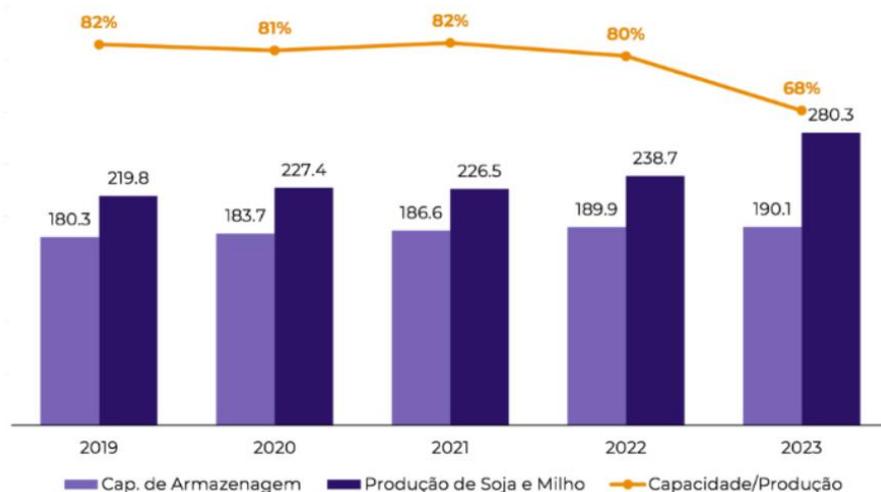
<b>2.3.5 Radier e estaqueamento .....</b>	<b>75</b>
2.2 COMBINAÇÕES UTILIZADAS .....	80
2.3 DIMENSIONAMENTO.....	82
<b>3           DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>95</b>
3. 1 CARACTERÍSTICAS DO SILO .....	95
3.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS EMPREGADO .....	96
3.3 CARREGAMENTOS E COMBINAÇÕES APLICADAS.....	96
<b>4           RESULTADOS .....</b>	<b>117</b>
<b>5           CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>135</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>137</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a agricultura vem cada vez mais ganhando força e aumentando sua produção. Segundo estimativas da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2022) esperava-se que a produção da safra de 2022/2023 aumentasse cerca de 15,8% em comparação à anterior, o equivalente a 43,2 milhões de toneladas de grãos colhidos, sendo a soja a maior responsável por esse crescimento. Segundo a Revista Cultivar (2023), o problema encontra-se no déficit de estocagem disponível, de quase 124,9 milhões de toneladas.

O crescimento da produção de grãos não é acompanhado pelo aumento da capacidade de estocagem, faltando silos e armazéns que permitam acondicionar o produto de maneira adequada por períodos longos de tempo. Na Figura 1, mostra-se que, ao longo dos últimos anos, a capacidade de armazenagem da produção foi de no máximo 82% do total produzido, sendo que no ano de 2023 essa capacidade caiu para menos de 70%.

Figura 1 - Capacidade de armazenagem de grãos *versus* produção de Soja e Milho



Fonte: Revista Cultivar, 2023.

Segundo Belani (2022), o processo de armazenagem representa uma adição de valor, sendo um componente essencial nos custos de produção e uma parte integrante da estratégia comercial. Conforme destaca Belani (2022), a falta de instalações de armazenagem durante a colheita, dependendo da região e do clima, pode resultar na impossibilidade de escoar a produção. Isso, por sua vez, acarreta danos como a deterioração da qualidade ou até mesmo a perda dos grãos.

As perdas pós-colheita, alcançando até 30% globalmente e 20% no Brasil entre a colheita e o armazenamento, são majoritariamente atribuídas à presença de contaminantes biológicos, físicos e químicos nas fases pré e pós-colheita, o que impacta em cerca de 10% da produção nacional (SENAR, 2018). O armazenamento apropriado não apenas preserva a qualidade, mas também oferece a vantagem estratégica de negociar grãos em períodos mais favoráveis, evitando pressões de mercado durante a colheita e ampliando a flexibilidade para buscar melhores preços (SENAR, 2018).

Das vantagens de se armazenar corretamente, Callil Jr. (2007, p.3) afirma que uma unidade armazenadora, tecnicamente projetada e bem conduzida, apresenta vantagens, como:

- Obtenção de um produto mais bem conservado, longe do ataque de insetos e ratos;
- Estocagem racional, segura e, principalmente, econômica, tendo em vista que o produtor que armazena a granel comercializa também a granel, economizando, com isso, gastos significativos com sacaria e mão-de-obra ocupada para o ensacamento;
- Economia do transporte, uma vez que os preços dos fretes aumentam durante o período da safra;
- Diminuição do custo do transporte, pela eliminação de impurezas e excesso de água pela secagem.
- Formação de um estoque regulador dos preços de mercado;
- Concentração de grandes quantidades de produto em áreas relativamente pequenas;
- Proteção da indústria contra as flutuações no preço das matérias-primas.

Tendo em vista os fatos mencionados, diante da certeza da importância da agricultura no Brasil e o déficit de armazenagem como revelado pela Conab, a construção de silos emerge como uma solução fundamental no impacto do preço de comercialização no mercado. A construção de silos e armazéns oferece não apenas construções duráveis, como também uma armazenagem segura para o grão, trazendo muitas vantagens econômicas. Representa hoje um investimento estratégico para os produtores ao permitir o armazenamento de grãos em épocas de baixo retorno. Armazenar os grãos não traz vantagens só ao produtor, mas também para as indústrias e consumidor ao garantir um abastecimento por preços condizentes, evitando oscilações de preço.

Segundo Calil (2007, p.11),

A diferença que existe entre os produtos armazenados e os fluidos, é que os produtos armazenados são capazes de transmitir tensões de atrito entre os grãos e nas paredes. Já os fluidos possuem somente o estado de tensão hidrostática. Esse fato muda consideravelmente as pressões exercidas nas paredes dos silos quando comparadas com os fluidos.

É importante destacar que o principal carregamento atuante em um silo é a pressão exercida pelo grão armazenado, cuja determinação é um processo complexo. As propriedades

do grão são influenciadas por uma variedade de fatores, sendo que os abordados mundialmente, conforme destaca Calil (2007), são o peso específico, compactação, compressibilidade, tamanho das partículas, ângulo de repouso, degradação, corrosão e abrasão. Como resultado dessa complexidade, foram estabelecidas normas nacionais e internacionais para levar em conta as múltiplas variáveis envolvidas.

Contudo, a norma brasileira NBR 17066 (2022) remete o cálculo das pressões a diferentes normas internacionais, a depender do tipo de grão, silo e fluxo de descarga. Conseqüentemente, consultar as diversas normas disponíveis é crucial para contemplar as distintas possibilidades de resultados, assegurando um dimensionamento preciso e em conformidade com rigorosos padrões de segurança. Com esse propósito, este trabalho se destina a explorar as principais normas nacionais e internacionais para a determinação das pressões exercidas pelo grão em um silo circular de concreto, comparando os valores encontrados.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista que o Brasil é um grande produtor de grãos, surge a necessidade de armazenagem de grãos por períodos maiores e em condições adequadas para o posterior consumo. O concreto armado é uma alternativa de construção que ganha forças nesse cenário. Para tal tipo construtivo, é essencial uma avaliação dos principais carregamentos atuantes em silos, como as cargas exercidas pelos grãos. Atualmente, a norma brasileira NBR 17066 (2022) é a norma nacional responsável por descrever as principais ações em um silo, no entanto, ela prescreve o uso de normas estrangeiras para essa avaliação.

Uma vez que a normativa brasileira que refere-se a ações em silos, a NBR 17066 (2022), prescreve normas estrangeiras para a análise das pressões que atuam em silos, o presente trabalho busca fazer uma análise das principais diferenças entre as normas estrangeiras existentes como a ANSI S 4331 (ASAE, 2019), EN 1991-4 (EUROCODE, 2006), AS 3774 (2016) e ISO 11697 (ISO, 2012), elencando os principais pontos de análise de pressões em silos, como as pressões de carregamento, descarregamento e pressões locais geradas por cargas e descargas assimétricas.

Além disso, não há uma normativa brasileira específica para o dimensionamento de silos de concreto armado. Portanto, tendo em vista a necessidade de dimensionamento de estrutura desse tipo, busca-se avaliar as principais considerações de dimensionamento presentes em bibliografias e normas estrangeiras que se referem ao assunto.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Geral

Analisar, de acordo com normativas estrangeiras e prescrições brasileiras, as pressões exercidas pelos grãos em um silo e dimensionar uma estrutura em concreto armado para a armazenagem de grãos.

### 1.2.2 Específicos

- Realizar uma análise gráfica dos resultados das principais diferenças encontradas entre essas normas;

- Revisar bibliografias nacionais e normas estrangeiras para o dimensionamento de silos em concreto armado;

- Dimensionar as paredes, viga, laje e galeria de uma estrutura de concreto armado para armazenagem de grãos de acordo com o recomendado pela normativa brasileira para a consideração dos grãos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SILOS

De acordo com Calil Junior & Cheung (2007, p.3), a origem do termo silo vem:

A palavra silo tem sua raiz grega “sirus” que significa lugar escuro-cavernoso. Nos dias atuais, o significado da palavra silo é de um grande depósito para armazenar cereais, forragens, etc. Define-se silo como construção destinada a armazenar e conservar qualquer produto industrial ou agrícola.

O armazenamento de produtos em silos é considerado uma solução de grande viabilidade devido à economia de espaço físico, mão de obra e custo de transporte, assim como a possibilidade de conservação do produto ensilado, (CALIL JUNIOR; CHEUNG, 2007).

Os silos são constituídos de diversas partes, sendo elas o corpo, a cobertura e o fundo, que pode se apresentar de diversas formas: plano, cônico ou tronco-piramidal; já o corpo pode ser dividido em mais de uma célula. A partir de aberturas no topo e no fundo dessas células é que o grão é carregado e descarregado, respectivamente. Além disso, o descarregamento pode se dar por gravidade ou com o auxílio de equipamentos mecânicos ou pneumáticos, (FANK, 2017).

Na descarga de grãos, é essencial manter um fluxo uniforme e evitar sobrecargas que possam comprometer a estrutura do silo. Para isso, os registros localizados na base dos silos de fundo plano são estrategicamente projetados com uma ordem de abertura específica. Inicialmente, a abertura central é acionada, permitindo que o fluxo de grãos comece de maneira equilibrada até que o fluxo de descarga por gravidade termine. Posteriormente, as aberturas mais laterais são abertas, garantindo que a descarga continue de forma simétrica, distribuindo o peso de maneira uniforme (Kepler Weber, 2020). Essa preocupação demonstrada por um dos fabricantes deve-se ao fato de que excentricidades de descarga tendem a causar sobrepressões horizontais nas laterais do silo, provocando danos caso não tenham sido corretamente previstas.

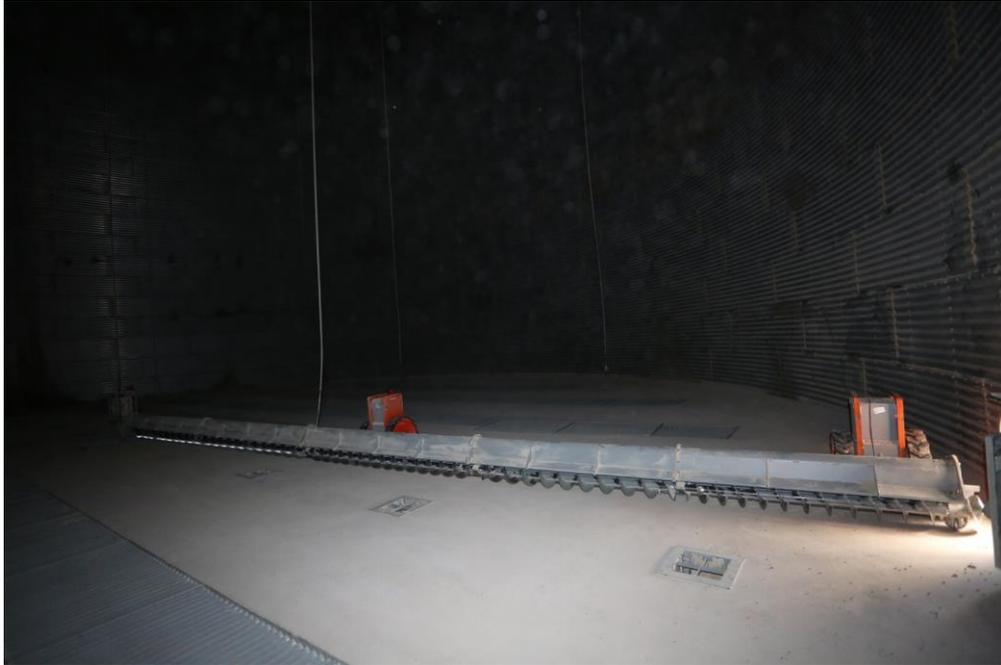
Essas aberturas direcionam os grãos para túneis que os conduzem ao seu destino final, seja para processamento em instalações de beneficiamento ou para os silos de expedição, onde serão preparados para o transporte e distribuição. Esse transporte é realizado por tubulações, por gravidade ou por equipamentos mecânicos diversos.

O grão que ainda fica na parte do fundo do silo, que não é descarregado através da abertura dos registros de descarga, é transportado até eles com auxílio de equipamentos

mecânicos, sendo um dos principais a rosca varredora conforme Figura 2. Segundo a empresa KEPLER WEBER (n.p):

“A Rosca Varredora é um dispositivo que auxilia na descarga dos silos. O equipamento faz uma varredura no fundo dos silos, transportando os grãos para os registros de descarga. A utilização de roscas varredoras evita a necessidade de entrada de pessoas nos silos durante a operação, tornando o processo mais seguro e efetivo.”

Figura 2 - Rosca Varredora

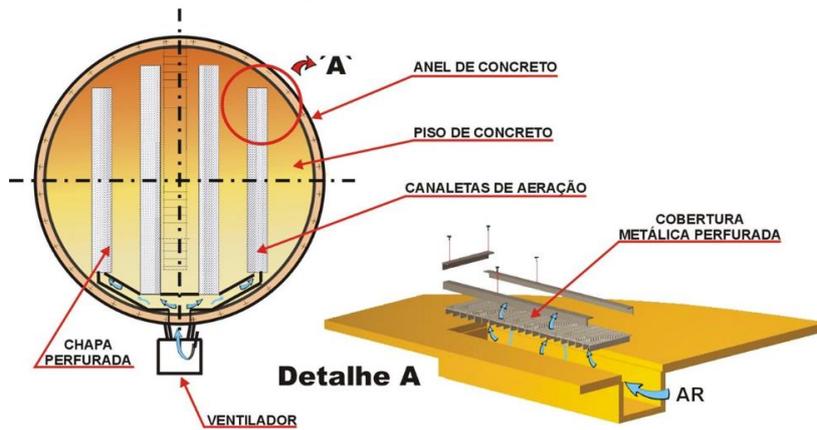


Fonte: Kepler Weber (Disponível em: <https://www.kepler.com.br/produtos/rosca-varredora/rosca-varredora>)

As roscas contam com auxílio de tratores de avanço, que são responsáveis pela movimentação da rosca ao longo do perímetro do silo, fazendo com que todo grão armazenado na circunferência seja transportado para os registros centrais.

Ainda, dada a necessidade de conservar os grãos, os silos geralmente contam como um sistema de aeração que consiste em ventiladores e canais que transportam o ar e o forçam a passar pela massa de grãos, garantindo uma boa conservação do produto por mais tempo, pois garante condições ideais de temperatura e umidade. Esse sistema é constituído de canaletas ou canais de aeração, localizadas na base do silo, que geralmente possuem em seu topo uma cobertura metálica perfurada, além de um ou mais ventiladores centrífugos (Kepler Weber, 2020), como pode ser visto do desenho esquemático da Figura 3 e em um exemplo real na Figura 4.

Figura 3 - Sistema de aeração



Fonte: Kepler Weber.

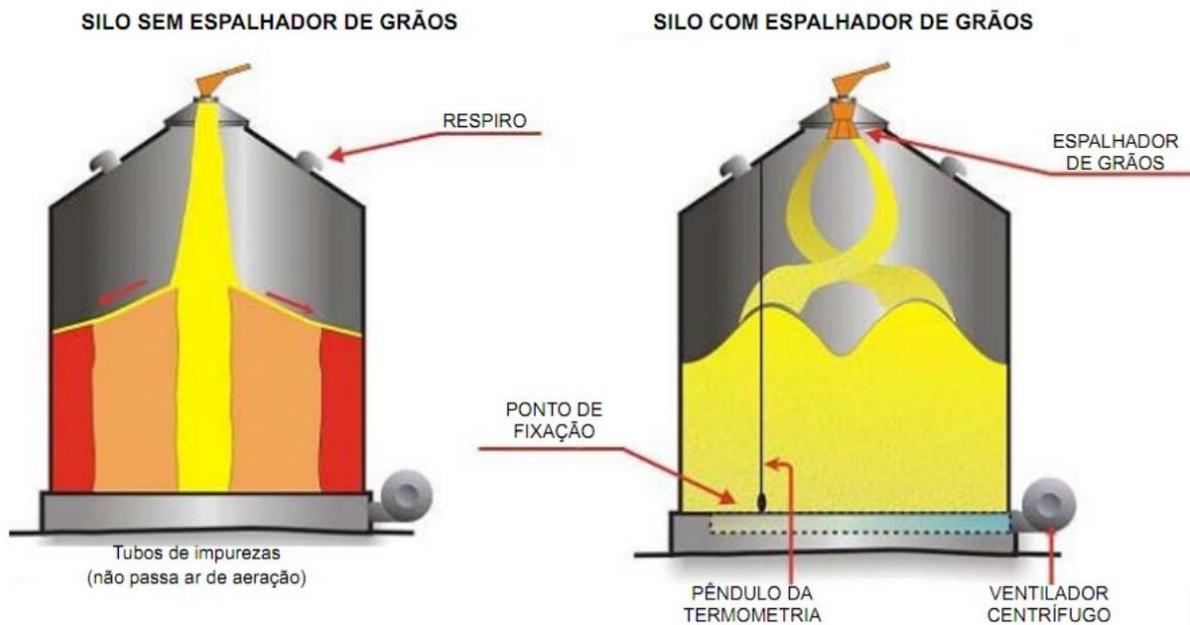
Figura 4 - Construção de canaletas de aeração



Fonte: GEHRKE (2023).

Ainda, para um carregamento uniforme e homogêneo, os silos podem contar com um espalhador de grãos no seu topo, evitando concentração de impurezas em pontos isolados e acúmulo de resíduos finos nas regiões onde se formam os taludes de grãos (Kepler Weber, 2020), como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Espalhador de grãos no topo do silo



Fonte: Kepler Weber (2020).

Compreender as diferentes partes de um silo e seu funcionamento é primordial para iniciar o projeto de qualquer estrutura e determinar todos os esforços solicitantes exercidos sobre ela. Esse processo estabelece um grande desafio no projeto de silos dada a complexidade na determinação de cargas induzidas por sólidos (grãos) nas paredes e nas partes internas dessa estrutura. Um erro muito comum cometido por projetistas é pressupor que os sólidos a granel se comportam da mesma forma que um líquido em fluxo, o que não configura a realidade, pois partículas sólidas podem gerar tensões de cisalhamento entre si e contra as paredes de um silo. Além disso, os sólidos a granel podem formar arcos devido ao seu empilhamento, interrompendo o fluxo, um fenômeno que não ocorreria em um fluxo de um líquido (CARSON; CRAIG, 2015).

Diante dos fatos mencionados e devido à complexidade de estabelecer tais cargas, surgiram em todo mundo diversas normas relacionadas ao dimensionamento de silos. Entre elas, destacam-se a norma americana (ANSI ASAE S433.1 (2019), europeia (EN 1991-4-2006 (2006)), australiana (AS 3774 (2016)), ISO (ISO 11697 (2011)) e brasileira (NBR 17066 (2022)), que serão abordadas neste estudo. É importante conhecer as peculiaridades de cada uma e como cada uma abrange a pressão do grão dentro de um silo.

A norma europeia EN1991-4:2006 divide os silos em classes de ação de acordo com a sua complexidade e tamanho, bem como classifica os silos de acordo com a relação entre a altura da base do silo até o centroide da pilha de grãos e o diâmetro do mesmo. Essas

classificações configuram diferentes características de carga. A norma europeia configura-se como o primeiro código a identificar condições diferentes e estipular diretrizes de como tratá-las para o dimensionamento, além disso ela traz consigo propriedades de diferentes tipos de material, como, por exemplo, o coeficiente de atrito entre a parede e o sólido armazenado, a densidade a granel e a taxa de pressão lateral. Além disso, a norma europeia é a primeira a estabelecer normativas para cargas excêntricas, responsáveis por causar mais falhas do que qualquer outra condição (CARSON; CRAIG, 2015).

A norma americana ANSI/ASAE S433.1 (2019), por sua vez, abrange silos que armazenam grãos de fluxo livre, além de ser limitada a um tipo de descarga chamada de fluxo em funil, ou seja, um fluxo em que determinada parte do material encontra-se estacionário enquanto o restante está em movimento, além de afirmar que este fluxo ocorrerá, normalmente, para relações  $h/d$  menores que 2, onde  $h$  é altura efetiva do silo, distância entre o ponto mais baixo da descarga até  $\frac{1}{3}$  da altura do chapéu (cobertura) do silo. Vale lembrar que a aplicação da norma americana é limitada a silos que são carregados e descarregados de maneira centrada, não incluindo em seu escopo cargas excêntricas, nem mesmo as pressões geradas pelo impacto do grão no carregamento e descarregamento simétrico (CARSON; CRAIG, 2015).

A norma australiana AS 3774 (2016) estipula valores característicos superiores e inferiores dos parâmetros de materiais e, diferentemente da norma europeia, não há classificação por classes de ação, mas sim por tipo de carga: cargas permanentes, de serviço, ambientais e acidentais. Além disso, essa norma estipula o tipo de combinação de carga que deve ser considerada, além de fazer uma série de classificações, como, por exemplo, o modo de fluxo, a rugosidade das paredes, configurações da saída de descarga, parâmetros geométricos, entre outros.

A norma ISO 11697 (2012) estipula equações para estabelecer as pressões exercidas pelo grão no carregamento e descarregamento, como a pressão de atrito na parede, a pressão horizontal e a vertical dependem de características do grão como a sua densidade, coeficiente de proporção entre as pressões horizontais e verticais, coeficiente de atrito do grão com a parede e um fator multiplicado a fim de serem consideradas as perturbações no estado de tensão elástico. Além disso, a norma também considera pressões assimétricas devido à heterogeneidade do material e pressões assimétricas devido a descargas excêntricas, que ocasionam momentos fletores nas paredes. Já a pressão no fundo é majorada a fim de prevenir cargas de impacto de grãos durante o enchimento, bem como cargas dinâmicas devido a incertezas de fluxo.

### 2.3.1 Peso próprio

O peso próprio de uma estrutura é considerado como uma carga permanente, ou seja, é a carga que a própria estrutura exerce sobre si mesma devido à influência da gravidade. Essa carga está diretamente relacionada ao tipo de material empregado e dimensões dos elementos. Portanto, a quantidade de material usada para a construção de um silo e o tipo de material empregado determinam o peso próprio da estrutura.

Em um silo, é importante destacar que as cargas permanentes não se limitam apenas ao peso do material sob a influência da gravidade. Existem outras cargas permanentes que permanecem exercendo sua influência durante toda vida útil da construção, como é o caso do peso de escadas, passarelas e equipamentos instalados no silo. Ao contrário do peso próprio, que pode ser facilmente estimado pelo projetista, os pesos adicionais devido a esses equipamentos podem não ser tão facilmente indicados, recaindo aos fabricantes a responsabilidade dessa informação. Esses carregamentos podem ser uniformemente distribuídos e outros pontuais.

### 2.3.2 Pressão de grãos nas paredes e fundo

#### 2.3.2.1 Norma americana ANSI/ASAE S433.1 (2019)

##### 2.3.2.1.1 Pressões estáticas

A norma brasileira NBR 17066 (ABNT, 2022) sugere a norma americana ANSI S 4331 (ASAE, 2019) quando o fluxo de grãos em um silo não for contínuo, ou seja, não for de massa, o cálculo dessas pressões deverá seguir as diretrizes da norma americana, garantindo que o projeto e a posterior construção atendam padrões de segurança. A norma americana define as pressões estáticas conforme Equações 1, 2 e 3, sendo a Equação 1 a pressão vertical, 2 a horizontal e a 3 a pressão vertical de atrito.

$$P_v(y) = \frac{W \times R \times G}{\mu \times K} \left[ 1 - e^{-\frac{\mu \times K \times y}{R}} \right] \quad (1)$$

$$P_h(y) = K * P_v(y) \quad (2)$$

$$P_w(y) = \mu * P_h(y) \quad (3)$$

Onde:

$P_v(y)$  é a pressão vertical ao longo da direção vertical (Y), em kPa

$P_h(y)$  é a pressão horizontal ao longo da direção vertical (Y), em kPa

$P_w(y)$  é a pressão de atrito ao longo da direção vertical (Y), em kPa

W é o peso específico do grão em Kg/m<sup>3</sup>

R é o raio hidráulico do silo (área/perímetro);

G é a constante da gravidade 0,0098 kN/kg;

$\mu$  é o coeficiente de atrito do grão com a parede;

k é o coeficiente de proporção entre as pressões laterais e verticais;

Y é a altura equivalente do grão dada pela Equação (4)

$$Y = H_c + 1/3 H_{cone} \quad (4)$$

Onde:

$H_c$  é a altura do corpo do silo

$H_{cone}$  é a altura do chapéu do silo

Conforme as ponderações da norma ANSI S 4331 (ASAE, 2019, p.3), para qualquer grão de fluxo livre, deve-se considerar um peso específico de 834 kg/m<sup>3</sup>. Já as propriedades como o coeficiente de atrito do material com a parede ( $\mu$ ), o coeficiente de proporção entre as pressões laterais e verticais (k) e o fator de pressão adimensional (F) podem ser obtidas através do Quadro 1.

Quadro 1 - Coeficientes de proporção de acordo com o material.

<b>Material da Parede do Silo</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b>k</b>	<b>F</b>
Aço	0,3	0,5	1,4
Concreto	0,4 *	0,5 *	1,4 *
Aço Corrugado	0,37	0,5	1,4
* Obtida da norma ACI 313-16 é uma norma publicada pelo American Concrete Institute (Instituto Americano do Concreto).			

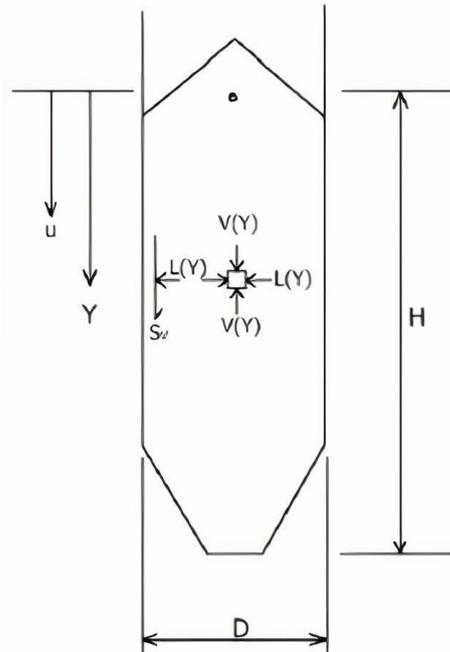
Fonte: ANSI S 4331 (ASAE, 2019, p.4)

### 2.3.2.1.2 Pressões dinâmicas

A Equação 5 é utilizada para prever as pressões da parede lateral para silos de fluxo em funil, que assim é admitida desde que apresente relações  $\frac{H}{d}$  inferiores a 2, sendo H a altura medida entre o ponto mais baixo da descarga do silo até o topo da superfície do grão. Ainda, a norma americana ANSI S 4331 (ASAE, 2019, p.4), diz que, se houver uma superfície cônica no topo, se deve considerar até  $\frac{1}{3}$  da altura do cone, conforme Figura 6. Já se a relação  $\frac{H}{d}$  for maior que 2, pode acontecer o chamado fluxo de massa ou “plug”, devendo-se majorar a Equação 2 pelo fator F dado no Quadro 1.

Ainda, a norma ANSI S 4331 (ASAE, 2019, p.4) frisa que, em silos de fundo plano que descarregam por fluxo de massa, é possível reduzir o fator de sobrepressão a uma distância  $\frac{D}{4}$  da base, devendo-se interpolar o fator de sobrepressão entre o valor obtido no Quadro 1 em uma altura de  $\frac{D}{4}$  e 1 na base do silo.

Figura 6 - Dimensões do compartimento.



Fonte: ANSI S 4331 (ASAE, 2019, p.4)

A componente das cargas verticais de atrito na parede, a uma profundidade Y, associada às pressões dinâmicas, por unidade de comprimento, pode ser determinada utilizando a Equação 5:

$$P_w(y) = [W \times Y \times G - P_v(y)] * R \quad (5)$$

Onde:

$W$  é o peso específico do grão

$R$  é o raio hidráulico do silo (área/perímetro);

$G$  é a constante da gravidade 0,0098 kN/kg;

$P_v(y)$  é a pressão vertical ao longo da direção vertical ( $y$ ), conforme Equação 1.

Já as pressões verticais no fundo dos silos de fundo plano podem ser obtidas através da Equação 1.

### 2.3.2.1.3 Cargas térmicas

Segundo a norma ANSI S 4331 (ASAE, 2019), os incrementos de pressões horizontais devido a variações de temperatura devem ser de 8% da carga estática quando acontecer uma queda de temperatura de 10 °C/hora e 15% da carga estática em quedas de 20 °C/hora.

### 2.3.2.2 Norma europeia (EUROCODE EN 1991-4:2006)

#### 2.3.2.2.1 Restrições geométricas

A seção quatro da norma europeia EN 1991-4 (EUROCODE, 2006) trata das forças que atuam nas estruturas de silos e tanques. Nesse contexto, são definidas restrições geométricas para os materiais sólidos. Entre essas diretrizes e restrições, destacam-se:

1. Os formatos das seções transversais do silo estão restritos aos indicados na norma, embora pequenas variações possam ser aceitas, desde que sejam consideradas as implicações estruturais das alterações de pressão resultantes.
2. Limitações dimensionais aplicáveis:

1.  $\frac{h_b}{d_c} < 10$

2.  $h_b < 100m$

3.  $d_c < 60m$

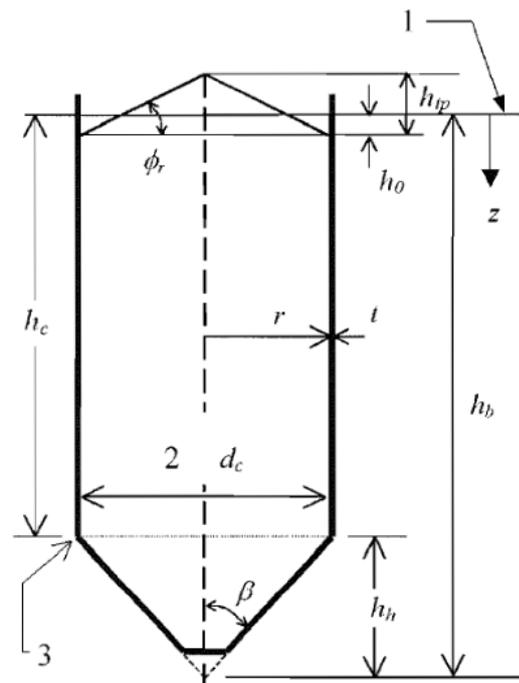
Onde:

$h_b$  é a altura dada entre o ápice da tremonha até a superfície equivalente (conforme Figura 7)

$d_c$  é o diâmetro interno.

1. É necessário que o sólido armazenado flua livremente ou que seja assegurado que o sólido armazenado esteja livremente contido no recipiente do silo.
2. O diâmetro máximo das partículas do sólido armazenado não deve exceder  $0,03d_c$ .
3. A norma abrange exclusivamente tremonhas cônicas (ou seja, assimétricas), quadradas piramidais ou em forma de cunha (com paredes verticais nas extremidades). Outros formatos de tremonhas e aquelas com partes internas requerem considerações especiais.

Figura 7 - Geometria do silo.



Fonte: EUROCODE EN 1991-4 (2006, p. 9)

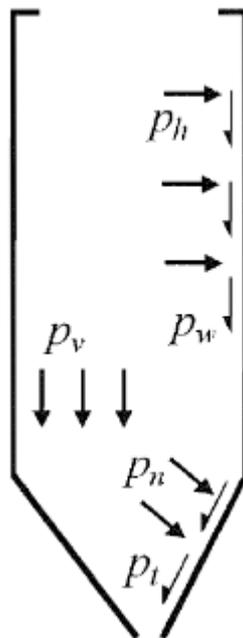
### 2.3.2.2 Pressões devido à carga e descarga de silos

Segundo a norma EN 1991-4 (EUROCODE, 2006), as ações que atuam em silos devem ser determinadas levando em consideração a estrutura do silo, as propriedades dos sólidos armazenados e os padrões de descarga que surgem no descarregamento. As cargas nas paredes verticais dos silos, resultantes de processos de enchimento e descarga com pequenas excentricidades, devem ser modeladas como uma carga simétrica e uma carga adicional assimétrica. Já quando ocorrem excentricidades mais significativas, as pressões devem ser

representadas por distribuições assimétricas de cargas. Além disso, a referida norma estipula que as ações previstas correspondem a valores que possuem uma probabilidade de 2% de serem ultrapassados no período de 1 ano.

No que diz respeito ao carregamento, a norma frisa que cargas simétricas em silos devem ser expressas em termos de uma pressão horizontal  $P_h$  na superfície interna da parede vertical do silo, uma pressão normal  $P_n$  em uma parede inclinada, pressões de atrito tangencial nas paredes  $P_w$  e  $P_t$  e uma pressão vertical, conforme Figura 8.

Figura 8 - Pressões e trações conforme a norma EN 1991-4 (2006)



Fonte: EUROCODE EN 1991-4:2006.

Pressões assimétricas nas paredes verticais de silos, decorrentes de pequenas excentricidades no processo de enchimento e descarga, devem ser representadas por uma carga adicional. Essas cargas devem ser expressas em termos de uma pressão horizontal local ( $P_h$ ) na superfície interna do silo. No caso de excentricidades mais significativas, as pressões assimétricas nas paredes verticais devem ser modeladas por distribuições assimétricas de pressão horizontal ( $P_h$ ) e atrito na parede ( $P_w$ ).

Para avaliações das ações, a norma EN 1991-4 (EUROCODE, 2006) define diferentes níveis de rigor a depender da confiabilidade do arranjo estrutural e suscetibilidade a diferentes modos de falha. Essas classes de avaliação de ações podem ser vistas abaixo.

1. Classe 1: capacidade <100 toneladas (2000 sacos de 50 kg).

2. Classe 2: Capacidades compreendidas entre a classe 1 e a classe 3.
3. Classe 3: Capacidade > 10.000 toneladas ou, capacidade >1000 toneladas desde que:
  - A. Excentricidade de descarga  $\frac{e_o}{d_c} > 0,25$

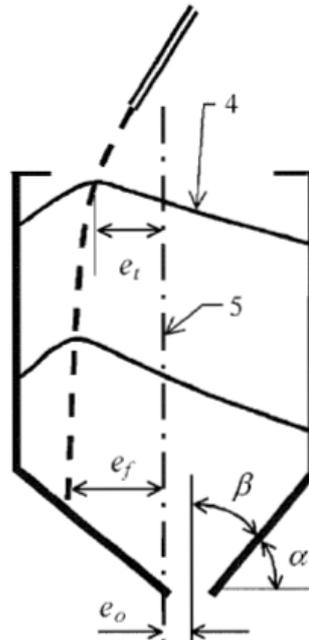
B. Silos baixo com excentricidade de carregamento > 0,25

Vale ressaltar que para classes de avaliação de ação 1 disposições simplificadas da norma podem ser usadas. Além disso, as classes de avaliação de um silo devem ser determinadas pelas condições de uma unidade individual e não por uma bateria de silos.

Para os cálculos, o peso específico do grão deverá ser considerado o máximo, além de serem avaliadas, em conjunto, diferentes valores das propriedades dos sólidos  $\phi_i$ ,  $K$  e  $\mu$ , que são, respectivamente, o ângulo de atrito interno, a razão de pressão lateral e o coeficiente de atrito com a parede. A norma EN 1991-4 (EUROCODE, 2006) estipula que para silos pertencentes à Classe 1 podem ser admitidos com base em um único valor para o coeficiente médio de atrito ( $\mu_m$ ), a razão média de pressão lateral ( $K_m$ ) e o ângulo médio de atrito interno ( $\phi_{im}$ ) para o grão armazenado.

Se a trajetória de um sólido ao cair em um silo leva a uma pilha excêntrica, diferentes densidades de empacotamento se formam em diferentes partes do silo, formando pressões assimétricas. Um exemplo dessa pilha excêntrica pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Excentricidade gerada pelo carregamento excêntrico.

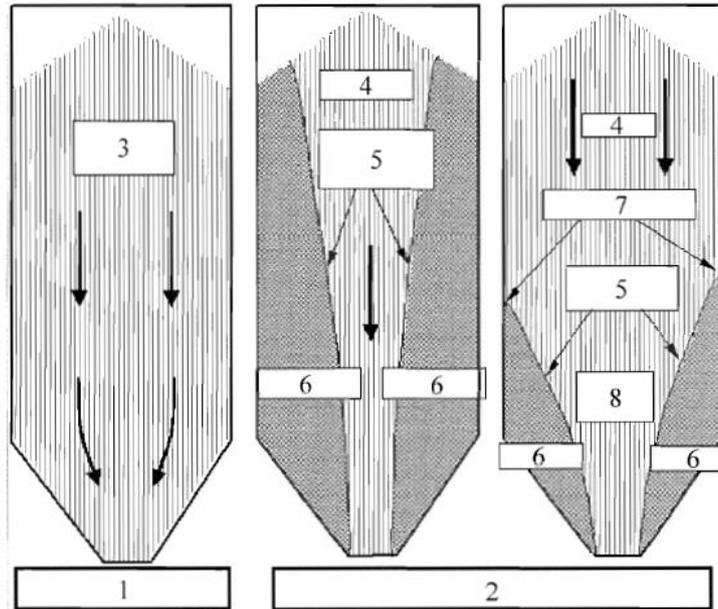


Fonte: EUROCODE EN 1991-4:2006

Um projeto deve contemplar distintos padrões de fluxo durante a descarga, conforme ilustrado na Figura 10. No primeiro quadro, nota-se uma representação de um fluxo de massa,

em que todos os sólidos estão em movimento. Já no segundo quadro, observa-se um tipo de fluxo em funil, onde nas regiões 4 há movimento, as regiões 5 são consideradas os limites do canal de fluxo, os sólidos na região 6 estão imóveis, na região 7 encontram-se as áreas de transição efetiva, e a região 8 é denominada canal de fluxo.

Figura 10 - Tipos de fluxo



Fonte: EUROCODE EN 1991-4:2006.

### 2.3.2.2.3 Propriedades dos sólidos

Para silos classificados como pertencentes às classes 1 ou 2, é possível obter os parâmetros das propriedades dos sólidos a partir de uma tabela especificada pela norma EN 1991-4 (EUROCODE, 2006). Esses valores correspondem ao peso característico, que é superior ao peso unitário, entretanto, os valores de  $\mu$ ,  $K_m$  e  $\phi_i$  são médios. Para a determinação dos valores característicos, é necessário multiplicar e dividir os fatores  $\mu$ ,  $K_m$  e  $\phi_i$  pelos fatores de conversão indicados no Quadro 2 ( $a_\phi, a_k$  e  $a_u$ ). Conseqüentemente, as cargas máximas, dadas pela multiplicação entre os valores médios e os fatores de conversão, devem ser empregadas para a obtenção das cargas atuantes. No caso de silos classificados como classe 1, é possível utilizar os valores médios em vez dos valores característicos.

Para silos de classe 3, as propriedades dos sólidos devem ser obtidas através de testes que levem em consideração fatores como composição, classificação, teor de umidade, temperatura, idade e carga elétrica, devido ao manuseio e método de produção. Vale lembrar

que, para determinar o coeficiente de atrito da parede, se faz necessário classificar a classe da parede do silo conforme descrito em norma e mostrado no Quadro 3.

Quadro 2 - Fatores de conversão

(continua)

Tipo de sólido	Peso Específico		Ângulo de repouso	Ângulo de atrito interno		Razão de pressão lateral K		Coeficiente de atrito da parede				Fator de referência para pressão local $C_{op}$
	$\gamma_l$	$\gamma_u$		$\phi_r$	$\phi_{im}$	$a_\phi$	$K_m$	$a_k$	D1	D2	D3	
	Inf.	Sup.		Méd.	Fator	Méd.	Fator	Méd.	Méd.	Méd.	Fator	
Material padrão	6	22	40	35	1,3	0,5	1,5	0,32	0,39	0,5	1,4	1
Agregado	17	18	36	31	1,16	0,52	1,15	0,39	0,49	0,59	1,12	0,4
Alumínio	10	12	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5
Mistura de ração animal	5	6	39	36	1,08	0,45	1,10	0,22	0,30	0,43	1,28	1,0
Pallets de ração animal	6,5	8	37	35	1,06	0,47	1,07	0,23	0,28	0,37	1,20	0,7
Cevada	7	8	31	28	1,14	0,59	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,5
Cimento	13	16	36	30	1,22	0,54	1,2	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5
Clínquer de cimento	15	18	47	40	1,20	0,38	1,31	0,46	0,56	0,62	1,07	0,7
Carvão	7	10	36	31	1,16	0,52	1,15	0,44	0,49	0,59	1,12	0,6
Carvão em pó	6	8	34	27	1,16	0,58	1,20	0,41	0,51	0,56	1,07	0,5

Quadro 2 - Fatores de conversão

(conclusão)

Carvão Mineral	6,5	8	36	31	1,06	0,52	1,15	0,49	0,54	0,59	1,12	0,6
Clarão	8	15	41	35	1,16	0,46	1,20	0,51	0,62	0,72	1,07	0,5
Farinha	6,5	7	45	42	1,06	0,36	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,6
Pelotas de minério de ferro	19	22	36	31	1,16	0,52	1,15	0,49	0,54	0,59	1,12	0,5
Limão hidratado	6	8	34	27	1,26	0,58	1,20	0,36	0,41	0,51	1,07	0,6
Pó de calcário	11	13	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,51	0,56	1,07	0,5
Milho	7	8	35	31	1,14	0,53	1,14	0,22	0,36	0,53	1,24	0,9
Fosfato	16	22	34	29	1,18	0,56	1,15	0,39	0,49	0,54	1,12	0,5
Batatas	6,0	8,0	34	30	1,12	0,54	1,11	0,33	0,38	0,48	1,16	0,5
Areia	14	16	39	36	1,09	0,45	1,11	0,38	0,48	0,57	1,16	0,4
Clínquer de escória	10,5	12	39	36	1,09	0,45	1,11	0,48	0,57	0,67	1,16	0,6
Grãos de soja	7	8	29	25	1,16	0,63	1,11	0,24	0,38	0,48	1,16	0,5
Açúcar*	8,0	9,5	38	32	1,19	0,5	1,2	0,46	0,51	0,56	1,07	0,4
Pelotas de beterraba sacarina	6,5	7	36	31	1,16	0,52	1,15	0,35	0,44	0,54	1,12	0,5
Trigo	7,5	9	34	30	1,12	0,54	1,11	0,24	0,38	0,57	1,16	0,5

Fonte: Adaptado de EUROCODE EN 1991-4:2006.

Quadro 3 - Definição da superfície das paredes.

<b>Categoria</b>	<b>Título Descritivo</b>	<b>Materiais Típicos</b>
D1	Atrito pequeno “Escorregadio”	Aço inoxidável Alumínio polido Superfície revestida projetada para atrito pequeno
D2	Atrito moderado “Liso”	Aço Carbono Liso (soldado ou parafusado) Aço carbono galvanizado Alumínio Oxidado
D3	Atrito grande “Áspero”	Concreto desenhado ou concreto envelhecido (corroído) Aço resistente à abrasão Azulejos cerâmicos
D4	Irregular	Parede horizontalmente onduladas Paredes com grandes anomalias

Fonte: Adaptado de EUROCODE EN 1991-4:2006.

#### 2.3.2.2.4 Cargas simétricas nas paredes verticais no carregamento

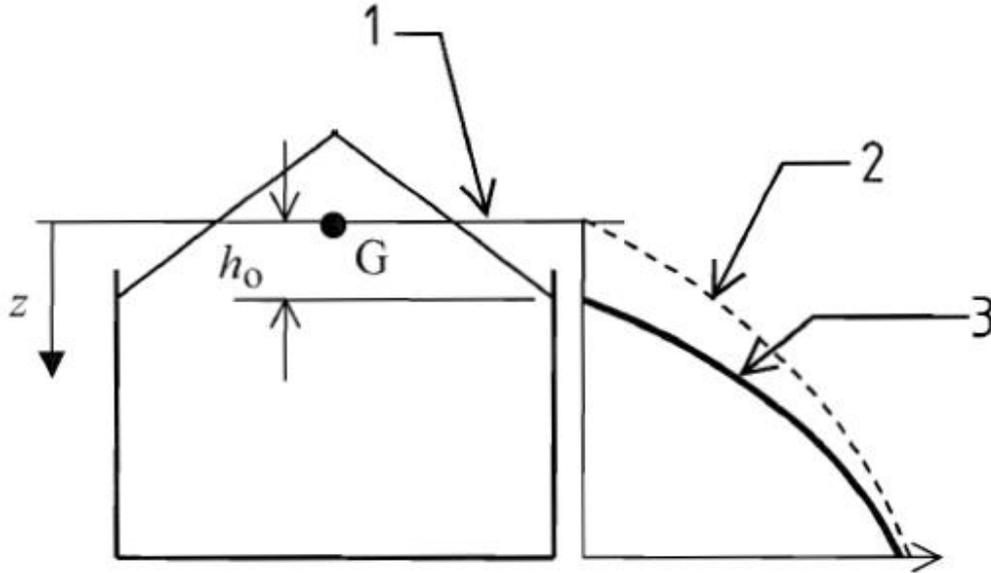
As cargas nas paredes verticais devem apresentar valores característicos de enchimento e descarga para os diferentes tipos de silos sendo eles: silos esbeltos, silos de esbeltez intermediária, silos baixos e silo de retenção (galpões graneleiros). As cargas verticais serão avaliadas conforme esbeltez do silo de acordo com as restrições geométricas descritas na norma:

1. Silos esbeltos, onde  $\frac{h_c}{d_c} \geq 2$
2. Silos de esbeltez intermediária, onde,  $1 < \frac{h_c}{d_c} < 2$
3. Silos baixos, onde  $0,4 < \frac{h_c}{d_c} \leq 1$
4. Silos de retenção, onde  $0,4 \leq \frac{h_c}{d_c}$

As cargas na parede de um silo são compostas por uma carga uniforme, denominada simétrica e uma carga assimétrica (*patch*) que deve atuar simultaneamente. A carga simétrica de enchimento deverá ser calculada pelas Equações dadas entre 6 e 12, conforme pode ser visto na Figura 11, onde a linha 1 representa a superfície equivalente, 2 a regra dos silos de esbeltez intermediária e 3 de silos baixos. Os valores da pressão horizontal ( $p_{hf}$ ), tração de atrito na

parede ( $p_{wf}$ ) e pressão vertical ( $p_{vf}$ ) para silos baixos e medianamente esbeltos, em qualquer profundidade após o enchimento, devem ser calculadas por:

Figura 11 - Pressões de enchimento simétricas no segmento de parede vertical



Fonte: EUROCODE EN 1991-4:2006.

$$p_{hf} = p_{ho} \times Y_R \quad (6)$$

$$p_{wf} = \mu \times p_{hf} \quad (7)$$

Onde:

$$p_{ho}(z) = \gamma \times K \times z_o = \gamma \times \frac{1}{\mu} \times \frac{A}{U} \quad (8)$$

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

$$Y_R = \left( 1 - \left\{ \left( \frac{z' - h_0}{z_o - h_0} \right) + 1 \right\}^n \right) \quad (10)$$

$$n = -(1 + \tan \phi_r) \left( 1 - \frac{h_0}{z_o} \right) \quad (11)$$

Onde:

$h_0$  é o valor de  $z$  no contato mais alto com a parede sólida, em metros.

Sendo que, para silos circulares,  $h_0$  é dado por:

$$h_0 = \frac{r}{3} \tan \phi_r \quad (12)$$

Onde:

$\gamma$  é o valor característico do peso unitário, em  $\text{kN/m}^3$ ;

$\mu$  é o valor característico do coeficiente de atrito da parede para deslizamento sólido na parede vertical;

$K$  é o valor característico da razão de pressão lateral;

$Z$  é a profundidade abaixo da superfície equivalente do sólido, em metros;

$A$  é a área da seção transversal plana do silo, em metros quadrados;

$U$  é o perímetro interno da seção transversal plana do silo, em metros;

$\phi_r$  é o ângulo de repouso do sólido, em graus (Quadro 2).

Já o valor da pressão vertical, em qualquer profundidade, deve ser representado por:

$$p_{vf} = \gamma z_V \quad (13)$$

Onde:

$$z_V = h_0 - \frac{1}{(n+1)} \left( z_0 - h_0 - \frac{(z + z_0 - 2h_0)^{n+1}}{(z_0 - h_0)^n} \right) \quad (14)$$

$z_V$  representa a parcela simétrica de pressões no topo da tremonha.

A carga vertical ( $n_{zsk}$ ) de compressão na parede por unidade de comprimento, em uma profundidade  $z$ , é dada por:

$$n_{zsk} = \mu p_{ho} (z - z_V) \quad (15)$$

Onde:

$\mu$  é o valor característico do coeficiente de atrito da parede para deslizamento sólido na parede vertical;

$p_{ho}$  é a pressão horizontal inicial, dado em (8);

$z$  é a profundidade abaixo da superfície equivalente do sólido, em metros;

$z_V$  representa a parcela simétrica de pressões no topo da tremonha dado em (14).

#### 2.3.2.2.4 Cargas assimétricas nas paredes verticais no carregamento

Segundo a norma EN 1991-4 (EUROCODE, 2006), para silos baixos, em todas classes de ações e silos medianamente esbeltos de classe de avaliação 1 as cargas locais (“*patch*”) não precisam ser consideradas ( $C_{pf} = 0$ ). Já para silos de esbeltez intermediária, com classe de avaliação 2 ou 3, a magnitude da carga local deve ser determinada através da Equação 16.

$$p_{pf} = C_{pf} p_{hf} \quad (16)$$

Onde:

$$C_{pf} = 0,21 C_{op} [1 + 2E^2] (1 - e^{\{-1,5[(h_c/d_c)-1]\}}) \quad (17)$$

$$E = 2e_f/d_c \quad (18)$$

Se a Equação 18 for negativa,  $C_{pf}=0$

Onde:

$e_f$  é a excentricidade máxima da pilha superficial durante o enchimento;

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

$p_{hf}$  é o valor local da pressão de enchimento na altura em que o carregamento é aplicado, determinada em (6).

A altura onde a carga local deverá ser aplicada é dada por:

$$s = 0,2 d_c \quad (19)$$

Para silos circulares de paredes espessas, deverá ser considerada uma carga adicional dada por:

$$p_{pfi} = p_{pf}/7 \quad (20)$$

Para silos circulares de paredes finas ( $d_c/t > 200$ ) de classes de ação 2 ou 3, a pressão “patch” deve ser considerada atuando em uma altura  $s$  dada anteriormente, porém deverá ser considerada uma carga adicional interna  $p_{pfi}$  do lado oposto. Essa carga é determinada por:

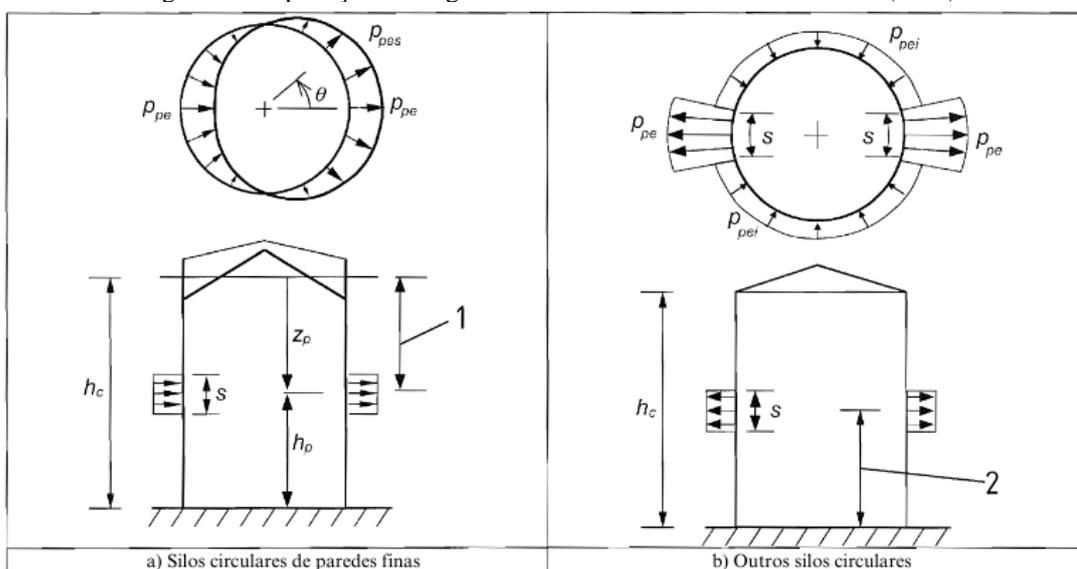
$$p_{pfs} = p_{pf} \cos \theta \quad (21)$$

Onde:

$p_{pf}$  é a pressão externa do patch;

$\theta$  é a coordenada circunferencial conforme Figura 12 (a).

Figura 12 - Aplicação de cargas locais conforme a norma EN 1991-4 (2006).



Fonte: EUROCODE EN 1991-4: (2006).

### 2.3.2.2.5 Cargas simétricas nas paredes verticais no descarregamento

Conforme a norma EN 1991 - 4 (EUROCODE, 2006), para silos baixos, as cargas de descarga simétrica podem ser consideradas idênticas às cargas de enchimento. Para silos de esbeltez intermediária, as pressões de descarga simétricas deverão ser consideradas como:

$$p_{he} = C_h p_{hf} \quad (22)$$

$$p_{we} = C_w p_{wf} \quad (23)$$

Sendo  $C_w$  e  $C_h$  coeficientes dados em função do tipo de classificação do silo. Silos com descarga pelo topo possuem ambos coeficientes iguais a 1, já silos intermediários de classes de avaliação 2 ou 3, deverão ser determinados de acordo com as seguintes Equações:

$$C_h = 1 + 0,15C_s \quad (24)$$

$$C_w = 1 + 0,1C_s \quad (25)$$

$$C_s = \frac{h_c}{d_c} - 1 \quad (26)$$

Onde:

$C_s$  é um fator de ajuste de esbeltez.

Para silos de esbeltez intermediária de classes de avaliação 1, os fatores de descarga serão dados por:

$$C_h = 1 + \{0,15 + 1,5(1 + 0,4 e/d_c) C_{op}\} C_s \quad (27)$$

$$C_w = 1 + 0,4(1 + 1,4 e/d_c) C_s \quad (28)$$

$$e = \max(e_f, e_0) \quad (29)$$

Onde:

$e_f$  é a excentricidade máxima da pilha de grãos durante o enchimento;

$e_0$  é a excentricidade do centro da saída;

$C_{op}$  é o fator de referência de carga de patch para o sólido;

$C_s$  é um fator de ajuste de esbeltez.

### 2.3.2.2.6 Cargas assimétricas nas paredes verticais no descarregamento

As cargas locais (*patch*) devem ser consideradas devido às assimetrias que podem ocorrer no descarregamento. Para silos baixos de qualquer classe de avaliação com excentricidade de descarregamento menor que  $e_{0,cr} = 0,1d_c$ , a carga “patch” de descarga pode

ser desconsiderada, o mesmo ocorre para silos de esbeltez intermediária de classe de avaliação 1.

Se o silo for baixo, da classe 2 e atende a regra estipulada na Equação 30 ou for um silo intermediário de classe 2, um aumento de carga simétrica poderá ser utilizado para substituir o método da carga “*patch*” de descarregamento. Para silos de paredes espessas, a pressão horizontal a ser adicionada é dada pelas Equações de 31 a 34.

$$e_0 > e_{0,cr} = 0,1d_c \rightarrow C_{pe} = 0 \quad (30)$$

$$p_{hf,u} = p_{hf} (1 + \xi C_{pf}) \quad (31)$$

$$p_{he,u} = p_{he} (1 + \xi C_{pe}) \quad (32)$$

Onde:

$$\xi = 0,5 + 0,01(d_c/t) \quad (33)$$

Desde que:

$$\xi \geq 1 \quad (34)$$

Onde:

$p_{hf}$  é a pressão horizontal simétrica de carga, determinada em (6);

$p_{he}$  é a pressão horizontal de descarga, determinada em (22);

$C_{pf}$  é o fator de carga da carga “*patch*”, determinada em (17);

$C_{pe}$  é o fator de descarga da carga “*patch*”;

Sendo que os valores da pressão horizontal simétrica de carga podem ser obtidos a partir da Equação 35:

$$p_{hf}(z) = p_{ho} Y_J(z) \quad (35)$$

Onde:

$$p_{ho} = \gamma K z_0 \quad (36)$$

$$z_0 = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U} \quad (37)$$

$$Y_J(z) = 1 - e^{-z/z_0} \quad (38)$$

Onde:

$\gamma$  é o valor característico do peso unitário;

$\mu$  é o valor característico do coeficiente de atrito da parede para deslizamento sólido na parede vertical;

$K$  é o valor característico da razão de pressão lateral;

$Z$  é a profundidade abaixo da superfície equivalente do sólido;

$A$  é a área da seção transversal plana do silo;

$U$  é o perímetro interno da seção transversal plana do silo;

O fator de descarga da carga local de carregamento “*patch*”, por sua vez, pode ser obtido a partir da Equação (39).

$$C_{pe} = 0,42C_{op}[1 + 2E^2](1 - \exp\{-1,5[(h_c/d_c) - 1]\}) \quad (39)$$

Onde:

$C_{op}$  é o fator de referência de carga de patch para o sólido;

$E$  é determinado pela Equação (18);

$h_c$  é altura do silo até a superfície de equivalência;

$d_c$  é o diâmetro interno do silo;

Já para silos de paredes esbeltas, a pressão horizontal de descarga e a tração de atrito para o descarregamento deve ser determinado por:

$$p_{he} = p_{he}(1 + 0,5C_{pe}) \quad (40)$$

$$p_{we} = p_{we}(1 + C_{pe}) \quad (41)$$

Para silos baixos de classe de avaliação 3 cuja excentricidade de descarga é maior que  $e_{0,cr} = 0,1d_c$  e silos de esbeltez intermediária de classe 3, a magnitude da carga patch de descarga pode ser determinada por:

$$p_{pe} = C_{pe}p_{he} \quad (42)$$

Onde:

Para  $h_c/d_c > 1,2$ , usa-se a Equação (39);

Para  $h_c/d_c \leq 1,2$

$$C_{pe} = 0,272 C_{op}\{(h_c/d_c) - 1 + E\} \quad (43)$$

Onde:

$C_{op}$  é o fator de referência de carga de patch para o sólido;

$E$  é determinado pela Equação (18);

$h_c$  é altura do silo até a superfície de equivalência;

$d_c$  é o diâmetro interno do silo.

#### 2.3.2.2.7 Cargas no fundo

Para as cargas de fundo, a norma EN 1991 - 4 (EUROCODE, 2006) defende que um fundo plano deve ter uma inclinação em relação à horizontal inferior a 5°. A norma EN 1991 - 4 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, p. 67) defende que a pressão vertical média na transição entre o segmento de parede vertical e a tremonha ou no fundo do silo deverá ser determinada pela Equação 44.

$$p_{vft} = C_b p_{vf} \quad (44)$$

Onde:

$p_{vf}$  é o valor de enchimento da pressão vertical calculado através da Equação (13);

$C_b$  é um amplificador de carga a fim de levar em consideração a possibilidade de cargas maiores serem transferidas para o fundo a partir do segmento de parede vertical.

Conforme a norma EN 1991 - 4 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, p. 68) para silos de classes de avaliação 2 e 3, o amplificador de carga deve ser determinado como  $C_b=1$ . No entanto, há algumas exceções estipuladas na norma, quando houver a probabilidade de que o sólido armazenando desenvolva cargas dinâmicas, cargas mais altas devem ser aplicadas no fundo do silo. São os casos citados pela norma: quando uma seção de parede vertical delgada for usada para armazenar sólidos que não podem ser classificados de baixa coesão e se o sólido armazenado é suscetível a intertravamento mecânico como o clínquer de cimento, o que não é o caso deste estudo.

Ainda segundo a norma, deve-se levar em consideração que pressões maiores que as definidas pela Equação 44 podem ser atingidas. A pressão vertical que atua no fundo plano de um silo baixo pode ser definida por:

$$p_{vsq} = p_{vb} + \Delta p_{sq} \left( \frac{z-h_c/d_c}{z-h_{tp}/d_c} \right) \quad (45)$$

Onde:

$$p_{vb} = \gamma z_v \quad (46)$$

$$z_{v,hc} = h_0 - \frac{1}{(n+1)} \left( Z_0 - h_0 - \frac{(z+z_0-2h_0)^{n+1}}{(z_0-h_0)^n} \right) \quad (47)$$

$z = h_c$  para a pressão no fundo do silo

$$\Delta p_{sq} = p_{vtp} - p_{vh0} \quad (48)$$

$$p_{vtp} = \gamma h_{tp} \quad (49)$$

$$p_{vh0} = \gamma h_0 \quad (50)$$

Sendo:

$p_{vb}$  é a componente uniforme de pressão vertical;

$p_{vho}$  é a pressão vertical de Janssen na base da estaca superior, obtida através de (50);

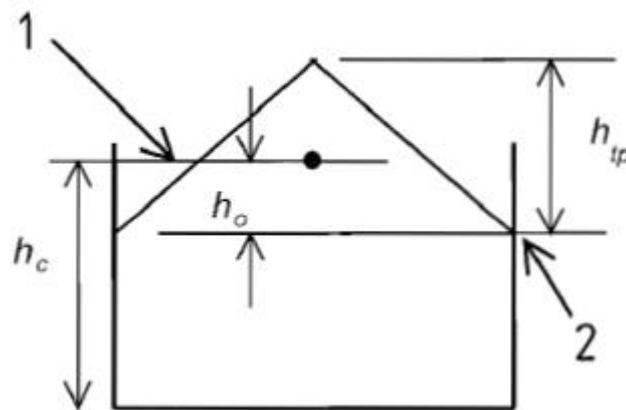
$h_o$  é a profundidade abaixo da superfície equivalente da base da estaca superior, definida como o ponto mais baixo da parede que não está em contato com o sólido armazenado;

$h_{tp}$  é altura total do chapéu;

$h_c$  é a profundidade da base do silo abaixo da superfície equivalente.

Essas dimensões podem ser vistas na Figura 13, que demonstra o indicativo de cada uma das alturas a ser considerada.

Figura 13 - Pressões no fundo de um silo baixo ou intermediário



Fonte: EUROCODE EN (1991-4:2006, p 70).

#### 2.3.2.2.8 Cargas térmicas

A norma EN 1991 - 4 faz menção à importância da determinação da consideração de efeitos térmicos devido às diferenças de temperatura entre o sólido armazenado e a estrutura do silo, mencionando a norma EN 1991-1-5 para a determinação dessas condições térmicas. Ainda, a norma menciona diferentes situações de projeto como uma redução da temperatura ambiente em relação à temperatura do silo e do sólido, ao enchimento com sólidos quentes, taxas de aquecimento diferencial entre elementos de aço e concreto e restrições aos deslocamentos das paredes da estrutura do silo.

#### 2.3.2.3 Norma ISO 11697:2012

### 2.3.2.3.1 Pressões no carregamento e descarregamento

Segundo a ISO 11697 (ISO, 2012, p. 4), as equações básicas utilizadas para calcular as pressões simétricas de carregamento são dadas de 51 a 55:

Pressão de atrito na parede:

$$P_{wf}(z) = \gamma \times R \times C_z(z) \quad (51)$$

Pressão horizontal:

$$P_{hf}(z) = \frac{\gamma \times R}{\mu} \times C_z(z) \quad (52)$$

Pressão vertical:

$$P_{vf}(z) = \frac{\gamma \times R}{\lambda \times \mu} \times C_z(z) \quad (53)$$

$$C_z(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_0}} \quad (54)$$

$$z_0 = \frac{R}{\lambda \times \mu} \quad (55)$$

Onde:

$C_z$  é o fator multiplicador para considerar as perturbações no estado de tensão elástico ou ativo desenvolvido na massa armazenada, dada pela Equação 54;

$z$  é a profundidade onde está sendo avaliada a pressão, tomada a partir da superfície equivalente;

$R$  é o raio hidráulico da seção paralela (A/U);

$\gamma$  é o peso específico do grão (Quadro 4);

$\lambda$  é o coeficiente de proporção entre as pressões horizontais e verticais (Quadro 4);

$\mu$  é o coeficiente de atrito da parede;

A força vertical resultante em paredes é obtida através da integral das forças de atrito verticalmente e pode ser obtida a partir da equação abaixo:

$$P_w = \gamma [z - z_0 C_z(z)] \quad (56)$$

Onde:

$\gamma$  é o peso específico do grão (Quadro 4);

$z_0$  é obtido através da equação 55;

$C_z$  é o fator multiplicador para considerar as perturbações no estado de tensão elástico ou ativo desenvolvido na massa armazenada, dada pela Equação 54.

Segundo a norma ISO 11697 (ISO 2012, p. 5), em situações em que o fluxo seja classificado como "internal flow", conforme ilustrado na Figura 14, as pressões de carga são equivalentes às pressões de descarga. Em outras circunstâncias, as pressões de descarga são aumentadas por meio de um coeficiente  $C$ , sujeito a restrições que incluem:

$$\frac{h}{d} \leq 1,0 \rightarrow C = 1,00 \quad (57)$$

$$1,0 \leq \frac{h}{d} \leq 1,5 \rightarrow C = 1 + 0,7\left(\frac{h}{d} - 1\right) \quad (58)$$

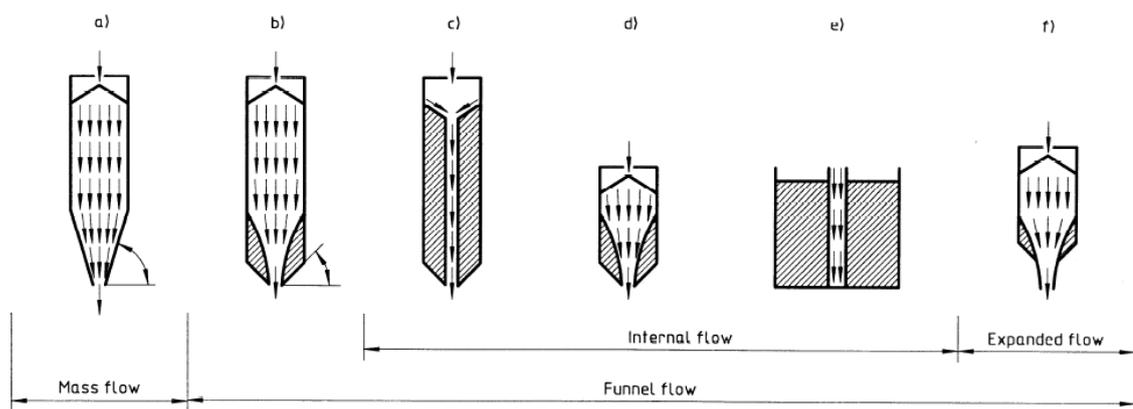
$$\frac{h}{d} \geq 1,5 \rightarrow C = 1,35 \quad (59)$$

Onde:

$h$  é a altura total do silo;

$d$  é o diâmetro interno.

Figura 14 - Tipos de Fluxo



Fonte: ISO 11697 (Etiopian Standart, 2012, p. 3)

As Equações 51, 52 e 53 anteriormente citadas somente podem ser utilizadas para materiais que atendam os parâmetros dados no Quadro 4. Para materiais que não se enquadram nas características anteriormente citadas, o valor de  $C$  deve ser calculado pela Equação 60:

Quadro 4 - Características dos materiais.

Classe de materiais	Densidade $\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	Coefficiente de proporção entre as pressões horizontais e verticais $\lambda$	Coefficiente de atrito da parede $\mu$
1	7,5	0,3	0,3
2	8,5	0,4	0,4
3	10,0	0,5	0,5
4	13	0,6	0,6
5	16	0,75	0,75

Fonte: ISO 11697 (ISO, 2012, p. 8)

$$C = 1,35 + 0,02 \times (\varphi - 30^\circ) < 1,35 \quad (60)$$

O Quadro 5 mostra a classificação de materiais segundo a ISO 11697:2012. Tal quadro não trabalha com o grão de soja, portanto, para efeitos de dimensionamento, utilizar-se-á o grão de milho, cujas propriedades mais se assemelham com a soja, em um comparativo como quadro de características dos materiais do EUROCODE EN 1991-4:2006, de acordo com o Quadro 2.

Quadro 5 - Classificação de Materiais conforme a ISO 11697:2012

(continua)

Sólido a granel	Classe de densidade, $\gamma$ (Quadro 4)	Coefficiente de proporção entre as pressões horizontais e verticais $\lambda$ (Quadro 4)	Coefficiente de atrito da parede $\mu$ (Quadro 4)
Cevada	2	4	1
Cimento	5	4	2
Clínquer de cimento	5	3	2
Areia Seca	5	3	2
Farinha	1	2	1
Cinzas Volantes	4	3	3
Milho	2	4	1

Quadro 5 - Classificação de Materiais conforme a ISO 11697:2012

(conclusão)

Açúcar	3	4	3
Trigo	2	4	1
Carvão	3	3	3

Fonte: Adaptado de ISO 11697 (2012).

A fim de considerar pressões assimétricas decorrentes da heterogeneidade do material a granel, que também podem contribuir para as flutuações na zona de fluxo, os silos devem ser projetados para resistir a tais condições. Para contemplar esses aspectos, uma carga adicional de  $0,2 p_{he}$  deve ser considerada em qualquer seção da parede do silo, abrangendo uma área quadrada com comprimento lateral dada por:

$$s = 0,8 \times \frac{A}{u} \quad (61)$$

As descargas excêntricas também devem ser consideradas, uma vez que resultam em distribuições assimétricas de pressão ao redor da circunferência do silo, ocasionando momentos fletores nas paredes. Para calcular essas cargas em silos cuja excentricidades seja menor que  $0,25d$ , a carga estimada no parágrafo anterior deve ser aumentada por um fator beta, conforme a seguinte expressão:

$$\beta = 1 + 4 \times \frac{e}{d} \quad (62)$$

#### 2.3.2.3.2 Pressões no fundo

As cargas no fundo, por sua vez, são determinadas utilizando a Equação da pressão vertical ( $p_{vf}$ ) acrescida de um valor empírico de 1,35. Esse ajuste visa prevenir cargas de impacto durante o enchimento, bem como a possibilidade de cargas dinâmicas devido à incerteza no fluxo. Para silos baixos, com relação  $h/d$  menor que 1,5, a pressão vertical deve ser calculada substituindo a altura  $z$  por  $h$ . No meio do silo, por sua vez, deve-se usar  $z=1,5d$ , mas não se deve ultrapassar o limite de  $\gamma z$ .

A norma ISO 11697 (ISO, 2012) estipula que, para silos em que a relação  $h/d$  seja inferior a 1,5, a pressão horizontal no topo da parede pode ser considerada como sendo igual a 0. Para alturas inferiores, é considerada uma transição linear, iniciando com  $\lambda = 1$ , até que a linha do perfil alcance o valor fornecido pela Equação 63.

$$P_{hf}(z) = \frac{\gamma \times R}{\mu} \times C_z(z) \quad (63)$$

Os valores de  $\gamma$  indicados no Quadro 4 são superiores, enquanto os valores de  $\lambda$  e  $\mu$  representam médias. Para considerar as variações que essas propriedades podem apresentar em cada cenário, é necessário aumentar os valores em 1,15 ou diminuí-los em 0,9. Portanto, tem-se:

1. Para máxima pressão horizontal: 1,15  $\lambda$  e 0,9  $\mu$
2. Para máxima pressão vertical: 0,9  $\lambda$  e 0,9  $\mu$
3. Para máxima pressão de atrito: 1,15  $\lambda$  e 1,15  $\mu$

#### 2.3.2.4 Norma australiana

##### 2.3.2.4.1 Classificações

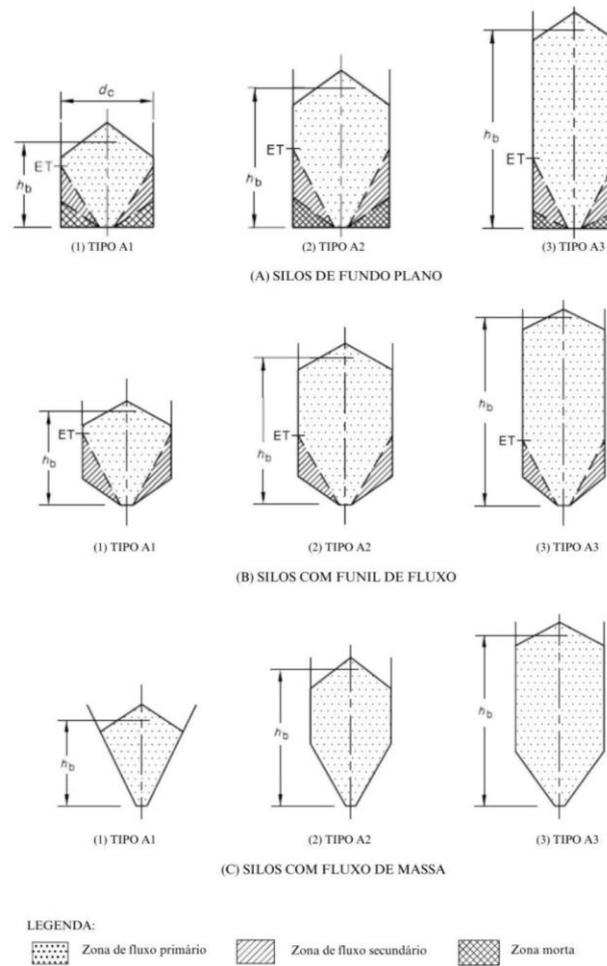
De acordo com a AS 3774 (2016), os armazéns ou silos são classificados de acordo com algumas características:

1. Geometria: Relação entre a maior altura de sólido armazenado pelo maior diâmetro circunscrito:

- A. *Tipo A1*:  $\frac{h_b}{d_c} < 1$  - Silos achatados
- B. *Tipo A2*:  $1 \leq \frac{h_b}{d_c} \leq 3$  - Silos médios
- C. *Tipo A3*:  $\frac{h_b}{d_c} > 3$  - Silos altos

De acordo com a Figura 15 pode-se analisar diversas geometrias de silos com diferentes proporções sendo a Figura 15 (a) (ii) a representação do silo estudado.

Figura 15 - Representação dos tipos de geometrias

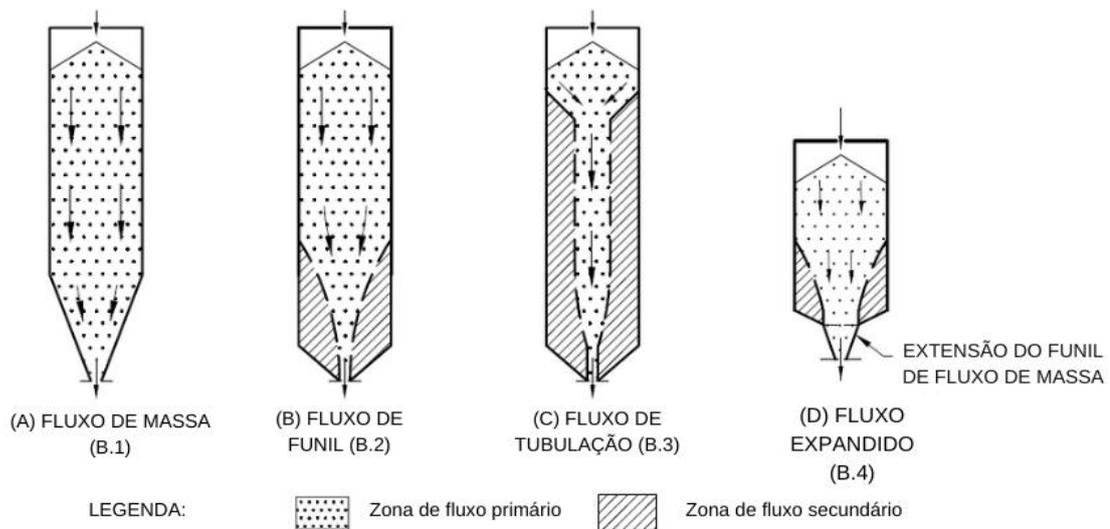


Fonte: Adaptado de AS 3774 (2016).

2. Tipo de fluxo: depende do ângulo da tremonha, rugosidade da parede, propriedades do material armazenado e outros fatores, conforme ilustrado nas Figuras 16 e 17.

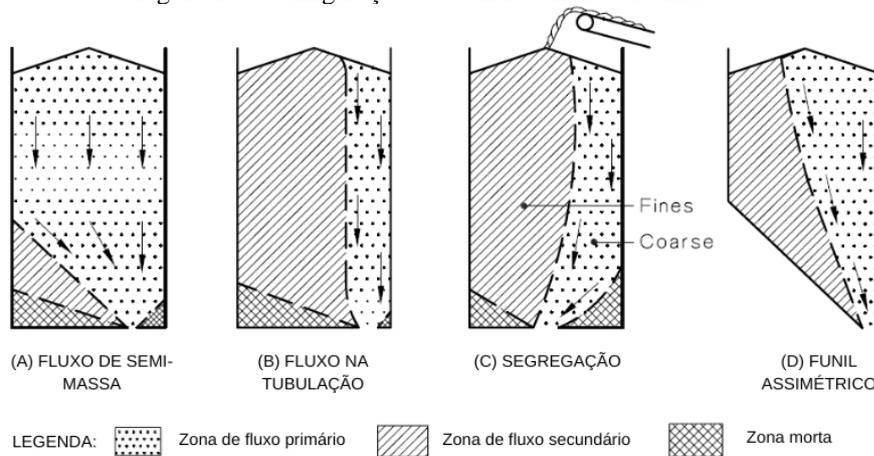
- A. *Tipo B1*: Fluxo de massa.
- B. *Tipo B2*: Fluxo de funil.
- C. *Tipo B3*: Fluxo de tubo.
- D. *Tipo B4*: Fluxo expandido.
- E. *Tipo B5*: Fluxo excêntrico.

Figura 16 - Modos de fluxo simétricos



Fonte: Adaptado de AS 3774 (2016).

Figura 17 - Configurações do canal de fluxo excêntrico



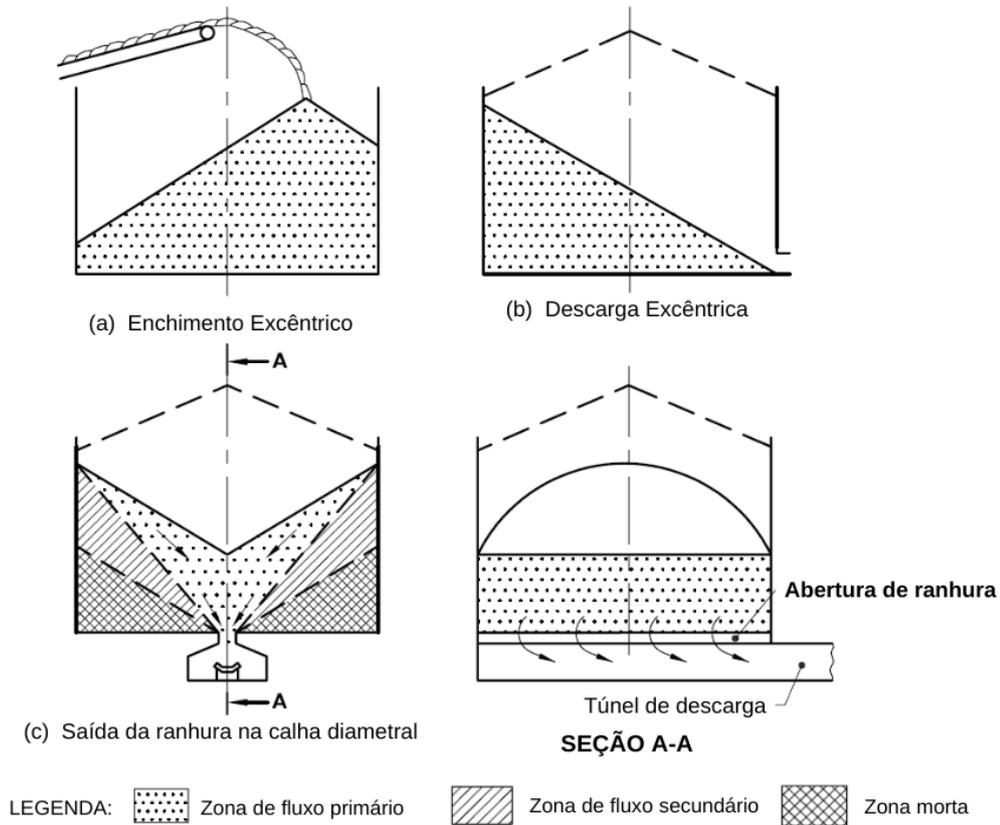
Fonte: Adaptado de AS 3774 (2016).

3. Geometria do Fluxo: A geometria do fluxo deve ser classificada da seguinte forma:

- A. Tipo C1: Caminho axial onde o centro de gravidade do material em fluxo coincide aproximadamente com o eixo vertical do silo, por exemplo, silo circular com abertura de descarga concêntrica.
- B. Tipo C2: Caminho plano onde o canal de fluxo é simétrico em relação ao plano que passa pelo eixo longitudinal da tremonha retangular, por exemplo, silo com abertura de ranhura.
- C. Tipo C3: Caminho excêntrico onde o fluxo é assimétrico em relação ao eixo vertical do silo ou ao plano vertical que passa pelo eixo longitudinal do silo.

D. Tipo C4: Configuração de superfície livre excêntrica resultante do enchimento ou descarga em silos baixos (conforme Figura 18).

Figura 18 - Condições não simétricas em recipientes baixos.



Fonte: Adaptado de AS 3774 (2016).

4. Rugosidade das paredes: Conforme classificação do Quadro 6.

Quadro 6 - Classificação da rugosidade da superfície

(continua)

Tipo	Descrição da superfície	Coefficiente de rugosidade $\mu m$	Materiais típicos
D1	Polido	0,01 a 1	Aço inoxidável polido, extrudado de alta densidade polivinil etileno, aço carbono galvanizado, alumínio
D2	Suave	1 a 10	Aço inoxidável decapado, fundido de alta densidade polivinil etileno, aço carbono pintado, aço carbono com leve ferrugem superficial, cerâmica lisa telhas, concreto com acabamento em aço, chapas

Quadro 6 - Classificação da rugosidade da superfície

(conclusão)

			perfiladas com nervuras verticais - granel sólido móvel
D3	Duro	10 a 1000	Concreto sem forma (superfície rugosa), aço carbono picado, ladrilhos cerâmicos grossos, chapas perfiladas com nervuras verticais - Sólido a granel imóvel
D4	Ondulado	>1000	Folha perfilada com nervuras horizontais

Fonte: Adaptado de AS 3774 (2016)

#### 5. Flexibilidade das paredes na direção do raio do silo.

- A. *Tipo E1*: Rígido, tendo uma proporção entre o diâmetro inscrito ( $d_c$ ) e a espessura da parede ( $t$ ) menor de 100.
- B. *Tipo E2*: Semi rígido, tendo uma proporção entre o diâmetro inscrito ( $d_c$ ) e a espessura da parede ( $t$ ) entre 100 e 500.
- C. *Tipo E3*: Flexível, tendo uma proporção entre o diâmetro inscrito ( $d_c$ ) e a espessura da parede ( $t$ ) maior que 500.

#### 6. Continuidade de paredes:

- A. *Tipo F1*: Paredes contínuas bidirecionais, por exemplo: silos de aço totalmente soldados e silo de concreto armado ou protendido com um mínimo de 0,35% de armadura vertical.
- B. *Tipo F2*: Paredes descontínuas, por exemplo: silos segmentados em concreto armado e silos metálicos corrugados com corrugações horizontais.

7. Formas transversais: A norma AS 3774 (2016) oferece classificações variadas de formas, mas, considerando que neste trabalho o silo será de forma circular, apenas essa configuração será abordada.

- A. *Tipo G1*: Dimensão característica  $0,25d_c$ .

#### 8. Configurações de saída de descarga:

- A. *Tipo H1*: Descarga circular ou quadrada localizada centralmente e projetada para fluxo uniforme em toda área de saída.
- B. *Tipo H2*: Abertura de descarga tipo fenda, na linha central do recipiente e projetada para fluxo uniforme ao longo do comprimento.

C. *Tipo H3*: Abertura circular ou quadrada, excêntrica, ou uma série de aberturas em torno da circunferência.

D. *Tipo H4*: Abertura na parede.

As configurações do tipo H3 e H4 levam a fluxos excêntricos e cargas não uniformes no silo.

9. Meios de indução do fluxo:

A. *Tipo J1*: Gravidade

B. *Tipo J2*: Vibradores Mecânicos

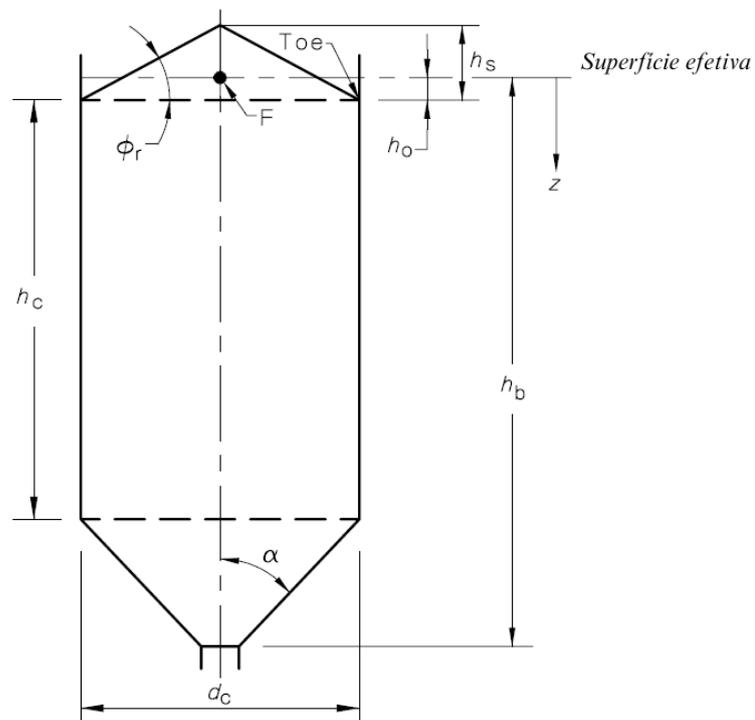
C. *Tipo J3*: Indução de ar sobre toda ou parte da superfície da tampa do silo.

D. *Tipo J4*: Dispositivos impulsivos

E. *Tipo J5*: Fluxo combinado.

10. Parâmetros geométricos: A Figura 19 mostra os principais parâmetros geométricos básicos de silos, a coordenada vertical  $z$  usada no cálculo das pressões deve estar a uma altura  $h_0$  acima do maior contato entre parede e sólido, para superfícies de topo planas usa-se  $h_0 = 0$ , para superfícies cônicas,  $h_0 = h_s/3$ .

Figura 19 - Parâmetros geométricos característicos



Fonte: Adaptado de AS 3774 (2016).

### 2.3.2.4.2 Propriedades do sólido a granel

Segundo a norma AS 3774 (2016), as seguintes propriedades devem ser usadas para determinar as pressões devido aos sólidos a granel armazenados:

- (a) Peso unitário do sólido a granel ( $\gamma$ )
- (b) Ângulo efetivo de atrito interno ( $\phi_i$ )
- (c) Ângulo de atrito na parede ( $\phi_w$ )
- (d) Ângulo de repouso ( $\phi_r$ )

Para elaboração do cálculo de pressões, dois valores representativos devem ser utilizados: o valor característico superior e um valor característico inferior. Tais valores representam a faixa de valores que uma propriedade pode assumir. Para o peso unitário, utilizado nos cálculos de carregamento, emprega-se o valor característico superior do peso a granel, já para as estimativas de volume, utiliza-se o peso bruto médio.

Outra propriedade importante é o ângulo efetivo de atrito interno e atrito da parede, os quais devem ser apresentados com o valor característico superior ou inferior a depender da aplicação. O ângulo de repouso deverá se apresentar com seu valor médio, já o módulo de elasticidade deverá ser obtido a partir da Equação 64:

$$E_s = \chi \cdot p_{vi} \quad (64)$$

Onde:

$E_s$  é o módulo de elasticidade do limite superior do sólido a granel em kPa.

$\chi$  é o coeficiente de contiguidade do módulo dado pela Equação 69.

$p_{vi}$  é a pressão vertical inicial no plano horizontal, determinada pela Equação 65, em kPa.

$$p_{vi} = \frac{\gamma r_c c_z}{\mu k_1} \quad (65)$$

Onde:

$\gamma$  peso unitário do sólido a granel (kN/m<sup>3</sup>)

$r_c$  dimensão característica da seção transversal do silo (m)

$\mu$  menor valor característico do coeficiente de atrito na parede =  $\tan \phi_w$

- $k_1$  valor característico inferior da pressão lateral em graus, dado pela Equação 66.  
 $C_z$  função da profundidade de Janssen, dado pela Equação 67 e Quadro 7.  
 $z_0$  profundidade característica, em metros, Equação 68.

$$K_1 = \frac{1 + \sin^2 \phi_i - 2\sqrt{(\sin^2 \phi_i - \mu^2 \cos^2 \phi_i)}}{4\mu^2 + \cos^2 \phi_i} \geq 0,35 \quad (66)$$

$$C_z = 1 - e^{(-z/z_0)} \quad (67)$$

$$z_0 = \frac{r_c}{\mu K} \quad (68)$$

Quadro 7 - Valores da função de profundidade Janssen

$z/z_0$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	0,00	0,10	0,18	0,26	0,33	0,39	0,45	0,50	0,55	0,59
1	0,63	0,67	0,70	0,73	0,75	0,78	0,80	0,82	0,83	0,85
2	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94
3	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
5	0,99	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de AS 3774 (2016)

Segundo a norma AS 3774 (2016), a ausência de dados experimentais de ensaios confinados no sólido, o valor de  $X$  deve ser determinado a partir da Equação 69.

$$\chi = 3\gamma^{3/2} \quad (69)$$

Ainda segundo a norma AS 3774 (2016), alternativamente, o valor de  $\chi$  pode ser considerado como igual a 70 para grãos agrícolas secos, 100 para grãos pequenos de partículas minerais e 150 para partículas minerais duras muito grandes.

Quadro 8 - Valores característicos das propriedades físicas do sólido a granel

Tipo	Peso unitário ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>		Ângulo médio de repouso ( $\phi_r$ )	Ângulo efetivo de atrito interno ( $\phi_i$ ) em graus		Ângulo de atrito da parede ( $\phi_w$ ) em graus						Multiplicador da pressão vertical ( $c_{vf}$ )
						Rugosidade						
				Tipo D1		Tipo D2		Tipo D3				
	Inferior	Superior		Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	
Cimento	13	16	28	40	50	20	25	23	28	28	33	1,2
Farinha	6,5	7,5	40	23	30	15	23	25	28	25	35	1,4
Grãos de soja	7	8	23	25	32	10	15	12	18	14	20	1,4
Açúcar	8	10	29	33	38	15	25	20	35	25	40	1,2
Trigo	7,5	9	23	26	32	15	25	18	30	25	32	1,4

Fonte: Adaptado de AS 3774 (2016).

### 2.3.2.4.3 Classificação e combinação de carga

Segundo a norma AS 3774 (2016), as cargas são classificadas em 4 grupos denominados de A, B, C e D e subdivididos em tipos de carga como pode ser visto no Quadro 9. Além disso, vale salientar que carregamentos do tipo B.4, B.9, C.4, C.5, D.1 e D.3 serão desprezados devido à falta de informações de fabricantes ou por serem casos extremamente específicos. Esses casos não serão considerados no exemplo apresentado no presente trabalho.

Quadro 9 - Classificação e combinação de cargas

(continua)

Classificação de carga	Tipo de carga	Descrição da carga	Combinação		
			1	2	3
A (cargas permanentes)	A.1	Peso próprio, estrutura de suporte, instalações e equipamentos mecânicos	X	X	X
B (Cargas normais de serviço)	B.1	Cargas gravitacionais de sólidos a granel armazenados	X	X	X
	B.2	Cargas iniciais nas paredes do silo	X	-	-
	B.3	Cargas iniciais nas paredes do silo induzidas pelo fluxo de sólidos a granel	-	X	-
	B.4	Forças de transportadores e alimentadores reagindo contra o silo	X	X	X
	B.5	Cargas móveis em plataformas ou telhados	X	X	X
	B.6	Pressão interna de gás ou sucção	X	X	X
	B.7	Forças de restrições laterais	X	X	X
	B.8	Impacto causado pela queda de sólidos a granel	-	-	X
	B.9	Forças de estruturas anexas	-	-	X
C (Cargas ambientais)	C.1	Cargas de vento	-	-	(X)
	C.2	Cargas devido ao recalque diferencial das fundações	-	-	(X)

Quadro 9 - Classificação e combinação de cargas

					(conclusão)
	C.3	Carga devido ao diferencial de temperatura	-	-	(X)
	C.4	Cargas sísmicas	-	-	(X)
	C.5	Inchamento de sólidos a granel armazenados	-	-	(X)
D (cargas acidentais)	D.1	Impacto do veículo	-	-	(X)
	D.2	Explosão Interna	-	-	(X)
	D.3	Carga de água devido a inundações internas acidentais	-	-	(X)

Fonte: Adaptado de AS 3774 (2016).

A norma AS 3774 (2016) estabelece ainda alguns critérios a serem seguidos nas combinações de carga, sendo eles:

1. Os valores mínimos instantâneos de cálculo das cargas dos grupos C e D não devem ser assumidos como ocorrendo simultaneamente.
2. Os valores máximos instantâneos de projeto das cargas dos grupos C e D individualmente devem ser combinados individualmente com as cargas dos grupos A e B.
3. Para a combinação de carga 3, os componentes de carga marcados com (X) devem ser considerados como agindo com os componentes de carga marcados com X, deve ser adotada a carga que produza os efeitos mais adversos no elemento estrutural considerado.
4. As estimativas superiores e inferiores das cargas identificadas como Tipo A.1 devem ser utilizadas com todas as combinações de carga, e as mais adversas alternativas devem ser usadas.
5. As instalações e equipamentos instalados no telhado ou suspensos na tremonha devem ser incluídos nos seus valores limite superiores na verificação de resistência ou no valor limite inferior para cálculos de estabilidade.
6. Quando a estrutura do silo for usada para fornecer estabilidade às galerias transportadoras ou estruturas adjacentes, as cargas transmitidas a essas estruturas deverão ser incluídas no projeto da estrutura do silo.

7. Os esforços (cisalhamento, momentos, forças) devem ser calculados utilizando cargas majoradas conforme exigido para dimensionamento do estado limite. Os coeficientes para projeto de resistência e uso devem ser os indicados no Quadro 10.

Quadro 10 - Fatores de carga para projeto

Grupo de carga ou tipo de carga	Descrição	Fator de carga	
		ELU	ELS
A	Cargas permanentes	1,4	1,0
B.1	Cargas gravitacionais de granéis e sólidos armazenados	1,25	1,0
B.2 E B.3	Cargas nas paredes do recipiente induzidas por sólidos a granel	1,5	1,1
B.2 E B.3	Cargas devido ao sólido a granel aplicado à estrutura suporte	1,5	1,0
B.4 E B.9	Outras cargas normais de serviço	1,8	1,1
C	Cargas Ambientais (em combinação com as cargas dos grupos A e B)	1,5	0,9
D	Cargas acidentais (em combinação com as cargas dos grupos A e B)	1,25	0,8

Fonte: Adaptado de AS 3774 (2016).

Segundo a norma AS 3774 (2016), estima-se que qualquer preenchimento permanente sobre o fundo do silo deve ser incluído no tipo A.1 de carga. De acordo com a norma AS 3774 (2016) a pior combinação de propriedades do material para cada caso de carga depende do efeito que está sendo considerado. Portanto, é necessário definir valores superiores e inferiores

para cada propriedade do material. Diante disso, a norma estipula que o peso do material deve ser o maior peso unitário possível em operação normal, já o ângulo de atrito na parede deve ser dado de acordo com o Quadro 11.

Quadro 11 - Valores apropriados para as propriedades

Propriedades	Valores característicos		
	Ângulo de atrito da parede ( $\phi_w$ )	Razão de pressão lateral (k)	Ângulo efetivo de atrito interno ( $\phi_i$ )
Pressões normais máximas na parede do cilindro	Inferior	Superior	Inferior
Tração friccional máxima na parede do cilindro	Superior	Superior	Inferior
Carga Vertical máxima na tremonha	Inferior	Inferior	Superior
Pressões máximas na tremonha	Valor inferior para funil	-	Superior

Fonte: Adaptado de AS 3774 (2016).

#### 2.3.2.4.3.1 Cargas iniciais em paredes de silos simetricamente cheios - cargas B.2

A pressão normal sob condições de enchimento simétrico da parede, em kPa, é dada pela Equação 70, com exceção da pressão no nível mais alto do contato do sólido com a parede que, em silos baixos, pode ser reduzida a 0, e uma transição em linha reta tomada de modo que na profundidade  $z=1,5h$  a pressão tenha o valor dado na Equação 71.

$$p_{ni} = \frac{\gamma r_c c_z}{\mu} \quad (70)$$

Onde:

$\gamma$  peso unitário do sólido a granel (kN/m<sup>3</sup>);

$r_c$  dimensão característica da seção transversal do silo (m);

$\mu$  menor valor característico do coeficiente de atrito na parede =  $\tan \phi_w$  ;

$k$  valor característico inferior da pressão lateral em graus, dado pela Equação 66;

$C_z$  função da profundidade de Janssen, dado pela Equação 67 e Quadro 7;

$z$  profundidade abaixo da profundidade efetiva, em metros;

$z_0$  profundidade característica, em metros, Equação 68;

$\phi_i$  ângulo de atrito interno, em graus;

$\phi_w$  ângulo de atrito nas paredes, em graus;

Para  $h_o < z < 1,5h_o$ :

$$p_{ni} = \left( \frac{z-h_o}{0,5h_o} \right) p_1 \quad (71)$$

Onde:

$p_{ni}$  é a pressão normal inicial da parede, em kPa;

$z$  profundidade abaixo da profundidade efetiva, em metros;

$h_o$  altura da superfície de referência acima do contato mais alto com a paredes de sólidos a granel;

$p_1$  é a pressão de janssen na profundidade  $h$  abaixo do maior contato com a parede sólida em  $\text{kPa} = \gamma r_c c_1 / \mu$ ;

$\gamma$  peso unitário do sólido a granel ( $\text{kN/m}^3$ );

$r_c$  dimensão característica da seção transversal do silo (m);

$c_1$  é em função da profundidade de Janssen na profundidade de  $0,5h_o$ , abaixo da parede sólida mais alta;

$\mu$  menor valor característico do coeficiente de atrito na parede =  $\tan \phi_w$ ;

$k$  valor característico inferior da pressão lateral em graus, dado pela Equação 66;

$C_z$  função da profundidade de Janssen, dado pela Equação 67 e Quadro 7;

$z_o$  profundidade característica, em metros, Equação 68.

A norma AS 3774 (2016) estipula que, sempre que houver uma das seguintes situações, as pressões normais iniciais nas paredes devem ser majoradas:

- (a) Enchimento rápido de sólidos pulverulentos a granel com baixa permeabilidade a gases;
- (b) Mistura pneumática;
- (c) Inchamento de sólidos agrícolas ou orgânicos devido a absorção de umidade;
- (d) Diferenciais de temperatura entre as paredes do silo e o sólido armazenado;
- (e) Enchimento Excêntrico;
- (f) Vibração severa transmitida ou aplicada;
- (g) Pressões de gás;
- (h) Sucções devido a mudanças térmicas adiabáticas.

No estudo em questão, é importante ressaltar que nenhuma dessas situações que envolvem o aumento de pressões será considerada devido à sua natureza altamente específica. Tais casos não serão analisados, pois não refletem adequadamente o cenário de estudo no geral.

As cargas de impacto nas paredes são cargas referentes ao despejo de materiais duros e granulares para dentro de um silo, visto que podem gerar um carregamento local nas paredes verticais pelo impacto desses materiais caindo e rolando. Essa força pode ser determinada pela Equação 72.

$$F_w = 0,1 m v_e \quad (72)$$

Onde:

$F_w$  é a força de impacto na parede;

$m$  é a massa do conjunto individual em queda, em kg;

$v_e$  é a velocidade estimada dada através da Equação 73, em m/s.

$$V_E = \sqrt{(v_c^2 + 2gh_1)} \quad (73)$$

Onde:

$g$  é a aceleração da gravidade 9,81m/s<sup>2</sup>;

$h$  é a altura de queda antes do impacto com a parede, em metros;

$v_c$  = velocidade vertical inicial de descarga, em m/s.

As pressões mínimas normais nas paredes fazem-se necessárias devido ao cálculo da força vertical máxima, essa pressão interna mínima deve ser dada, para grãos de fluxo livre, como a soja, pela Equação 74.

$$p_{ni,min} = 0,8 \frac{\gamma r_c c_z}{\mu} \quad (74)$$

Onde:

$\gamma$  peso unitário do sólido a granel (kN/m<sup>3</sup>);

$r_c$  dimensão característica da seção transversal do silo (m);

$\mu$  menor valor característico do coeficiente de atrito na parede =  $\tan \phi_w$ ;

$C_z$  função da profundidade de Janssen, dado pela Equação 67 e Quadro 7.

A pressão inicial vertical devido ao atrito devido ao contato entre a parede vertical e o sólido armazenado é dada através da Equação 75.

$$p_{qi} = \gamma r_c c_z \quad (75)$$

Já as forças verticais nas paredes de silos, quando a distribuição de pressões na parede do mesmo for totalmente simétrica, a carga vertical, em kN/m, deverá ser determinada a partir da Equação 76.

$$N_{zi} = \gamma r_c (z - z_0 c_z) \quad (76)$$

Para silos baixos, a força vertical por unidade de comprimento pode ser determinada pela Equação 77.

$$N_{zi} = \int_0^z p_{qi} dz \quad (77)$$

#### 2.3.2.4.3.2 Cargas no fundo

A pressão na base, de silos de fundo plano circulares, a pressão média inicial, em kPa é dada pela Equação 78:

$$p_{vix} = 1,25p_{vi} \left[ 1 - 1,6 \left( \frac{x}{d_c} \right)^2 \right] \quad (78)$$

Onde:

$p_{vix}$  é a pressão vertical inicial na base de um recipiente de fundo plano a uma distância do centro, conforme Figura 20 (b);

$p_{vi}$  é a pressão vertical inicial em qualquer plano horizontal conforme Figura 20 (b);

$x$  é a coordenada radial de um silo circular em metros;

$d_c$  é o diâmetro do silo, em metros.

As forças de tração de cisalhamento horizontais na base que atuam para fora do container devem ser determinadas a partir da seguinte equação:

$$p_{Six} = 0,3p_{vi} \left[ \left( \frac{2x}{d_c} \right) - \left( \frac{2x}{d_c} \right)^2 \right] \quad (79)$$

Onde:

$p_{Six}$  é a pressão horizontal inicial na base de um recipiente de fundo plano a uma distância do centro, conforme Figura 20(c);

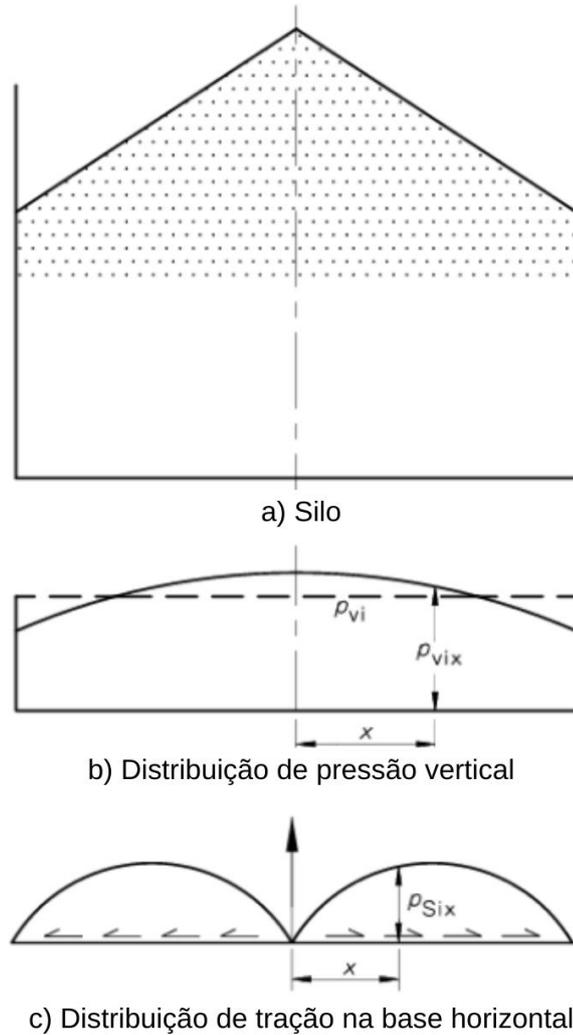
$p_{vi}$  é a pressão vertical inicial em qualquer plano horizontal conforme Figura 20 (b);

$x$  é a coordenada radial de um silo circular em metros;

$d_c$  é o diâmetro do silo, em metros.

Segundo FREITAS (2001), “a norma australiana é a única que propõe o dimensionamento da base também para tensões de cisalhamento decorrentes do atrito entre o produto e o material da base.”

Figura 20 - Pressões atuando nas bases de um silo de fundo plano.



Fonte: AS 3774 (2016)

#### 2.3.2.4.3.3 Cargas induzidas pelo fluxo durante descarga simétrica- cargas B.3

A determinação das cargas de fluxo simétricas pode ser determinada pela Equação 80:

$$p_f = (\text{multiplicador de fluxo}) \times p_i \quad (80)$$

Onde:

$p_f$  é a carga de fluxo em kPa;

$p_i$  é a carga inicial em kPa.

O multiplicador de fluxo deverá ser constante para toda altura do silo e também para sua base em um fundo plano e será determinado de acordo com o tipo de carregamento.

A pressão normal nas paredes verticais deve ser determinada pela seguinte Equação 81.

$$p_{nf} = C_{nf} \times p_{ni} \quad (81)$$

Sendo  $C_{nf}$  o maior entre as Equações 82 e 83:

$$C_{nf} = \left[ 7,6 \left( \frac{h_b}{d_c} \right)^n - 6,4 \right] C_c \quad (82)$$

$$C_{nf} = 1,2C_c \quad (83)$$

Onde

$p_{nf}$  é a pressão normal na parede durante o fluxo;

$C_{nf}$  é o multiplicador de pressão normal da parede (conforme Figura 21);

$p_{ni}$  é a pressão normal inicial em kPa;

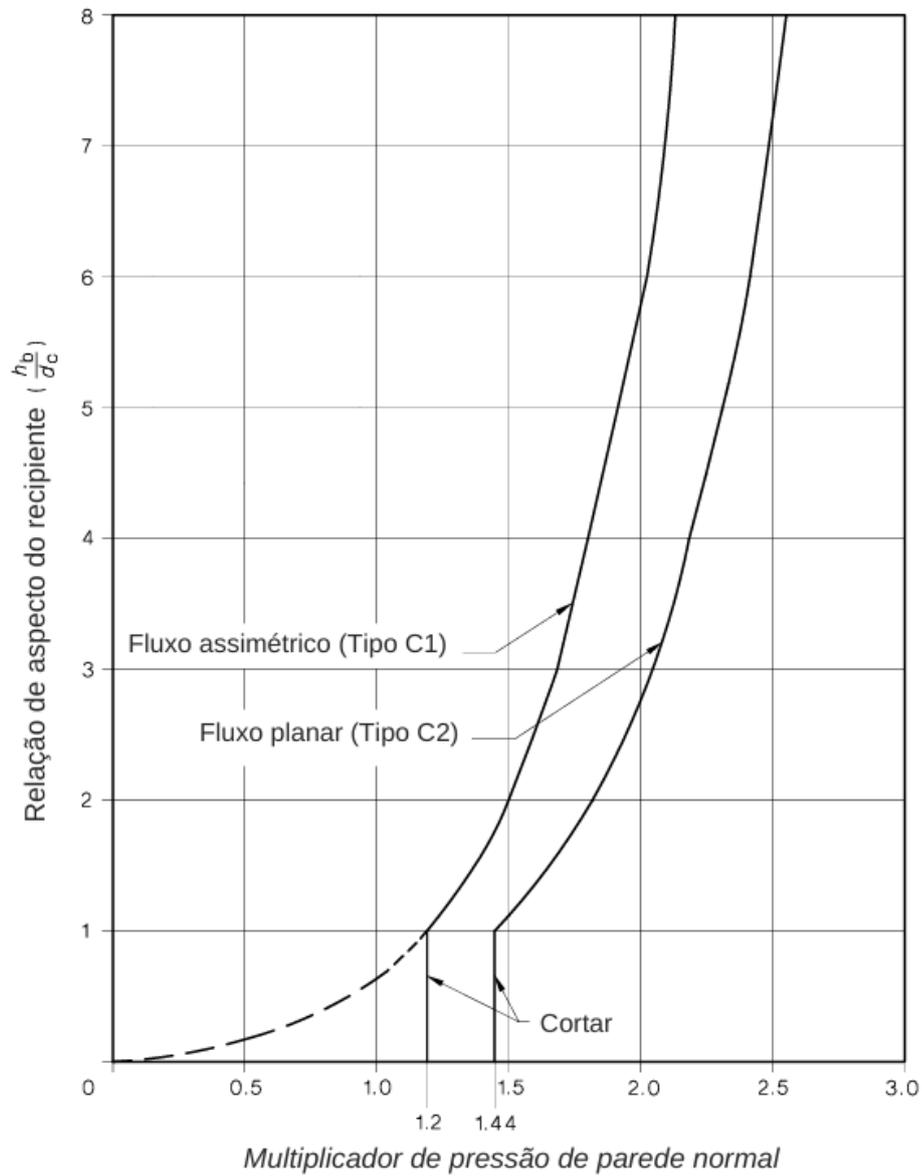
$h_b$  é a altura efetiva total de granel sólido armazenado, em metros;

$d_c$  é o diâmetro de um recipiente cilíndrico;

$n$  é um expoente = 0,06;

$C_c$  é o coeficiente de geometria de fluxo, sendo 1 para fluxo assimétrico e 1,2 para fluxo plano.

Figura 21 - multiplicador de pressão de parede normal



Fonte: Adaptado de AS 3774 (2016).

A pressão vertical em elementos estruturais é dada pela Equação 84:

$$\rho_{vbf} = C_{vf} \rho_{vi} \quad (84)$$

Onde:

$C_{vf}$  é o multiplicador da pressão vertical dado no Quadro 8.

$\rho_{vi}$  é a pressão vertical inicial no plano horizontal, em kPa.

A tração de atrito entre o sólido armazenado e a parede vertical durante o escoamento pode ser determinada a partir da seguinte equação:

$$\rho_{qf} = C_{qf} \rho_{qi} \quad (85)$$

Onde:

$C_{qf}$  é um multiplicador de tração cujo valor é 1,2 para fluxo assimétrico e 1,4 para fluxo plano;

$\rho_{qi}$  é a pressão inicial vertical devido ao atrito.

#### 2.3.2.4.3.6 Forças de restrições laterais - cargas B.7

A norma AS 3774 (2016) estipula que uma força lateral mínima de 2,5% das cargas do tipo A.1, B.1, B.4 e B.5 deve ser utilizada no projeto de restrições laterais. A pressão lateral do silo tende a fazer com que as paredes do mesmo tendem a se expandir para fora, mas a ligação da mesma com a base impede isso, ou seja, essas forças atuam no perímetro inferior do silo.

#### 2.3.2.4.3.7 Impacto causado pela queda de sólidos a granel - cargas B.8

O grão quando se choca com o fundo do silo causa um repique que provoca sobrepressões nas paredes laterais, segundo a norma AS 3774 (2016, p.60) “as forças verticais que atuam em um elemento estrutural interno devem ser avaliadas como a soma das pressões verticais que atuam nas áreas projetadas do plano e as trações de atrito somadas sobre todas as superfícies verticais projetadas”, dada pela Equação 89. Entretanto, para a determinação da força, é preciso conhecer as pressões verticais, horizontais e de tração em elementos estruturais internos dadas pelas Equações de 86 a 88.

##### 1. Pressão vertical em elementos estruturais internos

$$\rho_{v, str} = C_{vf} \rho_{vbf} \quad (86)$$

Onde:

$C_{vf}$  é o multiplicador da pressão vertical dado no Quadro 8.

$\rho_{vbf}$  pressão vertical inicial no plano horizontal, dado em 84.

##### 2. Pressão Horizontal em elementos estruturais internos

$$\rho_{n, str} = \rho_{nf} \quad (87)$$

Onde:

$\rho_{nf}$  pressão normal na parede durante o fluxo dada em 81.

### 3. Tração de fricção em elementos estruturais internos

$$\rho_{q, str} = \rho_{qf} \quad (88)$$

$\rho_{q, f}$  é a tração de atrito entre o sólido armazenado e a parede vertical durante o escoamento dada em 85.

As forças verticais que atuam em um elemento interno, é dada por:

$$F_{str} = 2A_{str}\rho_{v, str} + \int p_{q, str}\rho_{n, str} dz \quad (89)$$

#### 2.3.2.4.3.8 Cargas ambientais do tipo C

Entre as cargas ambientais, o vento caracteriza uma carga de grande importância. A norma AS 3774 (2016) menciona a norma AS 1170.2 para a determinação de cargas de vento, porém, para o caso desse estudo, a norma brasileira NBR 6123(2023) é mais adequada, visto que permite determinar essas características com maior assertividade.

As cargas de recalque diferencial e térmicas deverão ser avaliadas de maneira mais precisa. Para o recalque diferencial, que pode acontecer devido a empenamentos ou deformações verticais da fundação, a norma AS 3774 (2016) recomenda que o mesmo seja determinado por um método racional. As cargas térmicas, por sua vez, também devem ser analisadas por métodos racionais. Nesse sentido, a norma AS 3774 (2016) menciona que, para silos que podem sofrer com a radiação solar em um dos lados, a temperatura da parede do lado exposto ao sol deve ser considerada com 30°C acima da temperatura ambiente na sombra no caso de silos metálicos e 20°C para silos de concreto. Além disso, se houver uma diminuição de temperatura nas paredes do silo, uma pressão adicional de temperatura deverá ser considerada em toda sua altura.

#### 2.3.2.4.3.9 Cargas acidentais do tipo D

As cargas acidentais dos tipos D.1 e D.3, referentes respectivamente a cargas de impacto de veículo e forças devido à água comprimida não foram consideradas para este projeto. No entanto, as cargas devido à pressão resultante de explosões devem ser levadas em conta, uma vez que o material armazenado pode gerar gases e poeira inflamável durante o armazenamento. Devido a essa possibilidade, a norma AS 3774 (2016) estipula que as paredes do silo devem ser

projetadas para suportar, sem ruptura, uma pressão de não menos que 100 kPa, na ausência de cálculos mais precisos.

### 2.3.2.5 Norma brasileira

A norma brasileira NBR 17066 (2022) faz menção a algumas normas estrangeiras ao tratar da determinação das pressões devido aos grãos. Ela estabelece que, para silos nos quais não ocorra fluxo de massa e haja cargas e descargas concêntricas, ou seja, que resultem em distribuições simétricas de pressão nas paredes do silo, a metodologia a ser seguida é a estipulada pela norma ANSI/ASAE S433.1 (2019). Porém, essa norma americana não é aplicável em casos de silos nos quais ocorra fluxo de massa; nesses casos, as pressões devem ser determinadas de acordo com o que é prescrito pela ISO 11967 (2012).

Quanto às cargas concêntricas e descargas excêntricas, independentemente do tipo de fluxo, a determinação das pressões deve seguir as diretrizes estabelecidas pela ISO 11967 (2012). Se a excentricidade da descarga for superior a  $0,25d$ , onde "d" é o diâmetro do silo, então a determinação das pressões deve ser feita de acordo com a norma EN 1991-4 (2006).

### 2.3.3 Carregamento devido ao vento

De acordo com Calil (2007, p.73):

“O vento é um fenômeno natural que varia, em intensidade e direção, aleatoriamente no tempo e espaço. Ao encontrar uma estrutura, essa variação se intensifica e esse fenômeno aleatório causa ações sobre a estrutura também aleatórias e, portanto, de difícil tratamento. A ação dos silos, especialmente quando vazios, tem sido responsável por inúmeros acidentes. Os silos cilíndricos metálicos são os que mais têm sofrido com a ação do vento.”

Segundo a NBR 6123 (2023), a força externa à edificação, agindo em uma superfície, é dada pela Equação 90.

$$F_e = C_{pe} q A \quad (90)$$

Onde:

$q$  é a pressão dinâmica do vento;

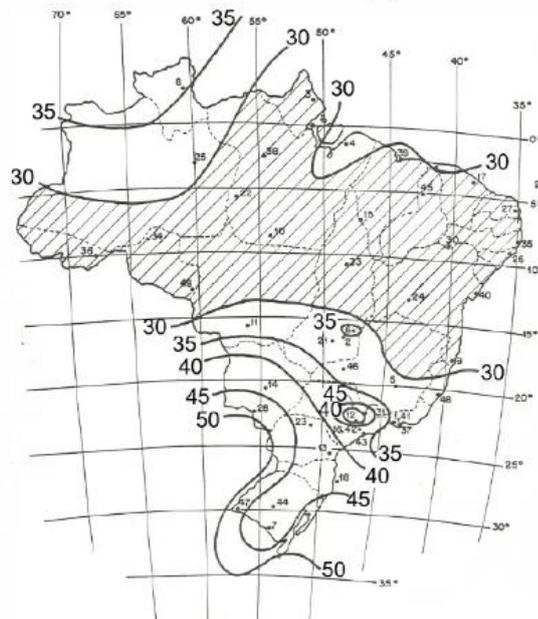
$C_{pe}$  é o coeficiente de pressão externa;

$A$  é uma área onde está aplicada a força.

### 2.3.3.1 Velocidade característica do vento

Para determinação da pressão dinâmica, faz-se necessário determinar a velocidade básica do vento, estabelecida através da região de estudo, por meio do mapa de Isopletas, conforme Figura 22.

Figura 22 - Mapa de Isopletas



Fonte: NBR 6123 (2023).

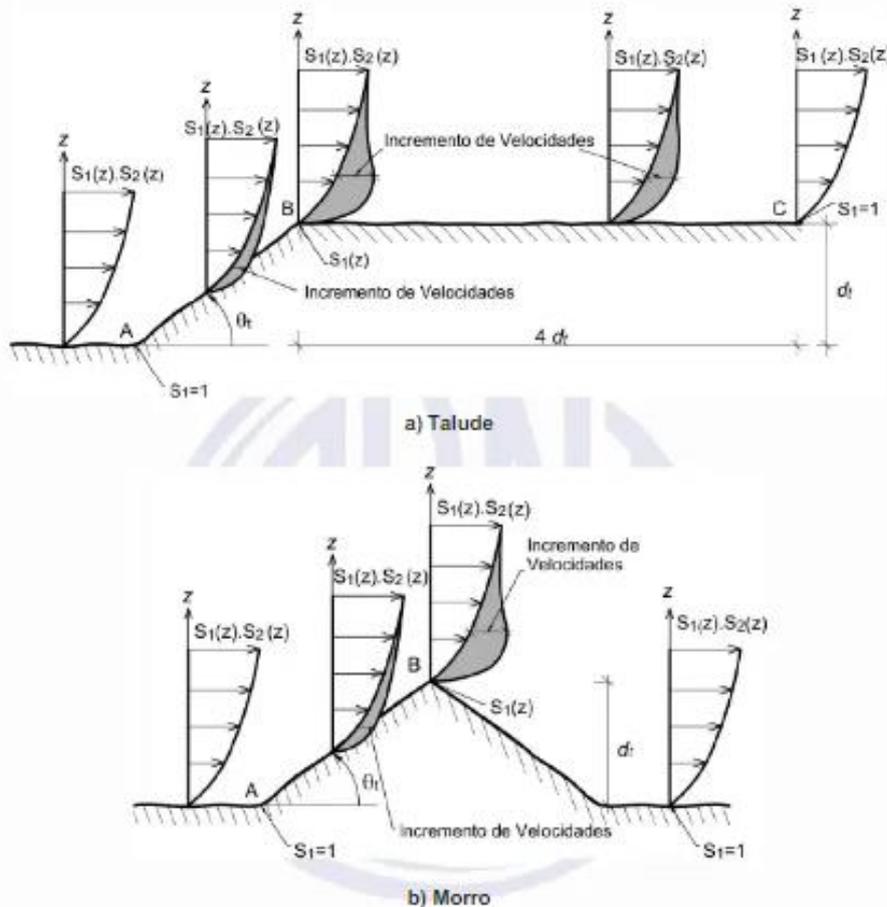
Conhecida a velocidade básica do vento, é possível descobrir a velocidade característica do vento dada através da equação 91.

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (91)$$

Onde,  $V_0$  é a velocidade básica do vento determinada pela Figura 22 e  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ , que são respectivamente, um fator topográfico, fator da rugosidade do terreno e um fator estatístico. Segundo a NBR 6123 (2023), a velocidade básica do vento é uma velocidade que possui tempo de recorrência médio de 50 anos, e a probabilidade de que ela se iguale ou seja superada no período é de 63%.

O fator topográfico é determinado conforme a topografia do terreno, se ele for plano ou fracamente acidentado,  $S_1=1$ , se for um vale profundo, protegido de ventos em qualquer direção,  $S_1= 0,9$  e para taludes e morros, o fator é determinado de acordo com a posição do local estudado conforme Figura 23.

Figura 23 - Fator topográfico S1



Fonte: NBR 6123 (2023).

Nos pontos A dos morros e A e C dos taludes,  $S_1=1$ , nos demais pontos, deve-se interpolar linearmente em função da inclinação média do talude ou encosta do morro, dados pelas seguintes condições:

1. Se  $\vartheta_t \leq 3^\circ$

$$S_1=1$$

2. Se  $6^\circ \leq \vartheta_t \leq 17^\circ$

$$S_1(z) = 1,0 + (2,5 - z/d_t) \operatorname{tg}(\vartheta_t - 3^\circ) \geq 1$$

3.  $\vartheta_t \geq 45^\circ$

$$S_1(z) = 1,0 + (2,5 - z/d_t) 0,31 \geq 1$$

Onde:

$z$  é a altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado;

$d_t$  é a diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro;

$\theta_t$  é a inclinação média do talude ou encosta do morro.

O fator S2 é determinado de acordo com a rugosidade do terreno, classificada segundo a norma NBR 6123:2023 da seguinte forma:

1. Categoria I: superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente.
2. Categoria II: Terrenos abertos, em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas.
3. Categoria III: Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas.
4. Categoria IV: terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada, com cota média de 10 metros.
5. Categoria V: terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados, com média igual ou superior a 25m.

Ainda, a NBR 6123:2023 classifica as edificações ou estruturas de acordo com classes, as quais serão usadas para a determinação das forças estáticas devidas ao vento, com intervalos de tempo para cálculo da velocidade média de, respectivamente, 3s, 5s e 10s.

1. Classe A: toda edificação, estrutura, parte de edificação ou de estrutura, unidades e sistemas de vedação e seus elementos de fixação, cuja maior dimensão vertical ou horizontal não exceda 20 m;
2. Classe B: toda edificação, estrutura, ou parte de edificação e estrutura, cuja maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal seja maior do que 20 m e menor ou igual a 50 m;
3. Classe C: toda edificação, estrutura ou parte de edificação e estrutura, cuja maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

Segundo a NBR 6123:2023, o fator S2 para diversas categorias de rugosidade do terreno, classes de dimensões das edificações podem ser dadas pelo Quadro 12.

Quadro 12 - Fator S2

(continua)

z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C

Quadro 12 - Fator S2

(conclusão)

≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,876	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,9	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	12,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82

Fonte: NBR 6123 (2023).

Já o fator estatístico S3 também é tabelado na NBR 6123:2023, de acordo com o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação, conforme o Quadro 13.

Quadro 13 - Fator S3

Grupo	Descrição	S3	Tp (anos)
1	Estruturas cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros, e de forças de segurança, edifícios centrais de controle, etc.) Pontes rodoviárias e ferroviárias Estruturas que abrigam substâncias inflamáveis, tóxicas e/ou explosivas Vedações de edificações do grupo 1 (telhas, vidros, painéis de vedação)	1,11	100
2	Estruturas cuja ruína represente substancial risco à vida humana, particularmente a pessoas em aglomerações, crianças e jovens, incluindo, mas não limitado a: - edificações com capacidade de aglomeração de mais de 300 pessoas em um mesmo ambiente, como centros de convenções, ginásios, estádios etc. - creches com capacidade maior do que 150 pessoas; - escolas com capacidade maior do que 250 pessoas; Vedações das edificações do grupo 2 (telhas, vidros, painéis de vedação).	1,06	75
3	Edificações para residências, hotéis, comércio, indústrias. Estruturas ou elementos estruturais desmontáveis com vistas a reutilização. Vedações das edificações do grupo 3 (telhas, vidros, painéis de vedação).	1,00	50
4	Edificações não destinadas à ocupação humana (depósitos, silos) e sem circulação de pessoas no entorno. Vedações das edificações do grupo 4 (telhas, vidros, painéis de vedação).	0,95	37
5	Edificações temporárias não reutilizáveis. Estruturas dos Grupos 1 a 4 durante a construção (fator aplicável em um prazo máximo de 2 anos). Vedações das edificações do grupo 5 (telhas, vidros, painéis de vedação).	0,83	15

Fonte: NBR 6123 (2023).

Depois da posse de todos os dados necessários para a determinação da velocidade característica do vento, é possível determinar a pressão dinâmica, em N/m<sup>2</sup>, pela expressão:

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (92)$$

Onde:

$V_k$  é a velocidade característica do vento, em m/s, encontrada através de 91.

### 2.3.3.2 Pressões externas e forças de arrasto

Segundo a NBR 6123:2023, para a determinação das pressões externas, em uma edificação cilíndrica de seção circular, deve-se usar os valores de  $C_{pe}$  dados no Quadro 14, porém esses coeficientes são aplicáveis desde que o escoamento seja caracterizado com superior ao crítico, ou seja, o número de Reynolds, encontrado na Equação 93, maior de 420.000 e com vento incidindo perpendicularmente ao eixo do cilindro de diâmetro  $d$ .

$$Re = 70000 V_k d \quad (93)$$

Onde:

$V_k$  é a velocidade característica do vento, em m/s, encontrada através de 91.

$d$  é o diâmetro da seção circular, expressa em metros.

Além disso, vale salientar que, segundo a norma, para ventos que passam livremente pelos dois extremos do cilindro, o valor de  $h$  a considerar para o cálculo da relação  $h/d$  deve ser a metade do comprimento do cilindro. Os valores de  $C_{pe}$  podem ser vistos no Quadro 14.

Quadro 14 Coeficientes de pressão externa  $C_{pe}$

(continua)

$\beta$	Superfície rugosa ou com saliências		Superfície Lisa	
	$h/d = 10$	$h/d \leq 2,5$	$h/d = 10$	$h/d \leq 2,5$
0	+1,0	+1,0	+1,0	+1,0
10°	+0,9	+0,9	+0,9	+0,9
20°	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7
30°	+0,4	+0,4	+0,35	+0,35
40°	0	0	0	0
50°	-0,5	-0,4	-0,7	-0,5

Quadro 14 - Coeficientes de pressão externa  $C_{pe}$ 

(conclusão)

60°	-0,95	-0,8	-1,2	-1,05
70°	-1,25	-1,1	-1,4	-1,25
80°	-1,2	-1,05	-1,45	-1,3
90°	-1,0	-0,85	-1,4	-1,2
100°	-0,8	-0,65	-1,1	-0,85
120°	-0,5	-0,35	-0,6	-0,4
140°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25
160°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25
180°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25

Fonte: NBR 6123 (2023).

### 2.3.4 Empuxo de terra na galeria

As paredes da galeria, além de sofrerem com as pressões verticais advindas do grão, podem sofrer com a força do empuxo de terra, uma força horizontal exercida pelo solo nas paredes da galeria. Para obter esses esforços, é necessário conhecer as características do solo no qual a construção será instalada. O ensaio realizado é o Standart Penetration Test (SPT), cujo objetivo é medir o número de golpes necessários para penetrar uma amostra de solo em condições padronizadas. O SPT analisado pode ser encontrado na Figura 24.



O ângulo de atrito interno pode ser determinado pela equação proposta por Teixeira (1996) a qual faz uma correlação com o índice de resistência à penetração (NPST) conforme Equação 96.

$$\phi = \sqrt{20N} + 15^\circ \quad (96)$$

Já o peso específico, em casos de inexistência de ensaios de laboratório, pode ser relacionado com o índice de resistência à penetração através de estudos feitos por Godoy (1992), a depender do tipo de solo encontrado, conforme Quadros 15 e 16.

Quadro 15 - Peso específico de solos argilosos

N (golpes)	Consistência	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )
≤ 2	Muito mole	13
3 - 5	Mole	15
6 - 10	Média	17
11 - 19	Rija	19
≥ 20	Dura	21

Fonte: GODOY (1972).

Quadro 16 - Peso específico de solos arenosos

N (golpes)	Consistência	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )		
		Areia Seca	Úmida	Saturada
≤ 5	Fofa	16	18	19
5 - 8	Mole			
9 - 18	Medianamente Compacta	17	19	20
19 - 40	Compacta	18	20	21
> 40	Muito Compacta			

Fonte: GODOY (1972).

O solo, ao apresentar uma sobrecarga sendo exercida sobre si, no caso de silos, pelo maciço de grãos, exercerá uma tensão vertical, cuja sobrecarga deverá ser transformada em uma altura equivalente de solo, chamada de  $h_0$ . A tensão vertical, portanto, é determinada pela Equação 97.

$$q = \gamma h_0 \quad (97)$$

Onde

$\gamma$  é o peso específico do solo.

A tensão horizontal em um maciço não coesivo é determinada pela multiplicação do coeficiente de empuxo do solo pela tensão efetiva vertical no ponto estudado, conforme Equação 98. Vale lembrar que, se a camada de solo estiver abaixo do nível de água do solo, existirão duas parcelas de tensões horizontais, uma ocasionada pelo peso do solo e outra pelo peso da água.

$$\sigma_h = k q \quad (98)$$

### 2.3.5 Radier e estaqueamento

Para a análise da ação do solo perante a fundação estaqueada, utilizar-se-á a hipótese de Winkler, segundo Dall Agnolo (2020, apud WINKLER, 1867):

O solo é visto como um sistema de molas lineares e independentes entre si, sendo consideradas somente as deformações ocorridas na região das fundações. Tal modelo, baseado na Hipótese de Winkler, pressupõe que as pressões de contato solo-fundação são proporcionais aos recalques gerados, com essa consideração válida tanto para carregamentos verticais quanto para ações horizontais.

A rigidez do maciço na interação de solo-estrutura poderá ser representada por um coeficiente de mola ( $k_v$ ) que se denomina de Coeficiente de Reação Vertical (CRV). Esse valor tem por objetivo representar a resistência do solo ao deslocamento causado por uma pressão aplicada. Tal coeficiente é semelhante ao coeficiente de mola, porém, se difere do mesmo pois considera uma força por área ao invés de só a força em si (TQS Docs, s.d.).

Para a determinação dos coeficientes de reação vertical da estaca, aplica-se no topo da estaca o carregamento obtido, admitindo-se como apoio em base rígida. O CRV é a relação entre a carga aplicada e o deslocamento sofrido na base da estaca, podendo ser determinado pelo modelo de Aoki-Lopes (1975), com efeito de grupo, a partir da Equação 99, (TQS Docs, s.d.).

$$CRV_{estaca} = \frac{P_i}{\delta_i} \quad (99)$$

Onde:

$P_i$  é a carga aplicada no topo da estaca;

$\delta_i$  é o recalque na base da estaca.

Ao levar em consideração a proporcionalidade das forças ao longo do fuste da estaca e sua base, obtém-se a relação dada na Equação 100.

$$CRV_{fuste\ j,i} = \frac{CRV_{estaca} F_{fuste\ j,i}}{\sum_{j=1}^m F_{fuste\ j,i} + F_{ponta,i}} \quad (100)$$

Quando a carga for menor que a resistência lateral acumulada ao longo do fuste da estaca, o denominador da Equação 100 pode ser adotado como a carga atuante no topo da estaca. Para o coeficiente de reação vertical na ponta da estaca  $i$ , tem-se a Equação 101.

$$CRV_{ponta\ i} = \frac{F_{ponta,i}}{\delta_i} \quad (101)$$

Se o carregamento no topo da estaca for todo absorvido pelo fuste, não haverá carga na base da estaca. O somatório dos coeficientes de reação vertical dos fustes e da ponta deverá resultar no coeficiente de reação da estaca  $i$  dado pela Equação 102.

$$\sum_{j=1}^m CRV_{fuste\ j,i} + CRV_{ponta,i} = CRV_{geral,i} \quad (102)$$

Já para o radier, os coeficientes de mola utilizados serão realizados por meio de correlações empíricas sobre o tipo de solo, sua tensão admissível e o coeficiente. Inicialmente, deve-se determinar a tensão admissível do solo, que pode ser obtido através do Quadro 17, proposto por MORRISON (1993).

Quadro 17 - Relação entre o tipo de solo e tensão admissível

(continua)

Descrição do tipo de solo	$\sigma_s$ (MPa)
Rocha sã, maciça, sem laminação	3,0
Rocha laminada, com pequenas fissuras	1,5
Solos granulares concrecionados, conglomerados	1,0
Pedregulho fofo	0,3
Pedregulho compacto a muito compacto	0,6

Quadro 17 - Relação entre o tipo de solo e tensão admissível

(conclusão)

Argila dura (SPT >19)	0,3
Argila média ( $6 \leq \text{SPT} \leq 10$ )	0,1
Argila rija ( $11 \leq \text{SPT} \leq 19$ )	0,2
Areia muito compacta (SPT >40)	0,5
Areia compacta ( $19 \leq \text{SPT} \leq 40$ )	0,4
Areia med. compacta ( $9 \leq \text{SPT} \leq 18$ )	0,2
Silte muito compacto (ou duros)	0,3
Silte compactos (ou rijos)	0,3
Silte médio (medianamente compacto)	0,1

Fonte: MORRISON (1993).

A partir da determinação da tensão admissível, é possível determinar o valor de  $K_v$ , propostos por Morrison (1993), conforme Quadro 18.

Quadro 18 - Relação entre tensão admissível e coeficiente de mola

(continua)

Tensão Admissível (kgf/cm <sup>2</sup> )	$K_v$ (kgf/cm <sup>3</sup> )	Tensão Admissível (kgf/cm <sup>2</sup> )	$K_v$ (kgf/cm <sup>3</sup> )
0,25	0,65	2,15	4,3
0,30	0,78	2,20	4,4
0,35	0,91	2,25	4,5
0,40	1,04	2,30	4,6
0,45	1,17	2,35	4,7
0,50	1,30	2,40	4,8
0,55	1,39	2,45	4,9

Quadro 18 - Relação entre tensão admissível e coeficiente de mola

(continuação)

0,60	1,48	2,50	5,0
0,65	1,57	2,55	5,1
0,70	1,66	2,60	5,2
0,75	1,75	2,65	5,3
0,80	1,84	2,70	5,4
0,85	1,93	2,75	5,5
0,90	2,02	2,80	5,6
0,95	2,11	2,85	5,7
1,00	2,2	2,90	5,8
1,05	2,29	2,95	5,9
1,10	2,38	3,00	6,0
1,15	2,47	3,05	6,1
1,20	2,56	3,10	6,2
1,25	2,65	3,15	6,3
1,30	2,74	3,20	6,4
1,35	2,83	3,25	6,5
1,40	2,92	3,30	6,6
1,45	3,01	3,35	6,7
1,50	3,10	3,40	6,8
1,55	3,19	3,45	6,9
1,60	3,28	3,50	7,0
1,65	3,37	3,55	7,1
1,70	3,46	3,60	7,2
1,75	3,55	3,65	7,3

Quadro 18 - Relação entre tensão admissível e coeficiente de mola

(conclusão)

1,80	3,64	3,70	7,4
1,85	3,73	3,75	7,5
1,90	3,82	3,80	7,6
1,95	3,91	3,85	7,7
2,00	4,0	3,90	7,8
2,05	4,1	3,95	7,9
2,10	4,2	4,0	8,0

Fonte: MORRISON (1993).

## 2.2 COMBINAÇÕES UTILIZADAS

As ações exercidas sobre uma estrutura devem ser combinadas a fim de se avaliar os esforços que possam ocorrer simultaneamente, visando analisar os efeitos mais desfavoráveis na estrutura. A NBR 8681 (ABNT, 2003) classifica as ações em três categorias: ações permanentes, variáveis e excepcionais. As ações permanentes incluem o peso próprio da estrutura, todos os elementos construtivos permanentes e empuxos de terra devido ao seu peso próprio.

As ações variáveis englobam ações como o vento, variações de temperatura, atrito nos aparelhos de apoio, pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas. A terceira trata de ações decorrentes de causas excepcionais como abalos sísmicos, choque de veículos, explosões, entre outros. A terceira categoria, referente às ações excepcionais, não será usada neste estudo.

Para as combinações do Estado Limite Último (ELU), todas as ações permanentes devem ser consideradas em sua totalidade. Quanto às ações variáveis, uma delas é considerada como a principal, atuando com seu valor característico, enquanto as outras são consideradas como secundárias e admitidas com valores reduzidos, conforme Equação 103. Além disso, todas as ações são majoradas pelos coeficientes de ponderação dados no Quadro 19.

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{Gi,k} + \gamma_q \left[ F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j} F_{Qj,k} \right] \quad (103)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$  é o valor característico das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$  é o valor característico da ação variável considerada como ação principal para a combinação;

$\Psi_{0j} F_{Qj,k}$  é o fator reduzido para as demais ações variáveis.

Para as combinações do Estado Limite de Serviço (ELS), serão utilizadas as combinações frequentes de serviço, os quais consideram as cargas permanentes com seus valores característicos, a ação variável principal é considerada com seu valor frequente ( $\Psi_1 F_{Q1,k}$ ) e todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores quase-permanentes ( $\Psi_2 F_{Qk}$ ), conforme pode ser visto na Equação 104.

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \Psi_1 F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{2j} F_{Qj,k} \quad (104)$$

No Quadro 19, é possível perceber os coeficientes de ponderação para combinações do Estado Limite Último (ELU) e os fatores de combinação para o Estado Limite de Serviço (ELS) segundo a norma NBR 8681 (ABNT, 2003).

Quadro 19 - Coeficiente de ponderação e fatores de combinação

Carregamentos permanentes				
Tipo de Carga	Coeficiente de ponderação	Fator de Combinação		
		$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
Peso próprio (favorável)	1,0	-	-	-
Peso próprio (desfavorável)	1,4	-	-	-
Empuxo de terra	1,4	-	-	-
Ações Variáveis				
Vento	1,4	0,6	0,3	0
Carga do grão (horizontal, vertical, de atrito, no fundo)	1,5	0,8	0,7	0,6

Fonte: elaborado pela autora.

No Quadro 20 é possível perceber as siglas utilizadas para representar as combinações utilizadas, as mesmas representadas no Quadro 21.

Quadro 20 - Siglas para representação dos carregamentos nas combinações

Sigla	Descrição
PP	Peso próprio favorável
PPD	Peso próprio desfavorável
E	Empuxo de terra
CSC	Carga simétrica horizontal de carregamento
CSD	Carga simétrica horizontal de descarregamento
CAC	Carga de atrito de carregamento
CAD	Carga de atrito de descarregamento
CV	Carga vertical
CF	Carga no fundo

Fonte: elaborado pela autora.

Quadro 21 - Combinações utilizadas

Ação variável principal	Descrição da combinação
Últimas	
Vento	$PP + 1,4E + 1,4V$
Vento	$1,4PPD + 1,4E + 1,4V + 1,4 \times 0,8(CSC + CAC + CV + CF)$
Vento	$1,4PPD + 1,4E + 1,4V + 1,4 \times 0,8(CSD + CAD + CV + CF)$
Carga do grão	$1,4PPD + 1,4E + 1,5 (CSC + CAC + CV + CF) + 1,4 \times 0,6 V$
Carga do grão	$1,4PPD + 1,4E + 1,5 (CSD + CAD + CV + CF) + 1,4 \times 0,6 V$
Serviço	
Vento	$PPD + E + 0,3V + 0,6(CSC + CAC + CV + CF)$
Vento	$PPD + E + 0,3V + 0,6(CSD + CAD + CV + CF)$
Carga do grão	$PPD + E + 0,7(CSC + CAC + CV + CF)$
Carga do grão	$PPD + E + 0,7(CSD + CAD + CV + CF)$

Fonte: elaborado pela autora.

### 2.3 DIMENSIONAMENTO

Segundo Safarian e Harris (1998, p. 79), as paredes devem ser reforçadas para se satisfazer 3 propósitos: fortalecer a parede para resistir às forças e momentos fletores causados pelo material armazenado, distribuir fissuras de tração de modo a manter a largura das fissuras nos limites permitidos e resistir aos momentos de flexão horizontais distribuindo os efeitos locais de pressão para uma área maior.

Calil Junior e Cheung (2007, p.203-204) destacam que:

As tensões de compressão atuantes em silos de concreto armado são geralmente pequenas e facilmente resistidas pelo concreto. O tipo de ruptura das paredes de silos de concreto armado é usualmente por escoamento do aço (normalmente de modo dúctil, dando bastantes avisos de ruptura) ou por perda de vínculos, resultando em ruptura perto dos cantos ou ao longo de parte da circunferência (não-dúctil, resultando em colapso catastrófico). Devido às fissuras mudarem a rigidez relativa dos diferentes

caminhos das cargas na estrutura de concreto, os silos de concreto geralmente respondem de um modo que corresponde às hipóteses de projeto. Portanto, o projeto tradicional é feito calculando a armadura circunferencial para resistir às tensões de membrana ou anelares, supondo cada seção da altura do silo como um anel. As tensões de membrana de compressão oriundas das forças de atrito são facilmente resistidas pela compressão no concreto.

Calil Junior e Cheung (2007, p. 204) afirmam também:

Seções horizontais da parede do silo são solicitadas por compressão, e são menos suscetíveis a fissuras de flexão. Essa pode ser uma razão da pouca atenção que é dada aos momentos fletores verticais ou resistência à flexão. Como consequência, a estrutura tende a desenvolver pequenas trincas horizontais e transmite sua carga para a ação de anel.

Em paredes de silos cilíndricos de concreto armado, que são elementos tracionados, o dimensionamento deve satisfazer duas condições, segundo Calil Junior e Cheung (2007): o estado-limite último (parede à tração) e o Estado-Limite de Utilização (fissuração).

Calil Junior e Cheung (2007), destacam ainda que, em construções de silos de concreto, deverão ser avaliadas as pressões assimétricas que podem ocasionar momentos circunferenciais nas paredes. Diante disso, recomenda-se dispor armadura nas duas faces das paredes.

Segundo Safarian e Harris (1998), “O momento fletor vertical pode causar fissuras horizontais. Tal momento fletor pode resultar de pressão não uniforme nas paredes, das diferenças de temperatura entre o material armazenado e a superfície externa da parede, ou de cargas externas concentradas”. Eles propõem o uso de aços dispostos na vertical para servir de suporte para os aços na horizontal.

Além disso, Safarian e Harris (1998) destacam que as disposições dos aços podem ser feitas em duas ou em uma camada. Se o aço horizontal for disposto em duas camadas, deverá apresentar duas camadas de aço vertical. Se for disposto em uma camada horizontal, deverá apresentar uma camada vertical.

Quanto à armadura vertical, Safarian e Harris (1998) destacam que a quantidade de aço vertical não pode ser calculada pelo conhecimento de pressões e forças. Eles salientam que a norma ACI 313 (1997) propõe uma relação entre a área vertical do aço e a área bruta da parede não inferior a 0,0015 para paredes externas e nem 0,001 para paredes internas. A preferência dos autores é de uma relação de 0,002 para paredes externas e 0,0015 a 0,002 para paredes internas, sendo o espaçamento máximo das barras de 40 e 45 cm, respectivamente. A normativa europeia EN 1992-1-1 (EUROCODE, 2004) estipula uma área de armadura vertical através de uma relação de 0,002 da área transversal bruta da parede para a área de aço mínima vertical e uma área de aço máxima dada por 0,4 da área transversal bruta da parede.

Quanto ao espaçamento da armadura vertical, Safarian e Harris (1998) destacam que o espaçamento entre as barras verticais não deve ultrapassar o valor de 30 cm, já a norma EN 1992-1-1(EUROCODE, 2004) recomenda que a distância entre duas barras verticais não exceda 3 vezes a espessura da parede ou 40 cm, utilizando o menor entre as duas.

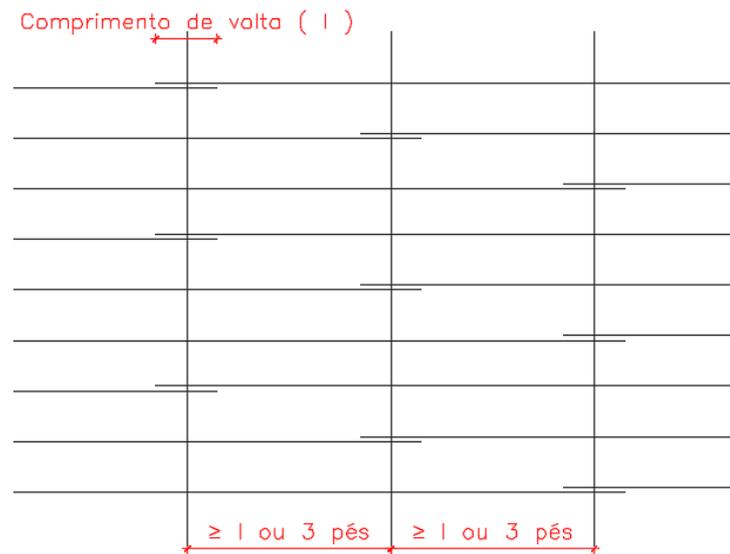
Safarian & Harris (1998, p. 79) destacam ainda que a norma ACI 313 (1997) propõe uma relação mínima entre o aço da armadura horizontal e a área transversal bruta da parede, que não deve exceder 0,0025, ou, segundo a preferência dos autores, não ultrapassar a relação de 0,003. A normativa europeia EN 1992-1-1(EUROCODE, 2004) estipula uma área de aço horizontal mínima dada pelo maior valor entre 25% da área de aço vertical ou 0,001 da área transversal bruta da parede. A normativa europeia destaca ainda que o espaçamento da armadura horizontal não deve ser superior a 40 cm.

Safarian e Harris (1998, p. 81) reforçam que a armadura horizontal deve ser em uma camada para paredes de até 20 cm, enquanto para paredes mais espessas se recomendam duas camadas de armadura para resistir aos momentos fletores positivos e negativos. Ainda, os autores recomendam o uso de armadura dupla para a borda superior da parede, independente de sua espessura para protegê-la da flexão horizontal.

Além disso, Safarian e Harris (1998, p. 83) destacam que as armaduras de silos normalmente são emendadas. As barras horizontais são emendadas para tração e barras verticais são para compressão, a menos que as cargas laterais coloquem a barra em tração; nesse caso, devem ser dispostas emendas de tração. Essas emendas são necessárias, pois se todas as barras fossem emendadas no mesmo lugar, formaria-se um plano de fraqueza em toda altura das paredes.

A norma americana ACI 313 (1997) diz que a emenda das barras de armadura deve ser escalonada, em pelo menos um comprimento de volta ou 3 pés (91,44cm), e que as voltas não coincidam ao menos a cada duas barras de intervalo. Além disso, a norma estabelece um transpasse de pelo menos 6 polegadas (~15cm). Uma representação disso pode ser vista na Figura 25. As barras verticais também devem ser escalonadas sempre que possível.

Figura 25 - Disposição de barras verticais e horizontais nas paredes



Fonte: Adaptado de Safarian & Harris (1998, p. 84)

A área de aço horizontal requerida pelo ACI 318 por unidade de altura é dada através da Equação 105.

$$A_s = \frac{F_u}{\phi f_y} \quad (105)$$

Onde:

$\phi$  é o fator de redução da resistência proposta pela norma americana ACI 318 de 0,9;

$f_y$  é a tensão de escoamento do aço à tração.

A área de aço necessária para a tração axial segundo Calil Junior e Cheung (2007), partindo do pressuposto que a ruptura se dará em seção já fissurada, ou seja, se encontra no estado-limite último, é dada segundo a Equação 106.

$$A_s = \frac{T_d}{f_{yd}} \quad (106)$$

Onde  $T_d$  é a força de tração de cálculo dada pela Equação 107.

$$T_d = p_h R \quad (107)$$

Onde

$p_h$  é a pressão horizontal de descarregamento do material ensilado;

$R$  é o raio da seção horizontal do silo.

A área de aço varia de acordo com a profundidade  $z$  avaliada, pois a pressão lateral varia com a profundidade, sendo menor no topo e maior na zona inferior. É importante lembrar que,

no topo, as Equações 105 e 106 podem resultar em uma área de aço menor que a mínima exigida. Nesses casos, deve-se utilizar a armadura mínima.

Segundo Calil Junior e Cheung (2007, p. 194), na avaliação do estado limite de serviço, parte-se do pressuposto que as armações resistem sozinhas às forças de tração, ou seja, os elementos de concreto encontram-se no estágio II. Para o dimensionamento à fissuração, primeiro deve-se estabelecer a abertura de fissuras que não se deseja superar. Os autores destacam que para silos que não exija estanqueidade esse valor é de 0,30 mm; caso contrário, deve-se usar 0,15mm.

Calil Junior e Cheung (2007, p. 194) afirmam que se deve levar em conta a tensão na armadura sob uma força T de serviço. Nesse dimensionamento, toda a armadura resiste à força, portanto, obtém-se a seguinte relação:

$$\sigma_s = \frac{T}{A_s} \quad (108)$$

Calil Junior e Cheung (2007, p. 194) afirmam ainda que, caso houver um momento atuante na seção, essa tensão será dada por:

$$\sigma_s = \frac{\left[ T + \left[ \frac{M}{0,9 d} \right] \right]}{A_s} \quad (109)$$

Onde:

d é a altura útil da seção.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023), o controle da fissuração pode ser feito simplificadamente através do cálculo da tensão de serviço e a verificação dos diâmetros e espaçamentos máximos. Essa tensão pode ser obtida pelas Equações 108 e 109 a depender do tipo de esforço atuante. Portanto, se houver um controle rigoroso do diâmetro e espaçamento das armaduras, não é necessário determinar a abertura de fissuras. Esses limites podem ser vistos na Figura 26.

Figura 26 - Valores máximos de diâmetro  $\phi$  e espaçamentos com barras de alta aderência.

Tensão na barra		Concreto Armado	
$\sigma_s$	$\phi_{\max}$	$S_{\max}$	
(Mpa)	(mm)	(cm)	
160	32,0	30,0	
200	25,0	25,0	
240	20,0	20,0	
280	12,5	15,0	
320	10,0	10,0	
360	8,0	6,0	

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2023)

Segundo Calil Junior e Cheung (2007, p.195), para carregamentos que provoquem tensões maiores que o estado limite de formação de fissuras, a verificação das fissuras é realizada no estágio II, que despreza a resistência do concreto e admite um comportamento linear dos materiais. Os valores de abertura de fissuras para cada barra tracionada são determinados pelo NBR 6118 (2023) e é dado pelo menor valor entre os encontrados nas Equações 110 e 111.

$$w_1 = \frac{\phi_i \sigma_{si}}{12,5 \eta_i E_{si}} \left( \frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) \quad (110)$$

$$w_2 = \frac{\phi_i \sigma_{si}}{12,5 \eta_i E_{si}} \frac{3 \sigma_{si}}{f_{ct,m}} \quad (111)$$

Onde

$\phi_i$  é o diâmetro da barra que protege a região de envolvimento considerada;

$\sigma_{si}$  é a tensão de tração no centro de gravidade da armadura considerada, calculada no estágio II;

$\rho_{ri}$  é a taxa de armadura em relação à área de região de envolvimento =  $\left( \frac{A_{si}}{A_{cri}} \right)$ .

$A_{cri}$  é a área da região de envolvimento protegida pela barra i, considerada com um bloco de seção quadrada de lado  $15\phi$ , com centro no eixo da barra. Desprezam-se as partes desse bloco não contidas na seção transversal, e, quando houver superposição de blocos, consideram-se as barras contidas em um bloco único, definido pelo perímetro externo dos blocos superpostos;

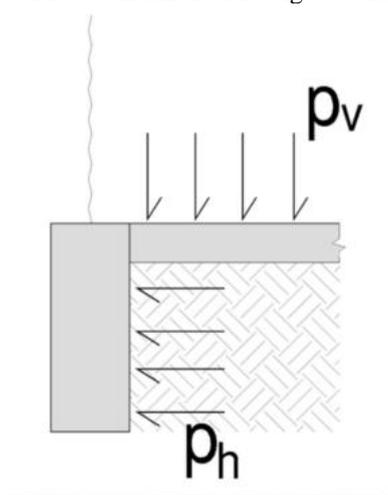
$E_{si}$  é o módulo de elasticidade do aço;

$\eta_i$  é o coeficiente de conformação superficial da armadura considerada, igual a 2,25 para barras de alta aderência e 1 para barras lisas;

$f_{ct,m}$  é a resistência média do concreto à tração.

Para a viga do anel, a pressão sobre a laje comprime o solo, provocando um esforço de tração no anel externo, conforme Figura 27. Essa pressão é conhecida através da Equação 98, onde, usando a Equação 94 para obter o coeficiente  $k$  do solo para transformar as pressões verticais e horizontais, obtém-se a pressão lateral que será exercida no anel.

Figura 27 - Pressão horizontal na viga do anel.



Fonte: Notas de Aula do prof. André Lubeck (2023)

A armadura de tração no anel será determinada pela Equação 112.

$$A_s = 1,4 \frac{F}{\sigma_s} \quad (112)$$

Onde

$\sigma_s$  é a tensão no aço, determinada pela máxima abertura de fissuras, dada através da 105.

$$w_k = \frac{\phi}{12,5 \eta_i} \frac{3 \sigma_{si}}{E_s f_{ctm}} \quad (113)$$

Onde:

$w_k$  é a abertura de fissura em mm;

$\phi$  é o diâmetro da barra em mm;

$\eta_i$  é um coeficiente dado em função da rugosidade das barras, conforme figura 29.

$E_s$  é o módulo de elasticidade do concreto de 210 GPa;

$f_{ctm}$  é a tensão de tração do concreto.

A tensão de tração do concreto é dada em função da resistência característica do concreto, através da Equação 114. Os limites de abertura de fissuras pode ser visto na Figura 28.

$$f_{ctm} = 0,3f_{ck}^{2/3} \quad (114)$$

Figura 28- Exigências mínimas de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.

Tipo de concreto estrutural	Tipo de protensão	Classe de agressividade ambiental (CAA)	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	–	CAA I a CAA IV	Não há	–
Concreto armado	–	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	–	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	–	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	

Fonte: ABNT NBR 6118 (2023)

Figura 29- Valor do coeficiente de aderência  $\eta_1$

Categoria do aço	$\eta_1$
CA-25	1,00
CA-50	2,25
CA-60	1,00

Fonte: ABNT NBR 6118 (2023).

A armadura de tração deve ser somada com a armadura de flexão da viga provocada pela carga vertical. Para o dimensionamento da viga e laje de fundo, será utilizado o Software RLF Flex CisTor.

Em sua dissertação, Alves (2001) afirma que a força vertical última na parede deverá ser menor que valor admissível da força vertical imposta pela norma americana ACI 313 (1997) para que não ocorra ruína por flambagem. O valor dessa força é obtido através da Equação 115.

$$P_{n,p} = 0,55 \phi_c f_{ck} t \quad (115)$$

Onde:

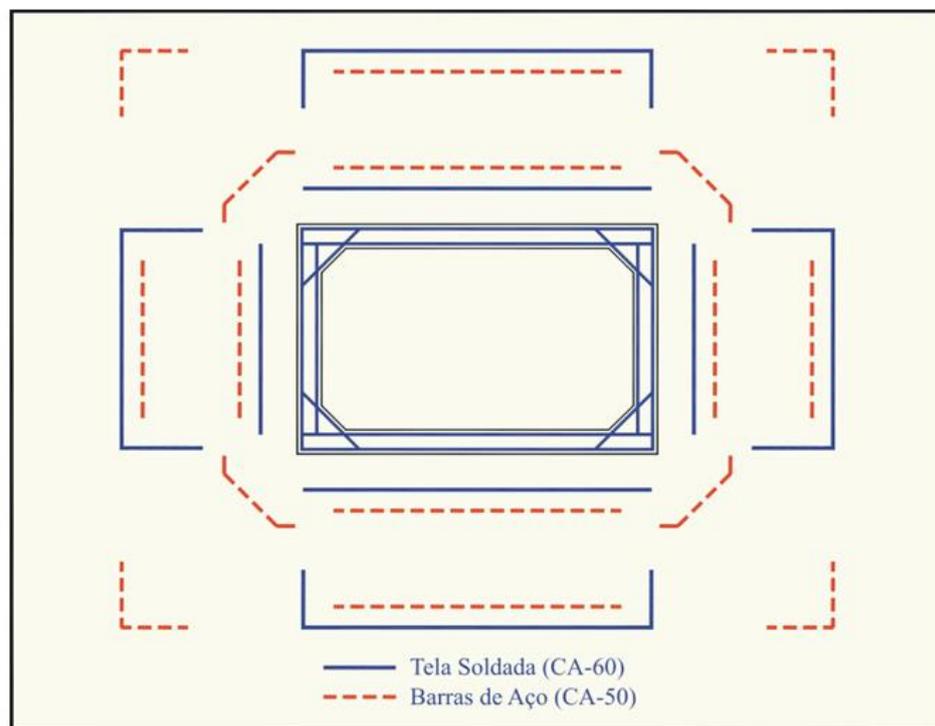
$\phi_c$  é o coeficiente de minoração da resistência, igual a 0,7 segundo a norma americana (ACI 1997);

t é a espessura da parede do silo.

A galeria na base do silo é composta por paredes de concreto. Devido à falta de uma norma específica para o dimensionamento dessas paredes, optou-se por utilizar o método do dimensionamento de aduelas de concreto proposto por El Debs (2018). As características de dimensionamento são semelhantes, visto que aduelas são componentes estruturais muito usadas em obras com pressões e cargas significativas, o que também acontece em galerias de silos.

Para o dimensionamento dessas paredes de concreto, El Debs (2018) sugere a disposição de telas soldadas nas faces externas e internas, sendo que, na face externa, a disposição das telas é feita em U como pode ser visto na Figura 30, devendo ser transpassado nas quinas até  $\frac{1}{4}$  do vão da laje de cobertura, de fundo e da parede lateral. As barras soltas atuam como um reforço para atender aos esforços solicitantes, as mesmas são empregadas de forma reta nas lajes de fundo, cobertura e parede lateral e em forma de L nos cantos.

Figura 30 - Arranjo da armadura na galeria.



Fonte: El Debs (2018).

El Debs (2018) sugere o dimensionamento da armadura principal pelo prescrito na NBR 6118 para solicitações normais. Para o cálculo da armadura, EL Debs (2018) sugere adaptações do proposto em FUSCO para o dimensionamento de seção retangular submetida à flexão composta com grande excentricidade. Essas adaptações são feitas para possibilitar o emprego

de armadura com dois tipos de aço (CA-60 das telas e CA-50). Inicialmente, é determinado o momento fletor reduzido, dado pela Equação 116.

$$\mu_{sd} = \frac{M_{sd}}{b d^2 f_{cd}} \quad (116)$$

Onde:

$M_{sd}$  é o momento fletor solicitante;

$b$  é a largura da seção transversal;

$d$  é a altura útil da seção;

$f_{cd}$  é a resistência de cálculo à compressão do concreto.

El Debs (2018) diz que para o cálculo das áreas de aço deve-se adotar a seguinte estratégia:

- a) cálculo da armadura mínima, nas faces internas e faces externas, no meio dos vãos das lajes;
- b) escolha das telas soldadas para atender a armadura mínima;
- c) cálculo da armadura adicional, na face interna, no meio dos vãos;
- d) cálculo da armadura adicional externa, nas quinas e no meio dos vãos.

Para o cálculo da armadura mínima, EL Debs (2018) sugere a utilização da expressão fornecida pela NBR 6118 (2003) para o cálculo visto que ela fornece um valor ligeiramente superior ao calculado pela NBR 6118 (2014) e da NBR 6118 (2023). Para o dimensionamento da armadura nos domínios 2 e 3, utiliza-se a Equação 117, desde que para o aço CA-60,  $\mu_{sd} \leq 0,247$  e  $\mu_{sd} \leq 0,319$  para o aço CA-50.

$$A_{s,CA-50} = \frac{1}{\sigma_{sd}} \left( \frac{M_{sd}}{z} + N_{sd} \right) \quad (117)$$

Para o dimensionamento no domínio 4, as Equações de 118 a 122 podem ser usadas desde que para o aço CA-60 o momento reduzido esteja entre  $0,247 \leq \mu_{sd} \leq 0,402$  e para o aço CA-50 entre  $0,319 \leq \mu_{sd} \leq 0,402$ .

- a) Para o aço CA - 60

$$z = 0,818 d \quad (118)$$

$$M_{sd,lim} = 0,247 b d^2 f_{cd} \quad (119)$$

$$\Delta M_{sd} = M_{sd} - M_{sd,lim} \quad (120)$$

$$A_{s,CA-60} = \frac{1}{\sigma_{sd}} \left( \frac{M_{sd,lim}}{z} + \frac{\Delta M_{sd}}{d-d'} + N_{sd} \right) \quad (121)$$

$$A'_{s,CA-60} = \frac{1}{\sigma'_{sd}} \left( \frac{\Delta M_{sd}}{d-d'} \right) \quad (122)$$

Sendo  $\sigma'_{sd}$  variável em função de  $d'/d$  e para  $d'/d = 0,1$ ,  $\sigma'_{sd} = 516/\gamma_s$  (MPa)

b) Para o aço CA-50

$$z = 0,739 d \quad (123)$$

$$M_{sd,lim} = 0,319 b d^2 f_{cd} \quad (124)$$

$$\Delta M_{sd} = M_{sd} - M_{sd,lim} \quad (125)$$

$$A_{s,CA-60} = \frac{1}{\sigma_{sd}} \left( \frac{M_{sd,lim}}{z} + \frac{\Delta M_{sd}}{d-d'} + N_{sd} \right) \quad (126)$$

$$A'_{s,CA-60} = \frac{1}{\sigma'_{sd}} \left( \frac{\Delta M_{sd}}{d-d'} \right) \quad (127)$$

Ainda, é necessário verificar a resistência à força cortante, já que, segundo o proposto por El Debs (2018), a verificação deve ser feita para a laje de cobertura e junto às quinas. A condição que deve ser atendida para que a armadura transversal resista aos esforços de tração, oriundos da força cortante, é dada por:

$$V_{sd} \leq V_{Rd1} \quad (128)$$

onde

$$V_{Rd1} = [\tau_{rd} k (1,2 + 40\rho_1 + 0,15\sigma_{cp})] b_w d \quad (129)$$

onde

$$\tau_{rd} = 0,25 f_{ctd} \quad (130)$$

$$\tau_{rd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c \quad (131)$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w d} \leq 0,02 \quad (132)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c} \quad (133)$$

$$k = |1,6 - d| \geq 1,0 \quad (134)$$

Onde

$f_{ctd}$  é a resistência de cálculo do concreto à tração;

$A_{s1}$  é a área da armadura de tração que chega no apoio e está devidamente ancorada;

$N_{sd}$  é a força normal na seção considerada;

$\tau_{rd}$  é a tensão resistente de cálculo do concreto ao cisalhamento.

Deve-se verificar também a força resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto, dadas pela Equação 135. A força solicitante deverá ser menor que a força resistente.

$$V_{Rd2} = 0,27\alpha_{v2} f_{cd} b_w d \quad (135)$$

Onde

$$\alpha_{v2} = (1 - f_{ck}/250) \quad (136)$$

Quando se faz necessário o uso de armadura transversal, a verificação se dá de acordo com a Equação 137.

$$V_c = V_{c0} \left(1 + \frac{M_0}{M_{sd,max}}\right) \leq 2V_{c0} \quad (137)$$

Onde

$$V_{c0} = 0,6 f_{ctd} b_w d \quad (138)$$

$$M_0 = N_{sd} \left(\frac{h}{6}\right) \quad (139)$$

$M_{sd,max}$  é o momento fletor de cálculo máximo no trecho analisado;

$M_0$  é o valor do momento fletor que anula a tensão normal de compressão na borda da seção, determinado em 139, segundo El Debs (2018).

Com a determinação de  $V_c$ , a força cortante que será resistida pela armadura transversal é dada por:

$$V_{sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (140)$$

$$V_{sw} = V_{sd} - V_c \quad (141)$$

Onde

$V_{Rd3}$  é a força cortante resistente de cálculo relativo à ruína por tração diagonal;

$V_c$  é a parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça.

$V_{sw}$  é a parcela resistida pela armadura transversal

A área da armadura transversal pode ser determinada a partir da Equação 142, com estribos inclinados a cada 90°.

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right) = \frac{V_{sw}}{0,9 d \sigma_{wd}} \quad (142)$$

Onde

$\sigma_{wd}$  é a tensão resistente dos estribos (250 MPa para lajes até 15cm e 435 MPa para lajes com espessura maior de 35cm).

A verificação quanto ao estado limite de fissuração inaceitável pode ser analisada de acordo com o proposto pela NBR 6118 (2023). A norma estabelece as Equações 143 e 144 para determinar a abertura de fissuras, sendo que se deve considerar o maior valor entre os dois. A análise é feita considerando os esforços da combinação frequente de serviço.

$$w = \frac{\phi_i}{12,5 n_i} \frac{\sigma_{si} 3\sigma_{si}}{E_{si} f_{ctm}} \quad (143)$$

$$w = \frac{\phi_i}{12,5 \eta_i} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \left( \frac{4}{p_{ri}} + 45 \right) \quad (144)$$

$$\sigma_{si} = \frac{1}{A_s} \left( \frac{M_{sd}}{0,9 d} - 0,35 N_{sd} \right) \quad (145)$$

$$p_{ri} = \frac{A_{si}}{A_{cri}} \quad (146)$$

Onde

$\phi_i$  é o diâmetro do fio da tela soldada ou do diâmetro da barra;

$n_i$  é o coeficiente de conformação superficial dos fios ou das barras da armadura tracionada;

$\sigma_{si}$  tensão na armadura tracionada;

$d$  é a altura útil da seção;

$A_s$  é a área da armadura tracionada por metro linear;

$p_{ri}$  é a taxa geométrica do fio da tela soldada ou barra, em relação à área  $A_{cri}$ ;

$A_{cri}$  é a área de concreto de envolvimento do fio da tela soldada ou da barra;

$A_{si}$  é a área do fio tracionado da tela soldada ou da barra.

### 3 DESENVOLVIMENTO

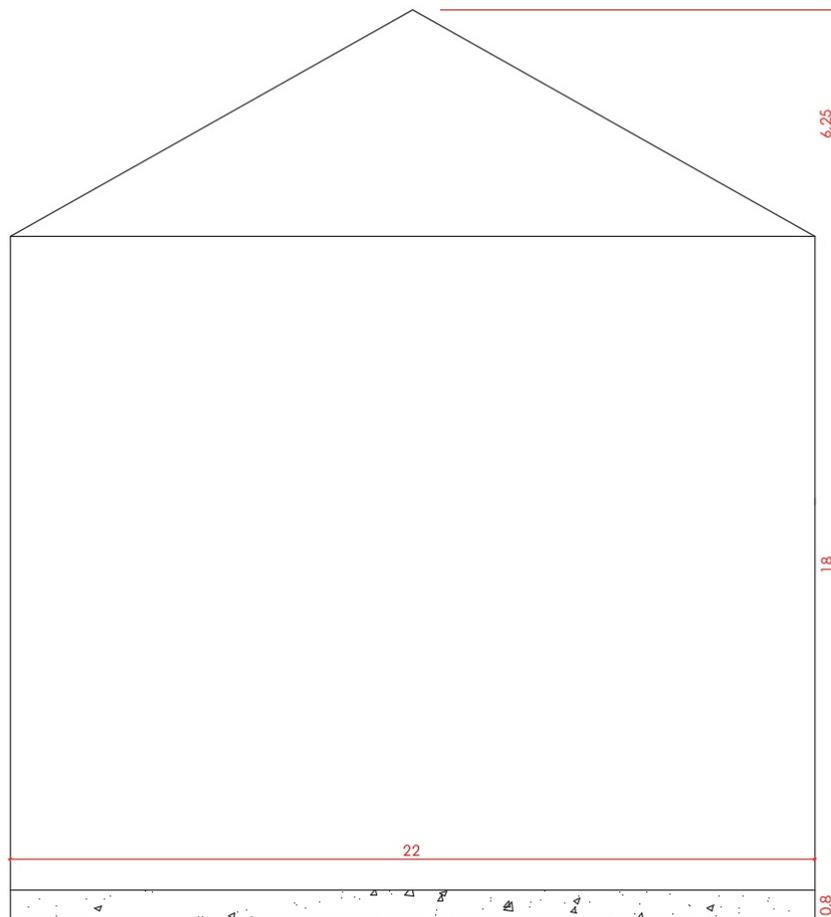
Para o dimensionamento, inicialmente são calculadas as pressões e cargas conforme as diferentes normativas abordadas neste estudo, conforme equacionamento já descrito. Posteriormente, para a obtenção dos esforços resultantes devido aos carregamentos obtidos, foi utilizado o software SAP 2000 V18. Para a modelagem, os elementos foram modelados como elementos de casca com divisões a cada 10° resultando em uma malha composta por diversas áreas, representando a superfície curva do silo. As pressões foram aplicadas nos elementos de área conforme as considerações posteriormente mensuradas. Os esforços obtidos, como momento, cisalhamento e força normal serão utilizados para o correto dimensionamento dos elementos construtivos.

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS DO SILO

O objeto de estudo é um silo que é executado em concreto armado e a cobertura cônica em aço. Sua altura é de 18 metros que são somados à altura da cobertura cônica em aço de 6,25 m, e diâmetro de 22 metros. Sob as paredes do silo, uma viga circular de seção de 45 cm e altura de 80 cm está disposta. Essa viga é apoiada sobre estacas circulares de concreto escavadas a trado, sem uso de lama. Além disso, a base do silo conta com uma laje do tipo radier, que é a base do silo. As características do silo podem ser vistas na Figura 31.

Localizada abaixo do nível do silo, encontra-se uma galeria, a fim de representar o cenário mais comum encontrado nessas construções. Tais galerias são utilizadas para a descarga de grãos, visto que os grãos caem através dos registros de descarga para uma fita ou rosca transportadora. Esses equipamentos, por sua vez, transportam o grão, geralmente até elevadores que destinam o grão para outro ponto da indústria.

Figura 31 - Características do silo



Fonte: elaborado pela autora.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS EMPREGADO

O material utilizado para o dimensionamento do silo é o concreto de classe de resistência de 30 MPa, com módulo de elasticidade de 26,07 GPa calculado conforme o previsto pela NBR 6118: 2023 e coeficiente de poisson de 0,2.

### 3.3 CARREGAMENTOS E COMBINAÇÕES APLICADAS

Inicialmente, deve-se entender os tipos de pressões dos grãos estabelecidas pelas diferentes normas citadas no referencial teórico. Em todas as normativas, é possível mensurar as pressões de carregamento, dos tipos horizontal, de atrito e vertical, bem como as situações de carregamento e descarregamento. As pressões assimétricas de carregamento e descarregamento não serão consideradas, visto que, para o carregamento, é considerada a instalação de um dispositivo espalhador de grãos cuja finalidade é distribuir os grãos de forma

simétrica dentro do silo. Para o descarregamento, por sua vez, são consideradas a instalação de registros de descarga, que com sua abertura feita de maneira correta também não configuram uma descarga assimétrica.

As pressões de carregamento do tipo horizontal dos diferentes tipos de norma podem ser observadas segundo o Quadro 23 e na Figura 32, de acordo com a altura de aplicação. As equações usadas para a determinação do carregamento horizontal das normas ANSI S 4331 (ASAE, 2019), EN 1991-4 (EUROCODE, 2006), ISO 11697 (ISO, 2012) e AS 3774 (2016) são respectivamente dadas pelas Equações 2, 6, 52 e 70. A Equação 6, usada para determinar a pressão horizontal da norma EN 1991-4 (EUROCODE, 2006), depende da determinação das Equações 8, 9, 10 e 11 complementadas por características como o ângulo de repouso dos grãos encontradas no Quadro 2.

A norma ISO 11697 (ISO, 2012) considera a Equação 52 para a determinação das pressões horizontais. Essa equação, por sua vez, depende da determinação das Equações 55 e 54, além disso, os valores dos coeficientes encontrados no Quadro 22 também são ponderados conforme indicado no item 2.3.2.3.2 do presente trabalho. Para o efetivo cálculo da Equação 70 da norma AS 3774 (2016), anteriormente, deve-se determinar os parâmetros das Equações 67 e 68 com valores da função de profundidade de Janssen determinados a partir do Quadro 7.

As variações encontradas resultam das diferenças estipuladas para as características da soja e dos métodos para a obtenção da pressão. Todas as normativas consideram o peso específico, coeficiente de atrito, raio hidráulico (relação entre área e perímetro) e um fator K, que representa uma relação entre pressões laterais e verticais. Esses coeficientes são determinados a partir das características de cada norma e podem ser vistos detalhadamente no Quadro 22.

Quando se trata de particularidades de cada norma, a norma ANSI S 4331 (ASAE, 2019) considera uma constante de gravidade em kN/kg, visto que fornece um peso específico em kg/m<sup>3</sup>. A norma EN 1991-4 (EUROCODE, 2006) recomenda majorar os coeficientes se o silo não pertencer a Classe 1 de avaliação. A norma AS 3774 (2016) tem suas características determinadas em função do ângulo de atrito interno e repouso dos grãos.

Quadro 22 - Características dos grãos de acordo com as normas estudadas

Norma	Peso específico	Coefficiente de atrito	Raio hidráulico	Fator K
ANSI S 4331 (ASAE, 2019)	834 kg/m <sup>3</sup> *0,01kN/kg = 8,34 kN/m <sup>3</sup>	0,4 (Quadro 1)	Área/Perímetro = 5,5m	0,5 (Quadro 1)
EN 1991-4 (EUROCODE, 2006)	7,5 kN/m <sup>3</sup> (Quadro 2)	0,48 * 1,16=0,56 (Quadro 2)	Área/Perímetro = 5,5m	0,63*1,11=0,7 (Quadro 2)
ISO 11697 (ISO, 2012)	8,5 kN/m <sup>3</sup> (Quadros 4 e 5 utilizando o milho como referência)	0,30 (Quadros 4 e 5 utilizando o milho como referência)	Área/Perímetro = 5,5m	0,60 (Quadros 4 e 5 utilizando o milho como referência)
AS 3774 (2016)	8 kN/m <sup>3</sup> (Quadro 8)	$\tan(\varphi_w) =$ $\tan(20^\circ) = 0,36$ (Quadro 8)	$0,25 * d_c =$ $0,25 * 22 =$ 5,5m	0,61 Determinado pela Equação 66, usando $\varnothing_i =$ 32° (Quadro 8)

Fonte: elaborado pela autora.

Quadro 23 - Comparativos entre pressões simétricas horizontais de carregamento entre as diferentes normas  
(continua)

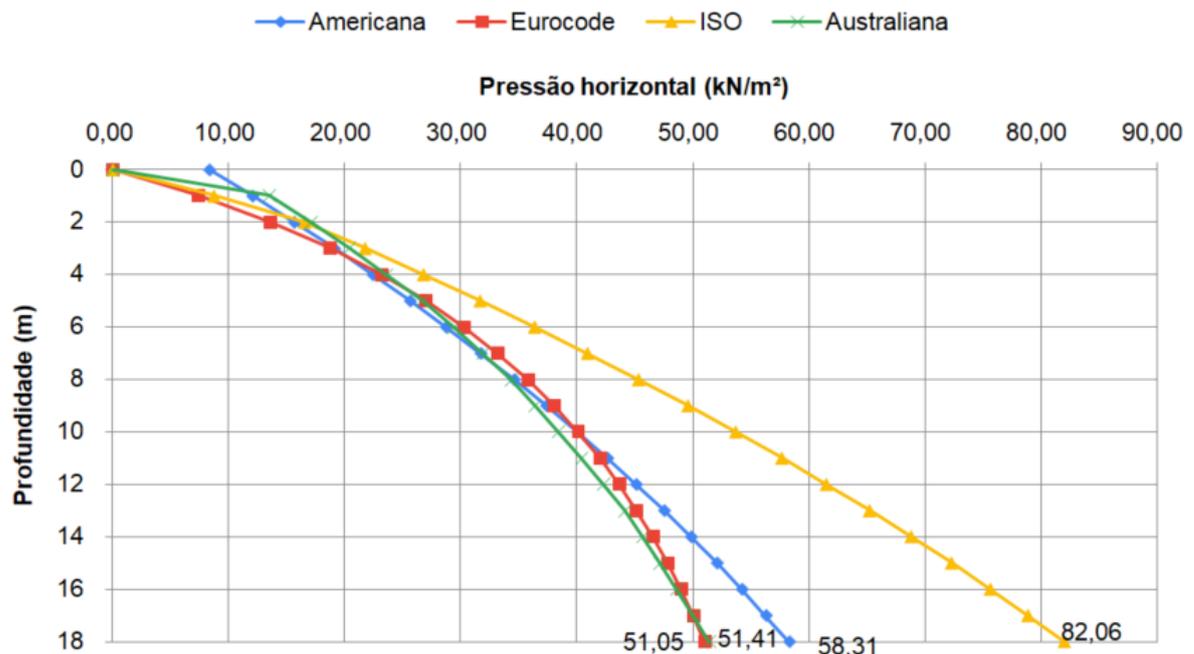
Altura (m)	ANSI S 4331 (ASAE, 2019)	EN 1991-4 (EUROCODE, 2006)	ISO 11697 (ISO, 2012)	AS 3774 (2016)
0	8,33	0,00	0,00	0,00
1	12,04	7,40	8,73	13,47
2	15,62	13,55	16,54	17,10
3	19,08	18,73	21,75	20,39
4	22,41	23,16	26,79	23,58
5	25,62	26,97	31,67	26,66
6	28,72	30,29	36,38	29,40
7	31,71	33,21	40,94	31,94
8	34,49	35,78	45,34	34,35

Quadro 23 - Comparativos entre pressões simétricas horizontais de carregamento entre as diferentes normas (conclusão)

9	37,37	38,08	49,60	36,42
10	40,05	40,13	53,71	38,43
11	42,63	41,98	57,69	40,40
12	45,12	43,65	61,53	42,32
13	47,52	45,17	65,25	44,13
14	49,84	46,56	68,85	45,66
15	52,07	47,82	72,32	47,16
16	54,23	48,99	75,68	48,63
17	56,30	50,06	78,92	50,07
18	58,31	51,05	82,06	51,41

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 32 - Comparativos entre pressões simétricas horizontais de carregamento entre as diferentes normas



Fonte: elaborado pela autora.

Para fins de comparação, foram utilizados os resultados obtidos por Carvalho (2018) em seu trabalho de conclusão de curso. Carvalho (2018) não se baseia pelos valores dos coeficientes dos grãos estipulados pelas normas, mas sim em valores de propriedades obtidas por Cheung (2007), com grãos coletados no estado de São Paulo. Além disso, o silo de seu estudo apresenta menores dimensões e coeficiente de atrito diferentes, visto que considera o uso de chapas

metálicas. As características do seu estudo podem ser vistas nas Figuras 33 e 34, bem como no Quadro 24. Além disso, vale ressaltar que, como seu trabalho é baseado em dados de grãos ensaiados, utiliza dados únicos para as propriedades do grão e não as variações indicadas nas diferentes normas.

Figura 33 - Propriedades dos grãos estipulados por Cheung (2007) e mensurados por Carvalho (2018).

Estatística Básica	Soja		Milho	
	Umidade (%)	Peso específico ( $\gamma$ ) (kN/m <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Peso específico ( $\gamma$ ) (kN/m <sup>3</sup> )
Média	10,99	10,99	13,57	7,90
Desvio	0,24	0,24	0,15	0,21
Máximo	11,50	11,50	13,90	8,54
Mínimo	10,50	10,50	13,20	7,44

Figura 34 - Outras propriedades dos grãos estipulados por Cheung (2007) e mensurados por Carvalho (2018).

Propriedades	Milho	Soja
Coesão (kPa)	0,04	0,23
Ângulo de atrito interno $\phi_i$	29,53	34,81
Efetivo ângulo de atrito interno $\phi_e$	29,78	35,71
Resistência inconfiada (kPa)	0,11	0,84
Resistência confinada (kPa)	10,28	23,73
Ângulo de atrito com a parede $\phi_w$	12,81	10,80

Carvalho (2018) baseou-se nas propriedades das Figuras 33 e 34 e determinou os coeficientes de atrito pela equação de Janssen, idêntica à usada para calcular o coeficiente de atrito pela norma AS 3774 (2016). Os fatores K e os coeficientes de atrito utilizados em seu trabalho podem ser vistos no Quadro 24 e os resultados para as pressões horizontais podem ser vistos na Figura 35, de acordo com cada normativa.

Quadro 24 - Valores de coeficiente de atrito e K.

Norma	Milho	Soja
ISO 11697 (1997)	0,5578	0,4721
EN 1991-4:2006	0,5578	0,4721
AS 3774-1996	0,3500	0,3500
Coeficientes de atrito	0,22738	0,19076

Fonte: Adaptado de CARVALHO (2018).

Figura 35 - Pressões de carregamento horizontais por Carvalho (2018).

Profundidade (m)	Produto / Pressão (kPa)			
	AS		EN e ISO	
	Milho	Soja	Milho	Soja
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
1,0	3,80	10,09	6,01	20,57
2,0	7,50	19,16	11,78	37,24
3,0	11,11	27,34	17,32	50,84
4,0	14,63	34,74	22,64	62,01
5,0	18,06	41,43	27,74	71,23
6,0	21,40	47,49	32,65	78,90
7,0	24,66	53,01	37,36	85,31
8,0	27,84	58,02	41,88	90,70

Fonte: CARVALHO (2018).

Como se pode perceber, a pressão horizontal para as normas australiana, europeia e ISO iniciam zeradas no topo da parede do silo. Isso ocorre devido à linearização que ambas permitem para análise em silos com baixa relação altura/diâmetro. Carvalho (2018) utiliza as Equações de Janssen para embasar seu trabalho. Por outro lado, o presente estudo busca utilizar o equacionamento descrito nas normas. Portanto, devido às propriedades unitárias do grão e ao fato das normas EN e ISO serem baseadas na formulação de Janssen com adaptações, os valores mensurados por Carvalho (2018) para as normas EN e ISO são idênticas para a soja.

Pode-se perceber que as pressões, com exceção à norma americana, que nada menciona sobre a redução das pressões a 0 no seu topo, todas as normativas iniciam em 0, a norma australiana apresenta valores menores inicialmente para as pressões horizontais, o que também acontece nos dados desse estudo.

Para a obtenção da pressão de carregamento de atrito vertical, todas as normas utilizam a multiplicação das pressões horizontais pelo coeficiente de atrito ou diretamente pelas Equações 3, 7, 51 e 75, respectivamente, para as normas americana, europeia, ISO e australiana. As diferenças surgem porque cada norma estabelece coeficientes de atrito que podem diferir, além das diferenças entre as pressões horizontais de cada uma. Os resultados dessas variações podem ser vistos no Quadro 25.

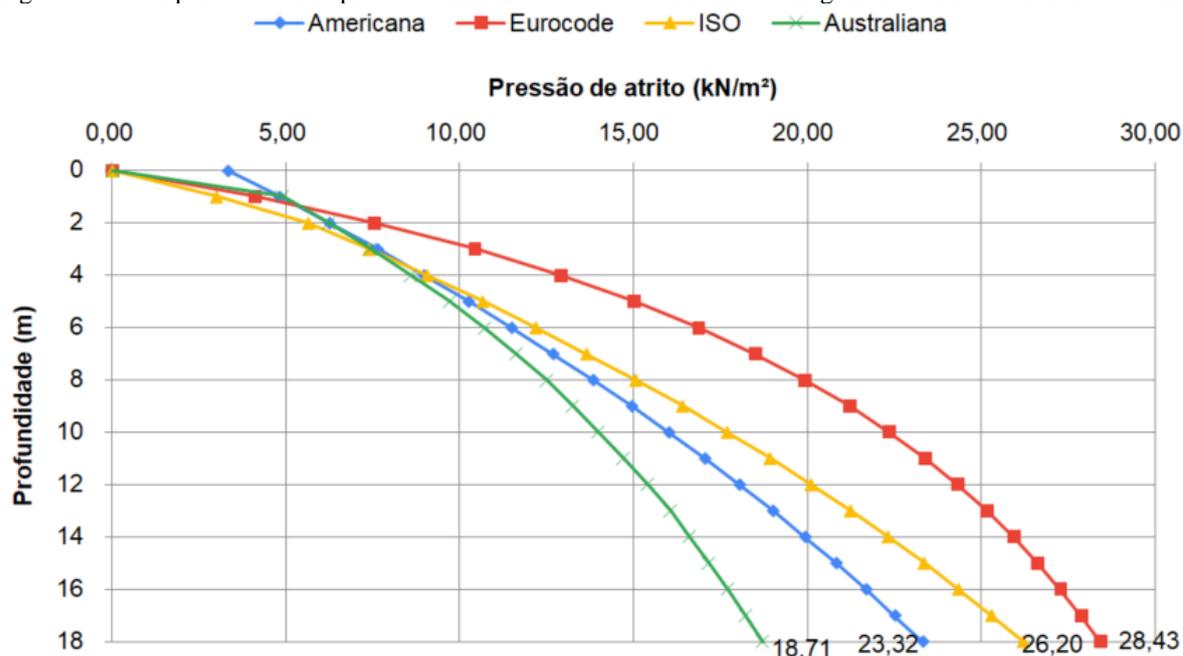
Além disso, na Figura 36, é possível perceber que a pressão de atrito no carregamento das normas ISO 11697 (ISO, 2012) e EN 1991-4 (EUROCODE, 2006) são mais semelhantes entre si e maiores do que os das normas ANSI S 4331 (ASAE, 2019) e AS 3774 (2016), que também são semelhantes entre si, devido aos coeficientes de atrito.

Quadro 25 - Comparativos entre pressões simétricas de atrito vertical de carregamento entre as diferentes normas

Altura (m)	ANSI S 4331 (ASAE, 2019)	EN 1991-4 (EUROCODE, 2006)	ISO 11697 (ISO, 2012)	AS 3774 (2016)
0	3,33	0,00	0,00	0,00
1	4,82	4,12	2,99	4,90
2	6,25	7,55	5,64	6,23
3	7,63	10,43	7,38	7,42
4	8,96	12,89	9,05	8,58
5	10,25	15,02	10,65	9,70
6	11,49	16,87	12,18	10,70
7	12,68	18,49	13,65	11,63
8	13,84	19,92	15,05	12,50
9	14,95	21,20	16,40	13,26
10	16,02	22,35	17,69	13,99
11	17,05	23,38	18,92	14,70
12	18,05	24,31	20,10	15,40
13	19,01	25,15	21,23	16,06
14	19,94	25,92	22,31	16,62
15	20,83	26,63	23,35	17,16
16	21,69	27,28	24,34	17,70
17	22,52	27,88	25,29	18,22
18	23,32	28,43	26,20	18,71

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 36 - Comparativos entre pressões simétricas de atrito vertical de carregamento entre as diferentes normas



Fonte: elaborado pela autora.

Nos cálculos apresentados por Carvalho (2018), é possível perceber a multiplicação dos resultados mostrados na Figura 35 pelos coeficientes de atrito descritos no Quadro 24, o que confirma que a pressão de atrito é dada pela multiplicação do coeficiente de atrito pela pressão horizontal. Os resultados obtidos por Carvalho (2018) podem ser vistos na Figura 37.

Figura 37 - Pressões de carregamento de atrito por Carvalho (2018).

Profundidade (m)	Produto / Pressão (kPa)			
	AS		EN e ISO	
	Milho	Soja	Milho	Soja
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
1,0	0,86	2,29	1,37	4,68
2,0	1,71	4,36	2,68	8,47
3,0	2,53	6,22	3,94	11,56
4,0	3,33	7,90	5,15	14,10
5,0	4,11	9,42	6,31	16,20
6,0	4,87	10,80	7,42	17,94
7,0	5,61	12,05	8,49	19,40
8,0	6,33	13,19	9,52	20,62

Fonte: Carvalho (2018).

As pressões verticais no fundo do silo variam conforme a norma analisada. A norma EN 1991-4 (EUROCODE, 2006) e a ANSI S 4331 (ASAE, 2019) consideram a pressão igual para toda a base do silo conforme Equações 45 e 1, respectivamente. A norma ISO 11697 (ISO,

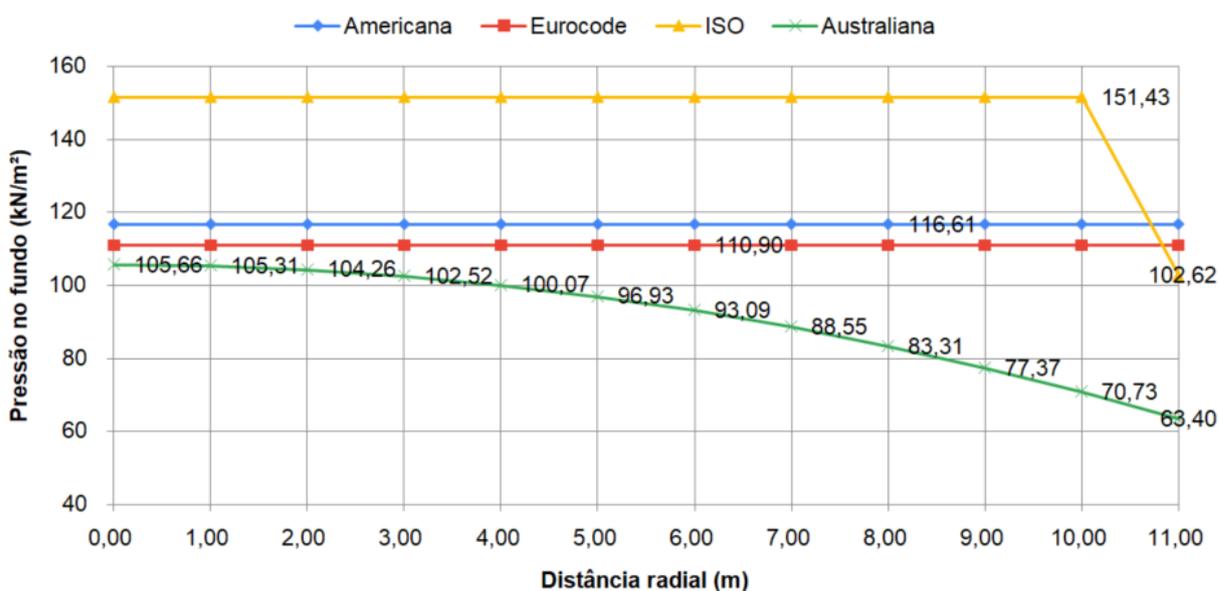
2012) considera que em toda base a pressão pode ser calculada de acordo com a Equação 53 considerando  $z=h$  e que nas paredes  $z$  é igual 1,5 do diâmetro do silo. A norma AS 3774 (2016) determina essa pressão de acordo com a Equação 78. No Quadro 26, é possível analisar essas pressões de acordo com a distância do centro do silo, conforme exemplificado na Figura 20. O mesmo pode ser visto graficamente pela Figura 38.

Quadro 26 - Comparativos entre pressões no fundo do silo pelas diferentes normas.

<b>Coordenada radial (m)</b>	ANSI S 4331 (ASAE, 2019)	EN 1991-4 (EUROCODE, 2006)	ISO 11697 (ISO, 2012)	AS 3774 (2016)
0	116,61	110,90	151,4322363	105,6604908
1	116,61	110,90	151,4322363	105,3111999
2	116,61	110,90	151,4322363	104,2633273
3	116,61	110,90	151,4322363	102,5168729
4	116,61	110,90	151,4322363	100,0718368
5	116,61	110,90	151,4322363	96,92821885
6	116,61	110,90	151,4322363	93,08601918
7	116,61	110,90	151,4322363	88,54523776
8	116,61	110,90	151,4322363	83,30587458
9	116,61	110,90	151,4322363	77,36792964
10	116,61	110,90	151,4322363	70,73140294
11	116,61	110,90	102,6176016	63,39629449

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 38 - Comparativos entre pressões no fundo do silo pelas diferentes normas.



Os resultados obtidos por Carvalho (2018) são consistentes com os obtidos no presente estudo, como ilustrado na Figura 39. A norma australiana não apresenta uma variação linear, ela varia de acordo com a distância da coordenada radial, conforme a Equação 78, já a norma europeia permanece constante em toda a base. A norma ISO apresenta uma queda na pressão ao atingir as paredes do silo.

Figura 39 - Pressões no fundo obtidas por Carvalho (2018)

Coordenada radial (m)	Produto / Pressão (kPa)					
	ISO		EN		AS	
	Milho	Soja	Milho	Soja	Milho	Soja
0,0	123,47	96,21	104,85	78,23	109,90	79,00
2,0	123,47	96,21	104,85	78,23	107,15	77,03
4,0	123,47	96,21	104,85	78,23	98,91	71,10
6,0	123,47	96,21	104,85	78,23	85,17	61,23
8,0	123,47	96,21	104,85	78,23	65,94	47,40
10,0	75,07	56,44	104,85	78,23	41,21	29,63

Fonte: Carvalho (2018).

Para as pressões horizontais simétricas de descarregamento, as normas ANSI S 4331 (ASAE, 2019), EN 1991-4 (EUROCODE, 2006) e ISO 11697 (ISO, 2012) determinam que no caso testado as pressões de descarregamento são iguais às de carregamento. A norma AS 3774 (2016), no entanto, utiliza as pressões de carregamento simétrico multiplicadas por “multiplicadores de fluxo”, que variam conforme o tipo de fluxo, esse fator para o presente

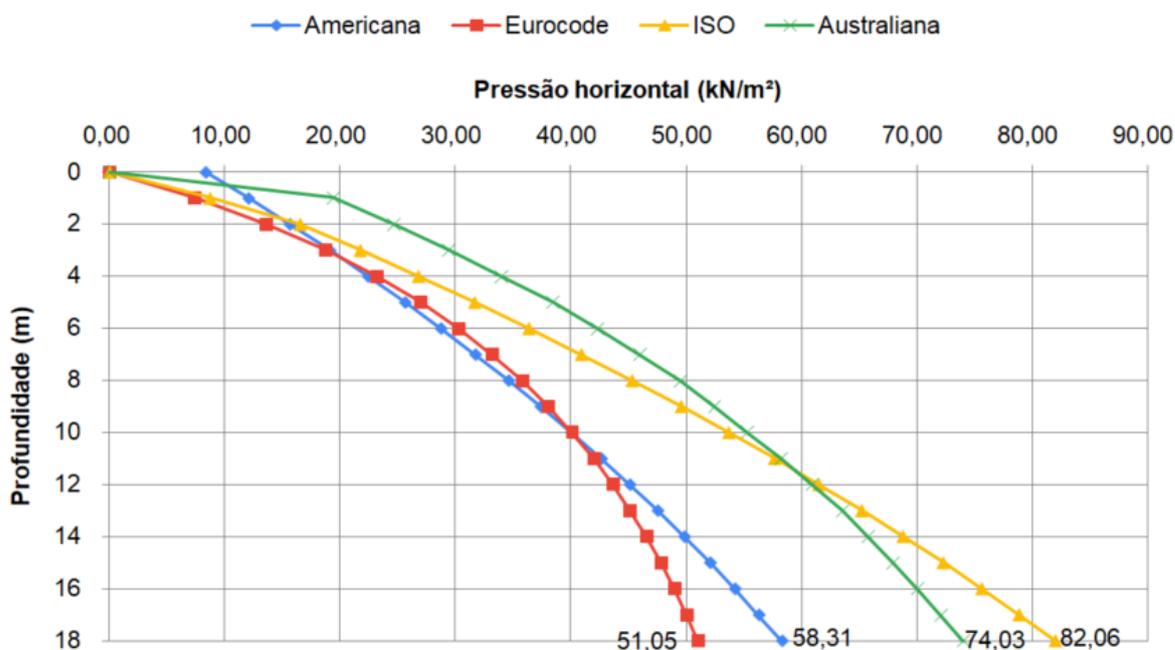
estudo é de 1,44. Carvalho (2018), por considerar outro padrão de fluxo, utiliza o multiplicador de fluxo de 1,20. Os resultados para o presente estudo podem ser vistos no Quadro 27 e graficamente na Figura 40, já os resultados de Carvalho (2018) podem ser vistos na Figura 41.

Quadro 27 - Comparativos entre pressões simétricas horizontais de descarregamento entre as diferentes normas

Altura (m)	ANSI S 4331 (ASAE, 2019)	EN 1991-4 (EUROCODE, 2006)	ISO 11697 (ISO, 2012)	AS 3774 (2016)
0	8,33	0,00	0,00	0,00
1	12,04	7,40	8,73	19,39
2	15,62	13,55	16,54	24,63
3	19,08	18,73	21,75	29,37
4	22,41	23,16	26,79	33,95
5	25,62	26,97	31,67	38,39
6	28,72	30,29	36,38	42,34
7	31,71	33,21	40,94	46,00
8	34,59	35,78	45,34	49,47
9	37,37	38,08	49,60	52,44
10	40,05	40,13	53,71	55,34
11	42,63	41,98	57,69	58,18
12	45,12	43,65	61,53	60,94
13	47,52	45,17	65,25	63,55
14	49,84	46,56	68,85	65,75
15	52,07	47,82	72,32	67,91
16	54,23	48,99	75,68	70,03
17	56,30	50,06	78,92	72,10
18	58,31	51,05	82,06	74,03

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 40 - Comparativos entre pressões simétricas horizontais de descarregamento entre as diferentes normas



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 41 - Pressões simétricas horizontais de descarregamento obtidas por Carvalho (2018)

Profundidade	Produto / Pressão (kPa)			
	AS		EN e ISO	
	Milho	Soja	Milho	Soja
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
1,0	4,56	12,10	6,01	20,57
2,0	9,00	22,99	11,78	37,24
3,0	13,33	32,81	17,32	50,84
4,0	17,55	41,68	22,64	62,01
5,0	21,67	49,71	27,74	71,23
6,0	25,68	56,99	32,65	78,90
7,0	29,59	63,61	37,36	85,31
8,0	33,41	69,63	41,88	90,70

Fonte: CARVALHO (2018).

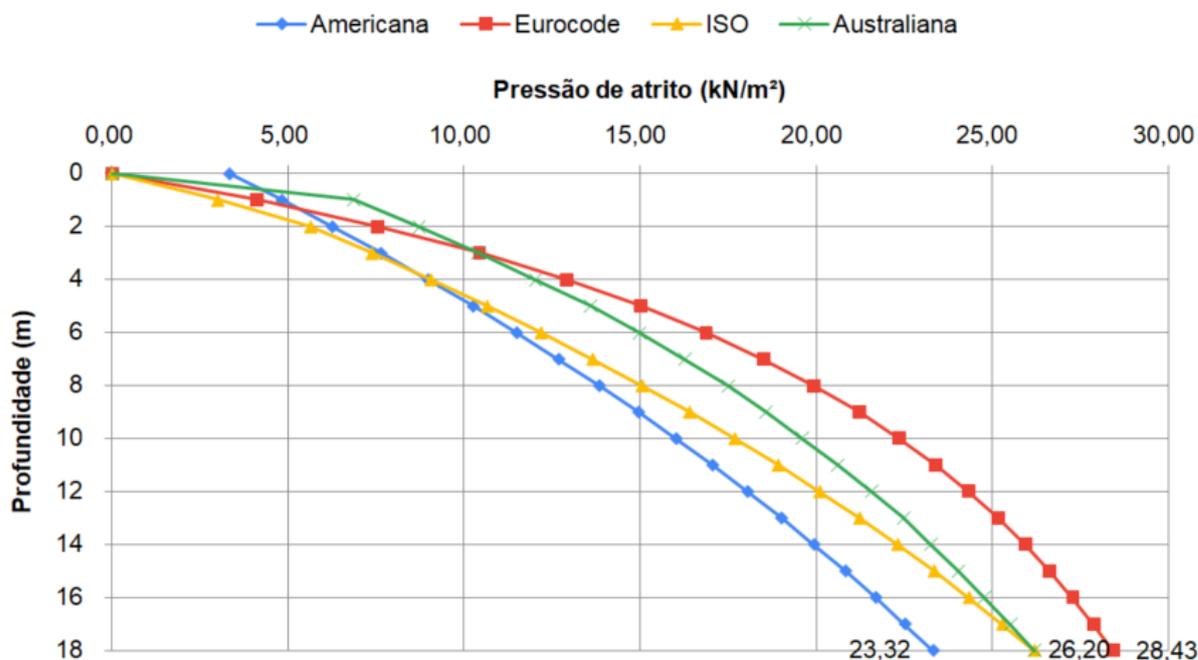
A mesma situação se repete para a pressão de atrito vertical no descarregamento, onde a norma AS 3774 (2016) é a única que difere os valores de descarregamento dos de carregamento devido à multiplicação da pressão de atrito no carregamento por multiplicadores de fluxo, igual a 1,4 para o caso estudado. Os resultados obtidos podem ser vistos no Quadro 28 e graficamente na Figura 42. Carvalho (2018) também utiliza os coeficientes multiplicadores de fluxo, porém, de 1,2 para o seu caso de estudo, conforme Figura 43.

Quadro 28 - Comparativos entre pressões simétricas de atrito vertical no descarregamento entre as diferentes normas

Altura (m)	ANSI S 4331 (ASAE, 2019)	EN 1991-4 (EUROCODE, 2006)	ISO 11697 (ISO, 2012)	AS 3774 (2016)
0	3,33	0,00	0,00	0,00
1	4,82	4,12	2,99	6,86
2	6,25	7,55	5,64	8,72
3	7,63	10,43	7,38	10,39
4	8,96	12,89	9,05	12,01
5	10,25	15,02	10,65	13,59
6	11,49	16,87	12,18	14,98
7	12,68	18,49	13,65	16,28
8	13,84	19,92	15,05	17,51
9	14,95	21,20	16,40	18,56
10	16,02	22,35	17,69	19,58
11	17,05	23,38	18,92	20,59
12	18,05	24,31	20,10	21,57
13	19,01	25,15	21,23	22,49
14	19,94	25,92	22,31	23,27
15	20,83	26,63	23,35	24,03
16	21,69	27,28	24,34	24,78
17	22,52	27,88	25,29	25,51
18	23,32	28,43	26,20	26,20

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 42 - Comparativos entre pressões simétricas de atrito vertical no descarregamento entre as diferentes normas



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 43 - Pressões simétricas de atrito de descarregamento obtidas por Carvalho (2018).

Profundidade	Produto / Pressão (kPa)			
	AS		EN e ISO	
	Milho	Soja	Milho	Soja
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
1,0	1,04	2,31	1,37	3,92
2,0	2,05	4,39	2,68	7,10
3,0	3,03	6,26	3,94	9,70
4,0	3,99	7,95	5,15	11,83
5,0	4,93	9,48	6,31	13,59
6,0	5,84	10,87	7,42	15,05
7,0	6,73	12,13	8,49	16,27
8,0	7,60	13,28	9,52	17,30

Fonte: Carvalho (2018).

As pressões verticais na base do silo permanecem inalteradas durante o descarregamento, independente da norma aplicada. A carga vertical por unidade de comprimento ao longo do perímetro é aplicada na base das paredes, resultado das forças de atrito. Os valores dessas cargas para as normas americana, europeia, ISO e australiana são calculadas pelas Equações 5, 15, 56 e 77, respectivamente.

O carregamento vertical no anel do silo também apresenta duas situações de análise, para carregamento e descarregamento. Esse carregamento para as normas ANSIS 4331 (ASAE,

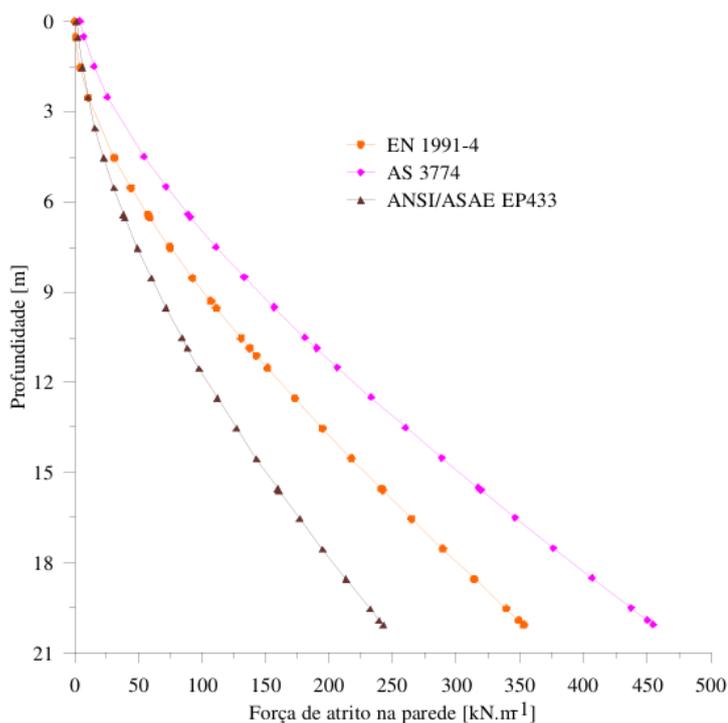
2019), EN 1991-4 (EUROCODE, 2006) e ISO 11697 (ISO, 2012) são iguais para ambos os casos. Apenas haverá divergências entre essas situações na norma australiana devido à consideração dos multiplicadores de fluxo. Os resultados para essa análise podem ser vistos no Quadro 29. Como referência, utilizaram-se os resultados obtidos por Fank (2017), cujo estudo baseia-se em grãos de milho, apresentando características semelhantes ao presente estudo. Os resultados obtidos por Fank (2017) podem ser vistos nas Figuras 44 e 45.

Quadro 29 - Carga vertical na base do silo em kN/m

	ANSI S 4331 (ASAE, 2019)	EN 1991-4 (EUROCODE, 2006)	ISO 11697 (ISO, 2012)	AS 3774 (2016)
Carga vertical em kN/m no carregamento	262,93	296,49	370,71	420,23
Carga vertical em kN/m no descarregamento	262,93	296,49	370,71	588,32

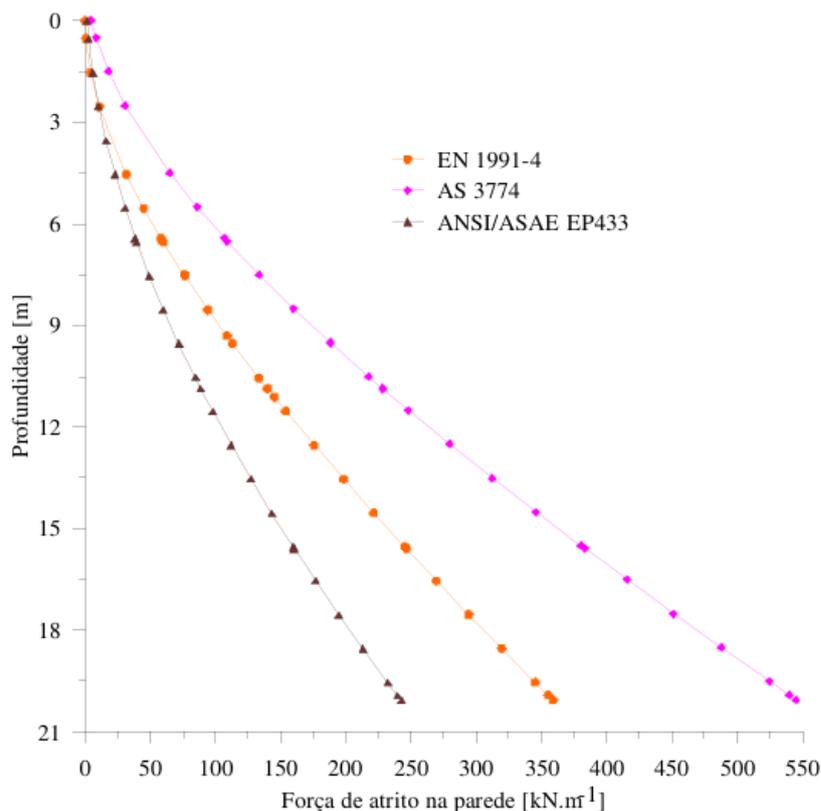
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 44 - Carga vertical no carregamento em kN/m obtidas por Fank (2017).



Fonte: FANK (2017).

Figura 45 - Carga vertical no descarregamento em kN/m obtidas por Fank (2017).



Fonte: FANK (2017).

As cargas de vento, por sua vez, variam conforme o ângulo  $\beta$  de incidência, que influencia diretamente o coeficiente de pressão externo, e também pela altura do silo, que influencia o fator topográfico S2. Esse fator impacta as velocidades características do vento e a pressão dinâmica para cada faixa de altura. No Quadro 30, é possível analisar, de acordo com o ângulo de incidência e altura  $z$  do silo, a força por faixa de área.

Quadro 30 - Pressões do vento

(continua)

		$z \leq 5$	$5 < z \leq 10$	$10 < z \leq 15$	$15 < z \leq 20$
		$v_k = 35,95 \text{ m/s}$	$v_k = 38,46 \text{ m/s}$	$v_k = 40,13 \text{ m/s}$	$v_k = 41,38 \text{ m/s}$
		$q = 79,22 \text{ kgf/m}^2$	$q = 90,65 \text{ kgf/m}^2$	$v_k = 98,71 \text{ kgf/m}^2$	$v_k = 104,97 \text{ kgf/m}^2$
$\beta$	$C_{pe}$	Força por faixa de área (kN/m <sup>2</sup> )			
0	1	0,79	0,91	0,99	1,05

Quadro 30 - Pressões do vento

(conclusão)

10	0,9	0,71	0,82	0,89	0,94
20	0,7	0,55	0,63	0,69	0,73
30	0,4	0,32	0,36	0,39	0,42
40	0	0,00	0,00	0,00	0,00
50	-0,4	-0,32	-0,36	-0,39	-0,42
60	-0,8	-0,63	-0,73	-0,79	-0,84
70	-1,1	-0,87	-1,00	-1,09	-1,15
80	- 1,05	-0,83	-0,95	-1,04	-1,10
90	- 0,85	-0,67	-0,77	-0,84	-0,89
100	- 0,65	-0,51	-0,59	-0,64	-0,68
120	- 0,35	-0,28	-0,32	-0,35	-0,37
140	-0,3	-0,24	-0,27	-0,30	-0,31
160	-0,3	-0,24	-0,27	-0,30	-0,31
180	-0,3	-0,24	-0,27	-0,30	-0,31

Fonte: elaborado pela autora.

A carga de empuxo exerce efeitos sobre as paredes da galeria devido a força horizontal resultante das ações em um maciço de solo. Essa carga é calculada em função da sobrecarga aplicada, ou seja, a pressão de fundo para cada tipo de norma, e as características do solo, como o peso específico, ângulo de atrito e coesão. Neste estudo, essas características foram determinadas através do índice de resistência à penetração (N-SPT) em função do tipo de solo na cota de assentamento da galeria.

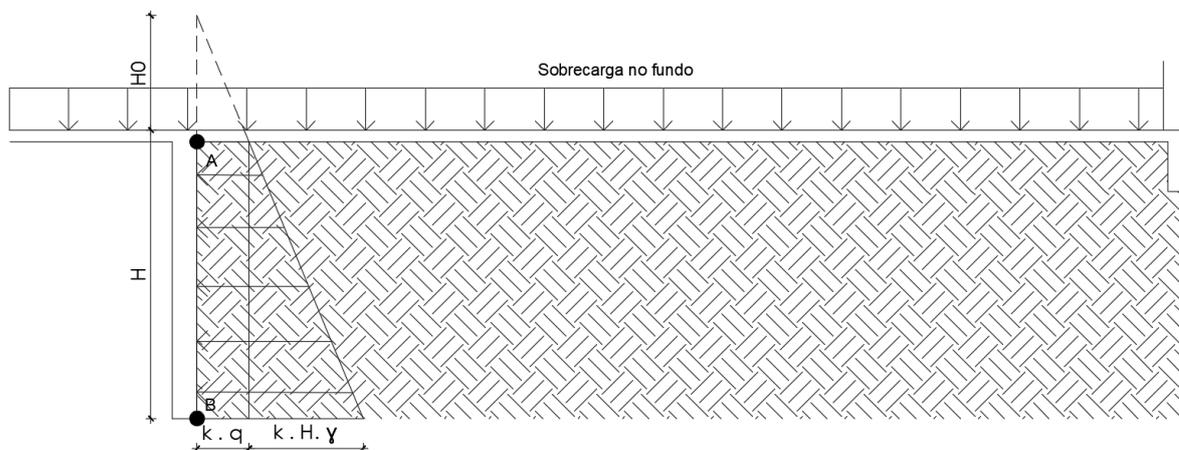
Os valores utilizados para as características do solo são 16 kN/m<sup>3</sup> para o peso específico e 25,95° para o ângulo de atrito interno. Esses valores foram usados para calcular as tensões verticais e o fator  $k$ , de proporção entre as tensões verticais e horizontais para o empuxo ativo, resultando em um valor de 0,49.

Vale lembrar que os esforços serão aplicados horizontalmente, no entanto, é necessário calcular inicialmente as tensões verticais e, posteriormente, transformá-las em tensões horizontais utilizando um o fator  $k$  conforme Equação 94. Os resultados obtidos para esses

esforços podem ser observados no Quadro 31, onde o ponto A refere-se à parte de cima da galeria e o ponto B à parte inferior, conforme Figura 46.

As pressões do solo variaram de acordo com as diferentes normas avaliadas para os grãos porque a pressão no fundo do silo provoca uma sobrepressão lateral na galeria do silo.

Figura 46 - Distribuição do empuxo



Fonte: elaborado pela autora.

Quadro 31 - Empuxos na galeria

Normativa	Tensão Vertical no ponto A (kN/m <sup>2</sup> )	Tensão Vertical no ponto B (kN/m <sup>2</sup> )	Tensão Horizontal no ponto A (kN/m <sup>2</sup> )	Tensão Horizontal no ponto B (kN/m <sup>2</sup> )
ANSI S 4331 (ASAE, 2019)	116,61	161,41	56,74	78,54
EN 1991-4 (EUROCODE, 2006)	110,90	155,70	53,96	75,76
ISO 11697 (ISO, 2012)	151,43	196,23	73,68	95,48
AS 3774 (2016)	105,66	150,46	51,41	73,21

Fonte: elaborado pela autora.

Para a distribuição de carregamentos é possível notar que no topo, já haverá uma tensão horizontal decorrente das tensões verticais existentes no fundo do silo. Conforme aumenta-se a profundidade, a tensão horizontal aumenta devido à força exercida pelo solo, formando uma configuração de carga trapezoidal.

Para a determinação dos coeficientes de mola do radier, utiliza-se o Quadro 17 para estabelecer a tensão admissível com base no tipo de solo na primeira camada, que corresponde ao solo sobre o qual será assentado. Assim, obtém-se uma tensão admissível de 0,1 MPa considerando o silte medianamente compactado. Descoberta a tensão admissível, é possível obter o coeficiente de mola a partir do Quadro 18. O coeficiente de mola para uma tensão admissível de 1 kgf/cm<sup>2</sup> é de 2,2 kgf/cm<sup>3</sup>.

Para cada normativa utilizada, serão obtidos esforços diferentes no topo da estaca, portanto, os coeficientes utilizados para as estacas em cada normativa, seguindo os passos descritos das Equações 99 a 102, são mostrados no Quadro 32. A posição das estacas pode ser vista na Figura 47, onde é representada as estacas do anel (nível de referência) e estacas da galeria. As estacas da galeria são representadas com seu nome e indicação de nível (-2,8m), como pode ser visto na estaca de n°1147, que está localizada na fundação da galeria.

Quadro 32 - Coeficientes de mola aplicados nas estacas do anel

(continua)

N° da estaca	ANSI S 4331 (ASAE, 2019)		EN 1991-4 (EUROCODE, 2006)		ISO 11697 (ISO, 2012)		AS 3774 (2016)	
	Reação (tf)	CRV (kN/m)	Reação (tf)	CRV (kN/m)	Reação (tf)	CRV (kN/m)	Reação (tf)	CRV (kN/m)
2	358,44	1128082,99	399,91	1127950,30	440,18	1127831,33	430,54	1127859,82
7	358,45	1128072,97	399,96	1127950,20	440,15	1127831,41	430,52	1127859,86
11	357,98	1128074,36	399,55	1127951,40	439,56	1127833,15	430,10	1127861,10
15	357,52	1128075,71	399,16	1127952,60	439,01	1127834,78	429,71	1127862,25
19	356,74	1128078,03	398,54	1127954,40	437,36	1127839,67	429,20	1127863,76
23	356,69	1128078,18	398,48	1127954,60	437,28	1127839,90	429,13	1127863,97
27	357,44	1128075,95	399,06	1127952,90	438,88	1127835,16	429,63	1127862,50
31	358,14	1128073,83	399,70	1127951,00	439,76	1127832,56	430,24	1127860,71
35	358,56	1128072,64	400,09	1127949,80	440,31	1127830,95	430,62	1127859,59
39	358,49	1128072,84	400,02	1127950,00	440,20	1127831,27	430,55	1127859,77
43	358,36	1128073,23	399,90	1127950,40	440,01	1127831,82	430,44	1127860,10

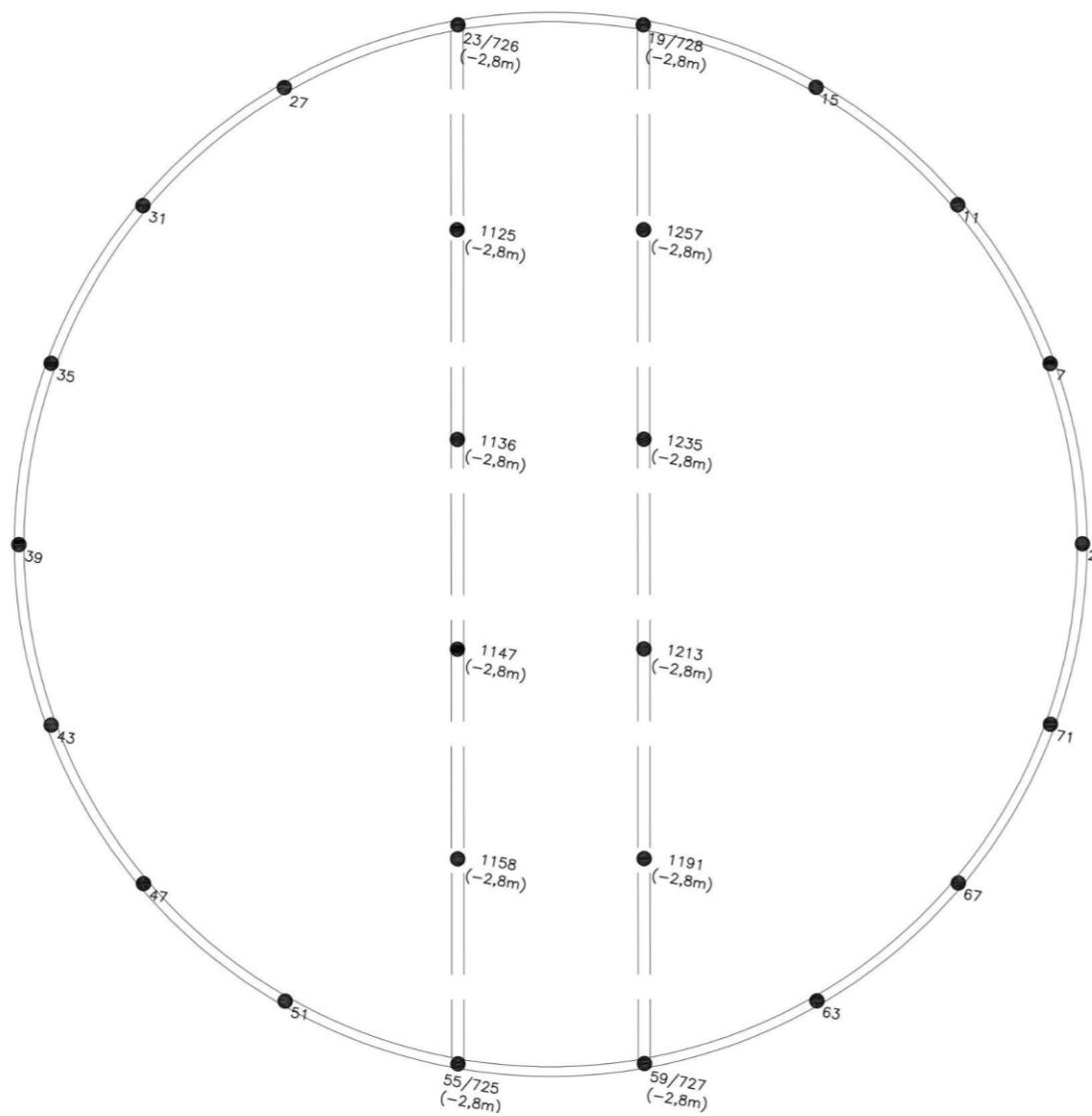
Quadro 32 - Coeficientes de mola aplicados nas estacas do anel

(conclusão)

47	357,88	1128074,65	399,45	1127951,70	439,39	1127833,65	430,01	1127861,38
51	358,11	1128073,99	399,66	1127951,10	439,70	1127832,74	430,18	1127860,87
55	356,42	1128078,99	398,16	1127955,50	436,87	1127841,11	428,84	1127864,84
59	356,86	1128077,68	398,58	1127954,30	437,43	1127839,46	429,25	1127863,62
63	357,39	1128076,09	398,97	1127953,10	438,78	1127835,47	429,55	1127862,74
67	358,12	1128073,95	399,62	1127951,20	439,72	1127832,67	430,21	1127860,78
71	358,44	1128073,00	399,94	1127950,30	440,26	1127831,08	430,61	1127859,61
725	17,16	1129084,93	16,78	1129086,10	25,72	1129059,49	22,72	1129068,42
726	17,14	1129085,00	16,76	1129086,10	25,69	1129059,58	22,69	1129068,48
727	17,10	1129085,10	16,73	1129086,21	25,65	1129059,70	22,66	1129068,57
728	17,11	1129085,09	16,73	1129086,21	25,65	1129059,70	22,66	1129068,57
1125	8,03	1129112,07	8,04	1129112,05	7,98	1129112,22	8,04	1129112,03
1136	7,41	1129113,91	7,47	1129113,73	7,02	1129115,06	7,51	1129113,60
1147	7,41	1129113,92	7,47	1129113,74	7,02	1129115,07	7,51	1129113,60
1158	8,03	1129112,07	8,04	1129112,05	7,98	1129112,22	8,04	1129112,03
1191	8,03	1129112,07	8,04	1129112,05	7,98	1129112,21	8,04	1129112,03
1213	7,41	1129113,90	7,47	1129113,72	7,03	1129115,04	7,52	1129113,58
1235	7,41	1129113,90	7,47	1129113,72	7,03	1129115,04	7,52	1129113,58
1257	8,03	1129112,07	8,04	1129112,05	7,98	1129112,21	8,04	1129112,09

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 47 - Posição das estacas



Fonte: elaborado pela autora.

## 4 RESULTADOS

Para este estudo, o dimensionamento da estrutura foi realizado conforme a norma brasileira. De acordo com essa norma, para silos em que não ocorra fluxo de massa e cujas cargas e descargas gerem distribuições simétricas de pressão nas paredes do silo, a metodologia a ser seguida é o que estipula a norma a ANSI/ASAE S433.1 (2019). Portanto, o estudo considerou os resultados obtidos através do modelo dessa metodologia.

Inicialmente, a área de aço vertical foi determinada a partir de uma relação de multiplicação entre coeficientes pela área da seção transversal ( $A,t$ ). A área da seção transversal considerada é de  $4,5m^2$ , obtida pela multiplicação entre a espessura da parede de 25 cm e os 18m de altura do silo. Enquanto a norma ACI 313 (1997) e os autores Safarian e Haris (1998) consideram áreas de aço para armadura interna e externa, o Eurocode (2004) considera uma faixa mínima e máxima de área de aço que pode ser usada para armar verticalmente a estrutura. Os resultados podem ser vistos no Quadro 33.

Para a área de aço vertical, no Quadro 33, é possível observar a divisão da área de aço por um valor de 21,89 metros, que corresponde ao diâmetro do silo, descontando cobrimentos de 3 cm, a armadura horizontal de 16 mm e a armadura vertical de 16 mm. Optou-se, portanto, por utilizar a maior armadura de aço, ou seja,  $176,3\text{ cm}^2$  com 4 barras de aço de 12.5 mm para armadura externa e 4 barras de 10 mm para armadura interna, por metro de diâmetro.

Quadro 33 - Cálculo da área de aço vertical

	ACI		Safarian e Haris		Eurocode	
	Armadura Interna	Armadura Externa	Armadura Interna	Armadura Externa	Mín.	Máx.
	$0,001*A,t$	$0,0015*A,t$	$0,0015*A,t$	$0,002*A,t$	$0,002*A,t$	$0,04*A,t$
$A,v\text{ (cm}^2\text{)}$	45,0	67,5	67,5	90,0	90,0	1800
$A,v$ para cada metro de diâmetro ( 21,89m)	2,06	3,08	3,08	4,11	2,06	41,11
$Av$ , adotada por metro	3 $\Phi$ 10.0	4 $\Phi$ 10.0	4 $\Phi$ 10.0	4 $\Phi$ 12.5	4 $\Phi$ 12.5	14 $\Phi$ 20.0
$Av$ , adotada ( $\text{cm}^2$ )	68,80	51,6	107,5	68,8	107,5	963,78
$Av$ , total ( $\text{cm}^2$ )	120,4		176,3		-	

Fonte: elaborado pela autora.

Em um segundo momento, determinou-se a armadura horizontal das paredes do silo. A análise foi realizada por metro linear de altura, onde para cada faixa se extraiu do SAP2000 a força em kN/m. Inicialmente, determinou-se a área de aço mínima, que pode ser obtida conforme o proposto pelas normas ACI 313 (1997), pelos autores Safarian e Haris (1998) e pelo Eurocode (2004). Todas as proposições consideram a multiplicação da área da seção transversal por um coeficiente, além disso, o Eurocode estipula também que essa área de aço horizontal mínima deve ser de no mínimo 25% da área de aço vertical. Optou-se, portanto, por adotar a maior área de aço entre todas essas proposições, a fim de ir a favor da segurança, ou seja, 3,75 cm<sup>2</sup>, ou 5  $\Phi$  10 /m. Os resultados obtidos podem ser vistos no Quadro 34.

Quadro 34 - Armadura horizontal mínima

	ACI	Safarian e Haris	Eurocode	
Relação proposta	0,0025*A,t	0,003*A,t	0,001A,t	25% A,v
As, mín (cm <sup>2</sup> ) =	112,5	135	45	44,08
As para cada anel (18m) (cm <sup>2</sup> ) =	6,25	7,5	2,5	2,45
As, mín para cada face do anel (cm <sup>2</sup> ) =	3,125	3,75	1,23	1,25

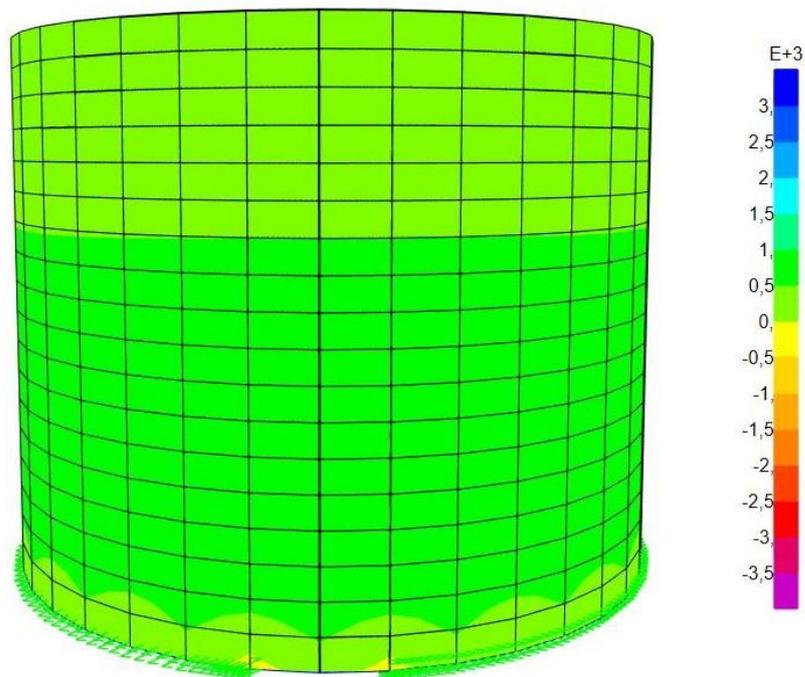
Fonte: elaborado pela autora.

Com a armadura horizontal mínima determinada, iniciou-se o dimensionamento da armadura horizontal. Ao analisar as forças atuantes no silo, utilizam-se as combinações últimas para avaliar a situação mais crítica, que considera a carga do grão como ação variável principal e as forças em situação de descarregamento. A partir da obtenção da força máxima atuante por anel, é possível obter a área de aço necessária por faixa de altura através da Equação 105. Tal área de aço é dividida em duas camadas: uma externa e outra interna. A partir disso, determina-se a quantidade de aço necessária para atender a força no anel.

Vale lembrar que a armadura de aço horizontal deverá atender a análise quanto à fissuração, que posteriormente será analisada. A armadura de aço apresentada a seguir já sofreu as correções necessárias para atender os limites de fissuração. Em alguns casos, a armadura

obtida pela Equação 105 não atendia aos requisitos de fissuração devido ao espaçamento maior entre barras ou um diâmetro menor do que o estipulado na Figura 26. Vale salientar que, para a análise de fissuração, em nenhum caso foi necessário calcular a abertura de fissuras, apenas com o controle do diâmetro e espaçamento, a verificação de fissuras foi atendida. Os resultados obtidos para armadura horizontal podem ser vistos no Quadro 35 e a distribuição dos esforços pode ser analisada na Figura 49.

Figura 48 – Força última nas paredes



Fonte: elaborado pela autora.

Quadro 35 - Armadura horizontal adotada

(continua)

Altura inicial (m)	Altura Final (m)	F (kN/m)	As (cm <sup>2</sup> /m)	As por face (cm <sup>2</sup> )	Aço escolhido	As, h adotada	Esp. (cm)
0,00	1,00	387,99	8,92	4,46	9 $\Phi$ 10,0	6,280	10
1,00	2,00	517,34	11,90	5,95	4 $\Phi$ 16	8,044	23
2,00	3,00	757,8	17,43	8,71	5 $\Phi$ 16	10,055	18
3,00	4,00	871,6	20,05	10,02	5 $\Phi$ 16	10,055	18
4,00	5,00	884,13	20,33	10,17	6 $\Phi$ 16	12,066	15
5,00	6,00	871,54	20,05	10,02	5 $\Phi$ 16	10,055	18

Quadro 35 – Armadura horizontal adotada

(conclusão)

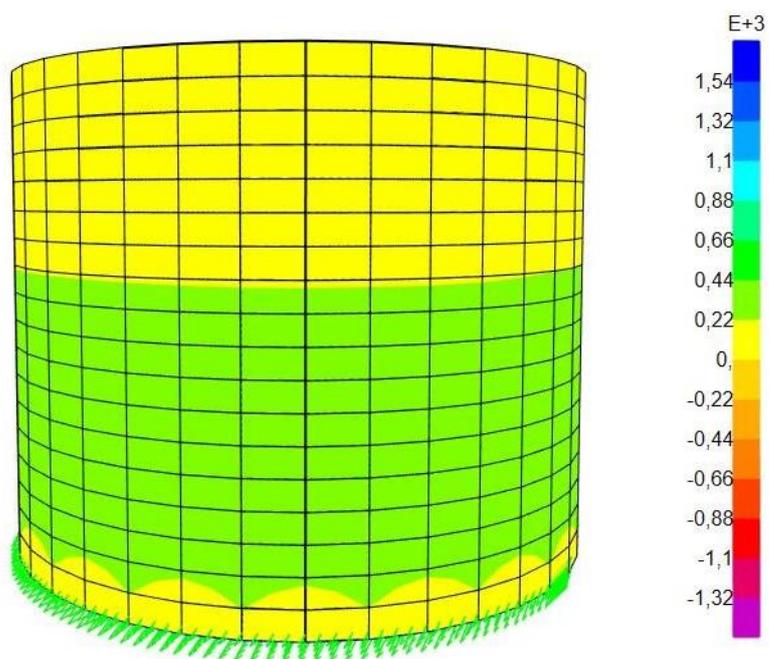
6,00	7,00	760,42	17,49	8,74	5 $\Phi$ 16	10,055	18
7,00	8,00	712,3	16,38	8,19	5 $\Phi$ 16	10,055	18
8,00	9,00	670,45	15,42	7,71	4 $\Phi$ 16	8,044	23
9,00	10,00	629,34	14,47	7,24	4 $\Phi$ 16	8,044	23
10,00	11,00	585	13,46	6,73	4 $\Phi$ 16	8,044	23
11,00	12,00	538,4	12,38	6,19	4 $\Phi$ 16	8,044	23
12,00	13,00	489,65	11,26	5,63	4 $\Phi$ 16	8,044	23
13,00	14,00	441,45	10,15	5,08	4 $\Phi$ 16	8,044	23
14,00	15,00	390,1	8,97	4,49	4 $\Phi$ 16	8,044	23
15,00	16,00	336,77	7,75	3,87	5 $\Phi$ 10	3,925	19
16,00	17,00	279,03	6,42	3,21	5 $\Phi$ 10	3,925	19
17,00	18,00	217,04	4,99	2,50	5 $\Phi$ 10	3,925	19

Fonte: elaborado pela autora.

A verificação quanto à fissuração atendeu todos os critérios estabelecidos. A verificação da fissuração é feita analisando os esforços obtidos nas combinações de serviço, sendo que a que apresentou a situação mais crítica foi a que considera a carga do grão como sendo a ação variável principal em situação de descarregamento. Vale salientar que o controle de fissuração só é atendido desde que a armadura e o espaçamento tenham um controle rigoroso na execução. Após a obtenção da situação mais crítica de forças e de momentos para o Estado Limite de Serviço, obteve-se a tensão no aço através da Equação 106. Os esforços de serviço como a força e o momento podem ser vistos nas Figuras 49 e 50.

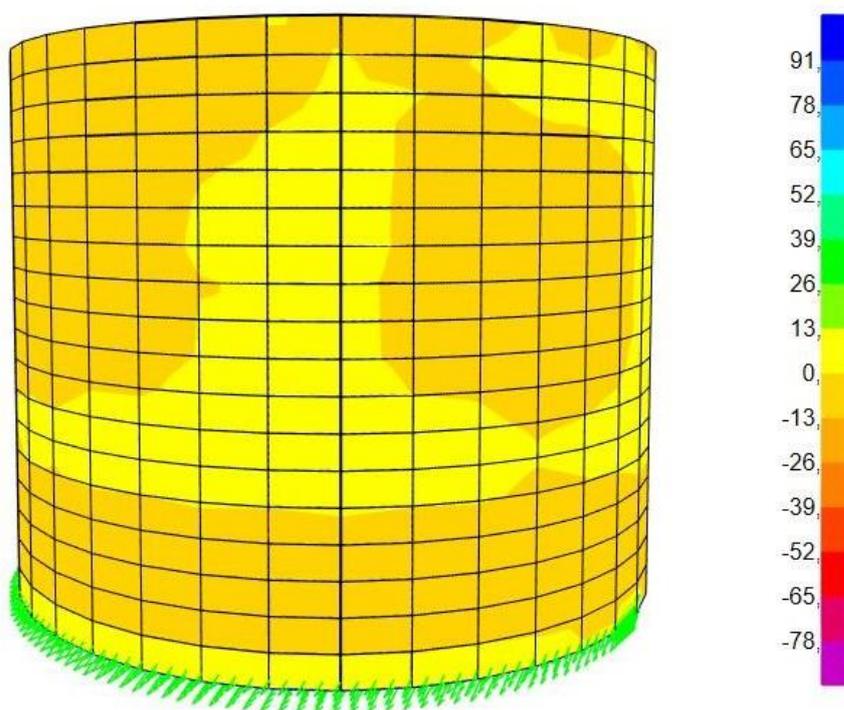
A partir dos resultados obtidos para tensão nas barras, verificou-se que todos encontravam-se abaixo de 360 MPa. Posteriormente, avaliou-se a faixa de tensão à qual a tensão calculada correspondia, conforme a Figura 26, e estabeleceram-se os limites de diâmetro de armadura e espaçamento máximo das barras. Portanto, em alguns casos, foi necessário diminuir os diâmetros da armadura horizontal e o espaçamento das barras, o que às vezes aumentou a área de aço que se fazia necessária para atender a combinação última. No Quadro 36 é possível analisar os cálculos e nas Figuras 51 e 52 o detalhamento da armadura horizontal e vertical, respectivamente.

Figura 49 - Força de acordo com a Combinação de Serviço



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 50 - Momento de acordo com a Combinação de Serviço



Fonte: elaborado pela autora.

Quadro 36 - Verificação quanto à fissuração

(continua)

Altura inicial (m)	Altura Final (m)	F (kN/m)	M (kNm/m)	$\sigma$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (MPa)	$\sigma$ adotada (MPa)	$\Phi$ máx (mm)	$\Phi$ adotado (mm)	Esp. máx (cm)	Esp. (cm)
0,00	1,00	167,24	20	30,67	306,70	320	10	10	10	10
1,00	2,00	223,32	-0,05	18,79	187,91	200	25	16	25	23
2,00	3,00	308,54	5,71	19,50	194,98	200	25	16	25	18
3,00	4,00	352,86	3,81	18,64	186,43	200	25	16	25	18
4,00	5,00	353,45	1,03	17,66	176,59	200	25	16	25	15
5,00	6,00	350,52	0,24	17,55	175,52	200	25	16	25	18
6,00	7,00	304,31	0,45	17,54	175,40	200	25	16	25	18
7,00	8,00	285,19	0,24	17,49	174,88	200	25	16	25	18
8,00	9,00	268,42	0,08	17,44	174,35	200	25	16	25	23
9,00	10,00	253,34	-0,02	17,51	175,10	200	25	16	25	23
10,00	11,00	234,27	-0,04	17,43	174,28	200	25	16	25	23
11,00	12,00	215,62	-0,04	17,43	174,30	200	25	16	25	23

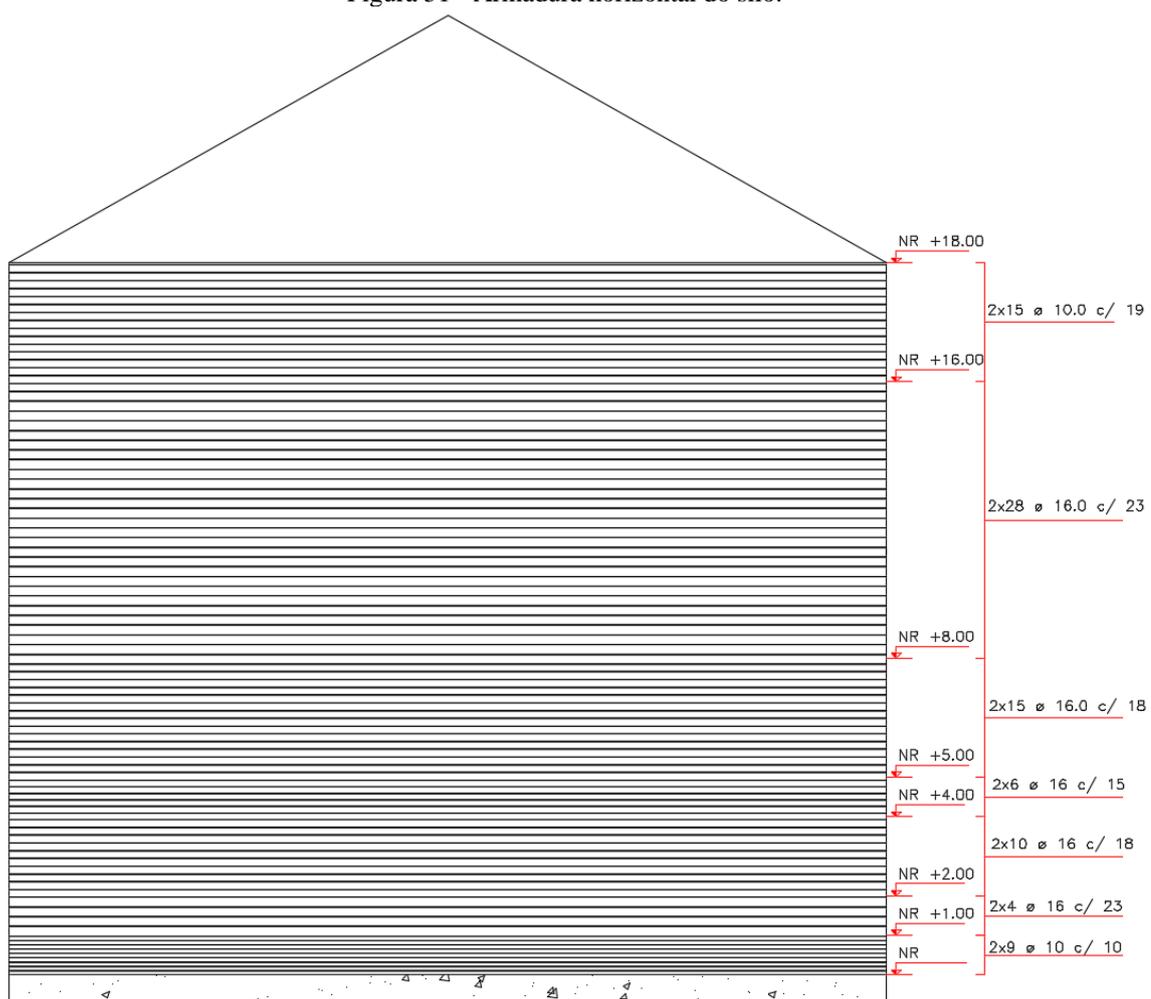
Quadro 36 - Verificação quanto à fissuração

(conclusão)

12,00	13,00	195,8	-0,02	17,40	173,96	200	25	16	25	23
13,00	14,00	176,76	-0,06	17,44	174,41	200	25	16	25	23
14,00	15,00	158,86	-0,06	17,74	177,42	200	25	16	25	23
15,00	16,00	136,74	-0,13	17,74	177,43	200	25	10	25	19
16,00	17,00	112,04	-0,2	17,62	176,24	200	25	10	25	19
17,00	18,00	87,13	-0,24	17,71	177,10	200	25	10	25	19

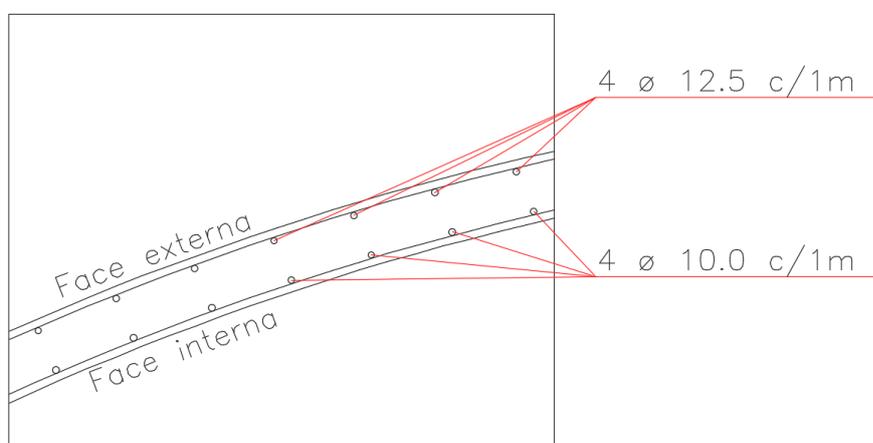
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 51 - Armadura horizontal do silo.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 52 - Detalhamento da armadura vertical.

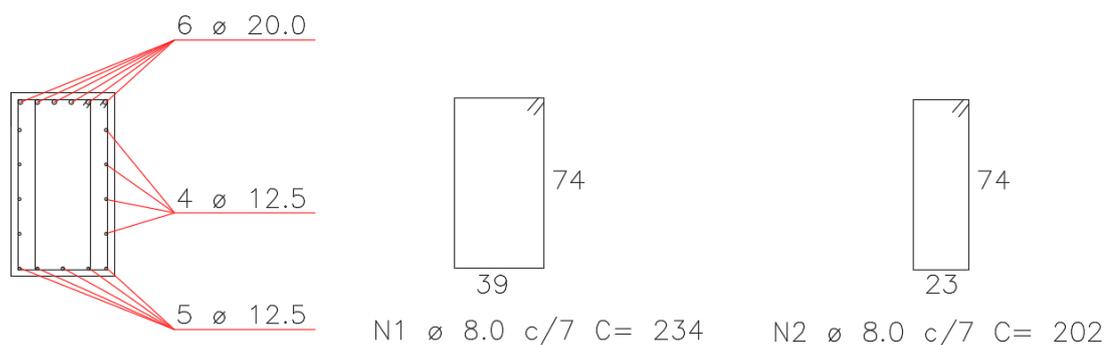


Fonte: elaborado pela autora.

Para o dimensionamento da viga, os esforços obtidos foram de 191,98 kNm para o momento positivo, 513,27 kNm para o momento negativo e 761,813 kN para o cortante. A viga tem seção de 45x80 cm e cobrimento de armaduras de 3 cm com  $f_{ck}$  de 30 MPa. Com os esforços atuantes, obteve-se uma área de aço para o momento positivo de 5,97 cm<sup>2</sup> e 5  $\Phi$ 12.5 mm, para a armadura negativa obteve-se uma área de aço de 16,69 cm<sup>2</sup> e 6  $\Phi$  20 mm. Como a viga apresenta altura maior que 60 cm, é necessário usar uma armadura de pele, com área de aço de 3,6 cm<sup>2</sup> e 4  $\Phi$  12.5 mm. Para os estribos, é necessária uma área de aço de 25,88 cm<sup>2</sup>/m, para isso são usados estribos de 4 ramos de  $\Phi$  8 mm a cada 7 centímetros. As Figuras 54 e 55 ilustram a distribuição dos esforços de cortante e momento respectivamente.

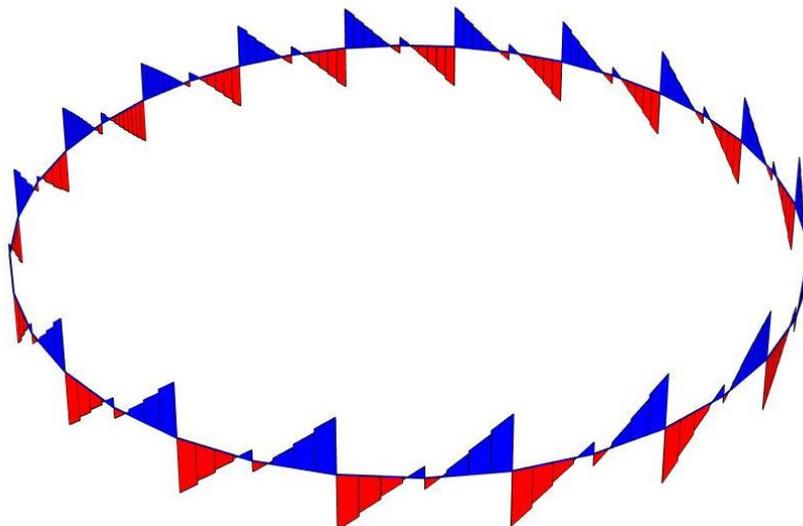
Ainda, vale salientar que foram verificados os espaçamentos entre as barras horizontais e verticais para garantir que ficassem dentro dos limites estipulados por norma. A armadura da viga pode ser vista na Figura 53. Além disso, foi analisado o estado de abertura de fissuras da viga, com um momento solicitante da combinação frequente de 248,46 kNm, cujas aberturas de fissuras calculadas segundo a NBR 6118:2023, através das equações 143 e 144, ficaram entre 0,22mm e 0,24mm abaixo do limite estipulado pela norma de 0,3mm.

Figura 53 - Detalhamento da viga



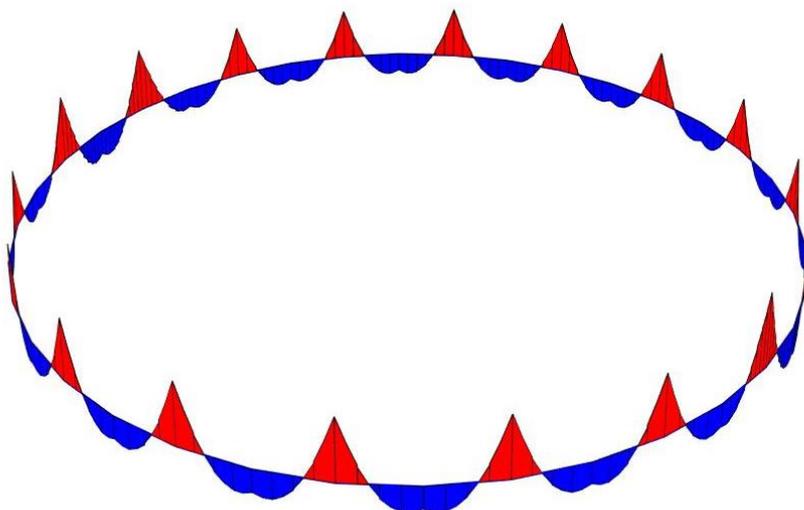
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 54 - Esforço cortante na viga



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 55 - Momento na viga

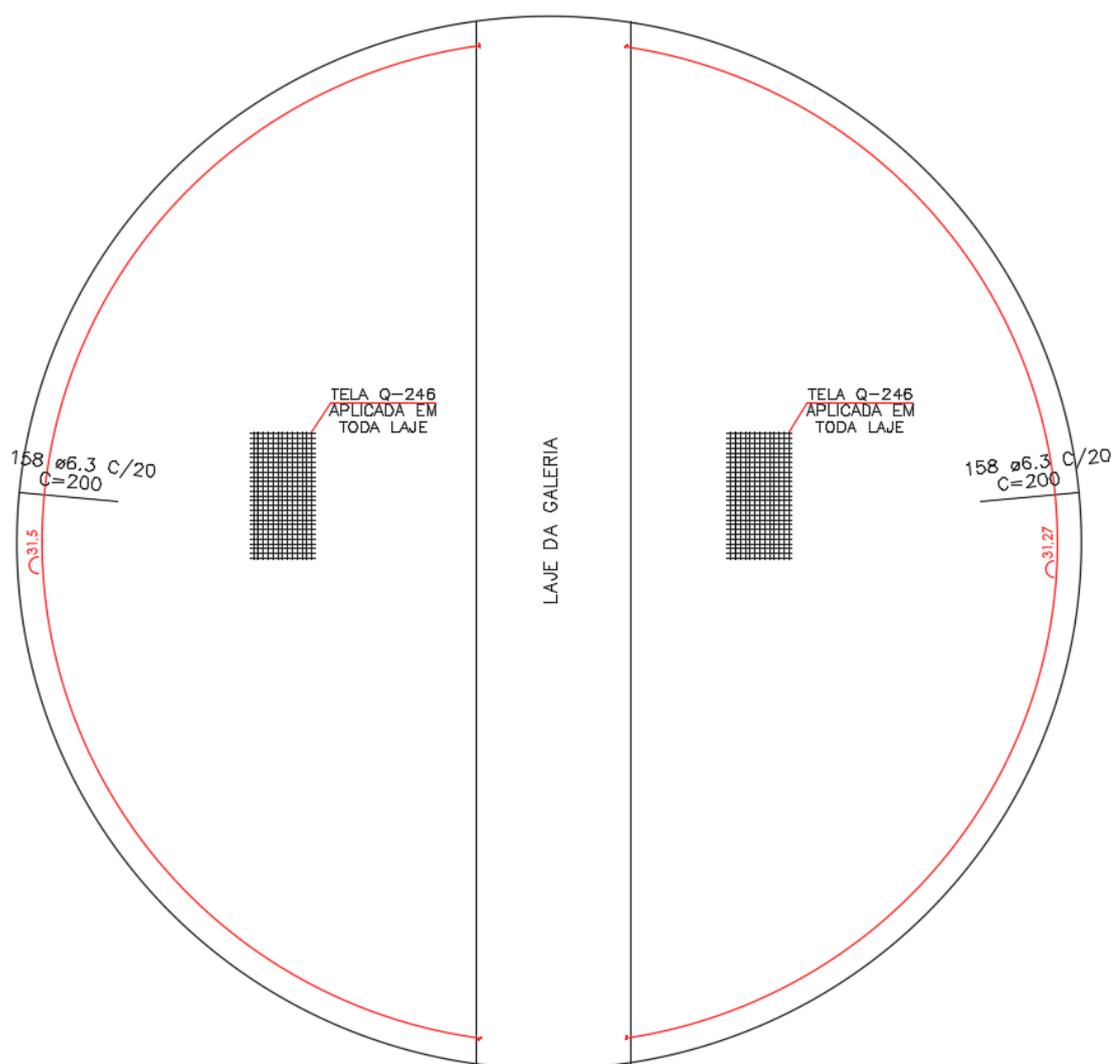


Fonte: elaborado pela autora.

Para a disposição das armaduras da laje de fundo, observaram-se algumas situações, os maiores momentos são negativos e surgem nas extremidades da laje, no encontro com as paredes da galeria e viga do anel. Na extremidade da galeria, o maior momento apresentado foi de  $-50\text{kNm}$ , enquanto nas proximidades com a viga do anel foi de  $-33\text{kNm}$ . A laje de fundo conta com uma espessura de  $20\text{ cm}$ , com cobrimento de  $2,5\text{ cm}$ ,  $f_{ck}$  de  $30\text{ MPa}$ , para essas condições, a área de aço mínima é de  $2,01\text{ cm}^2$  e, para atender tal exigência, foi disposta uma tela eletrosoldada com malha de aço quadrada tipo Q-246, que suporta até  $8\text{ kNm}$ .

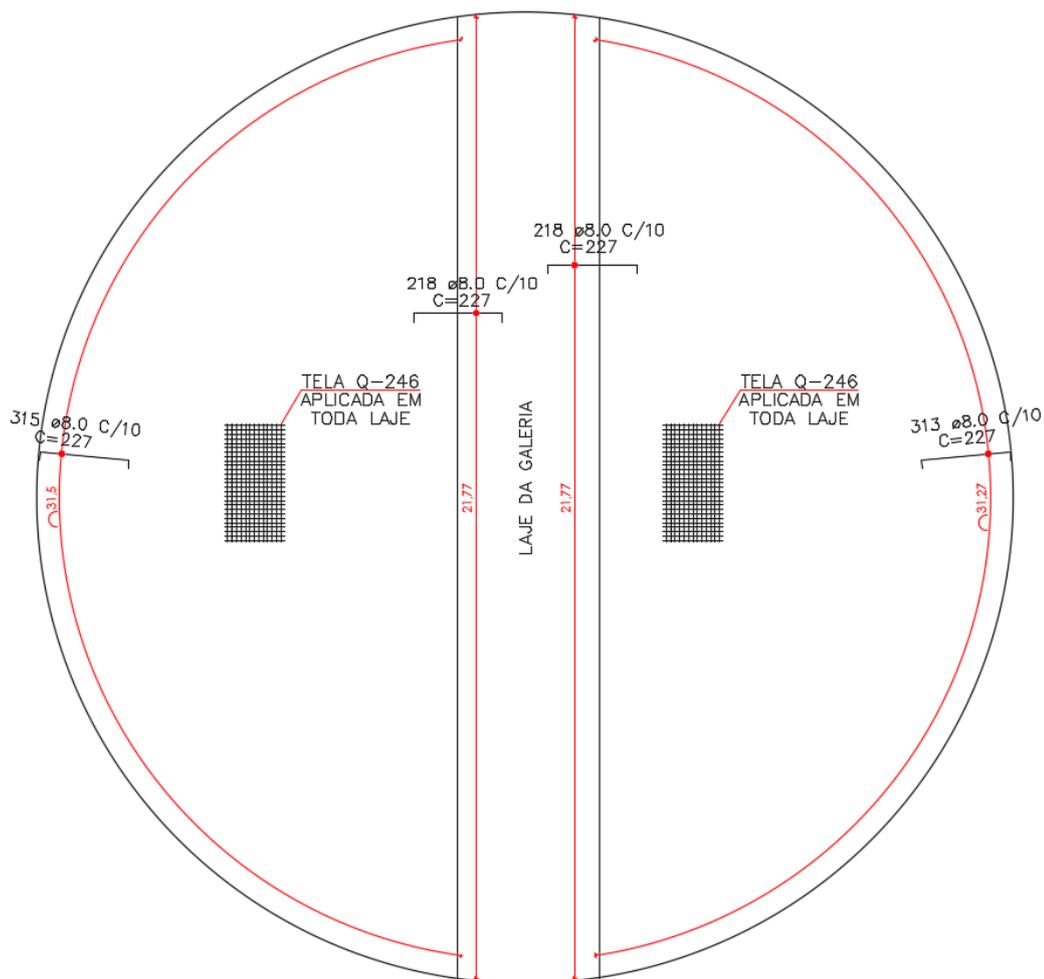
Na parte central da laje, na direção radial de direção da viga do anel estendida para o interior da laje, apresentam-se momentos positivos da ordem de 13,1kNm. Para essa região, serão dispostas barras soltas como reforço, dispondo barras circulares com diâmetro de 6.3 mm a cada 20 cm. Nas demais áreas, os momentos positivos são resistidos com a tela eletrosoldada. Para os momentos negativos as bordas serão reforçadas em uma faixa de 50cm, com barras de diâmetro de 8cm a cada 10cm. A disposição das armaduras inferior e superior da laje de fundo podem ser vistas nas Figuras 56 e 57.

Figura 56 - Armadura inferior da laje de fundo



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 57 - Armadura superior das lajes

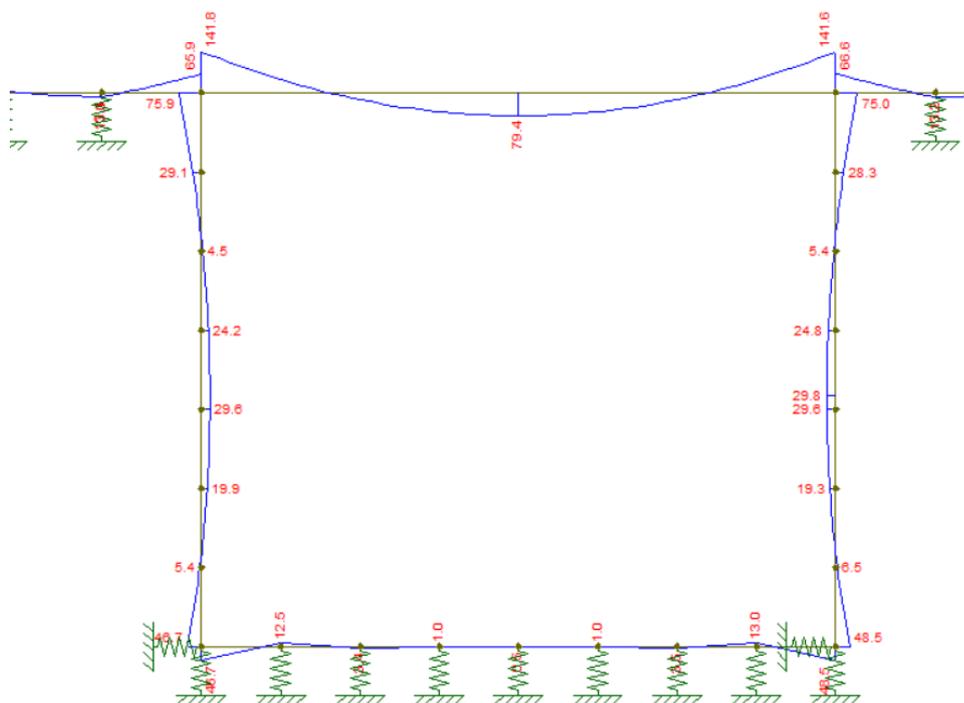


Fonte: elaborado pela autora.

Para obter os esforços da galeria, utilizou-se o software Ftool, aplicando-se a combinação para o estado limite último obteve-se os diagramas conforme Figuras 58 a 60. Além disso, fez-se necessário avaliar a combinação frequente para análise quanto à fissuração, esses esforços podem ser vistos nas Figuras de 61 a 63. Inicialmente, determinou-se o momento reduzido através da Equação 116.

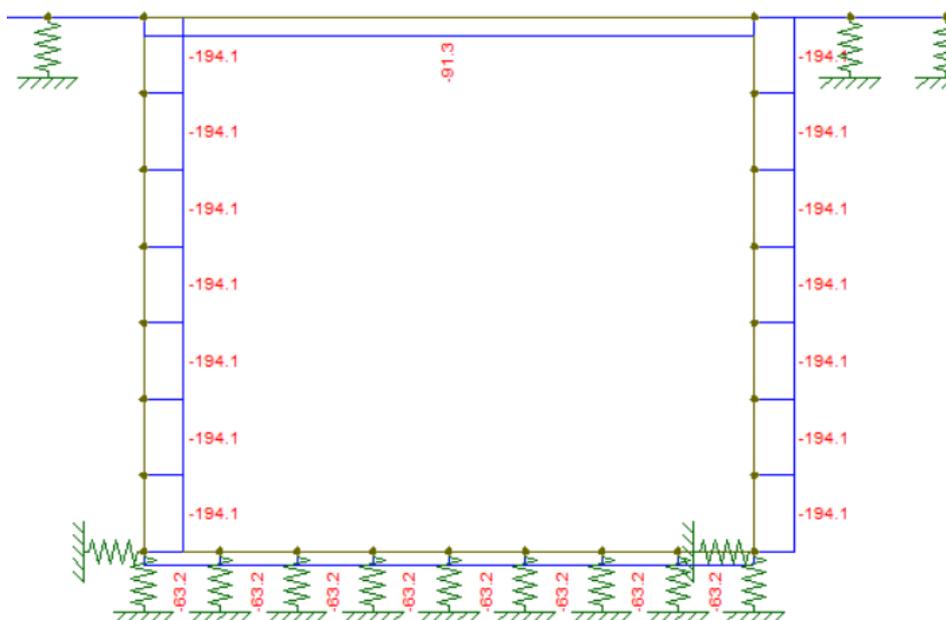


Figura 60 - Momento em kNm no estado limite último



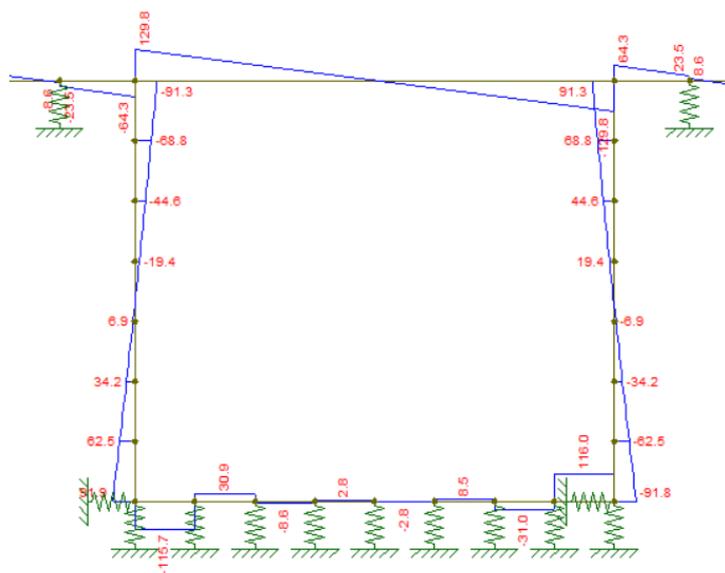
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 61 - Força Normal em kN no estado limite de serviço.



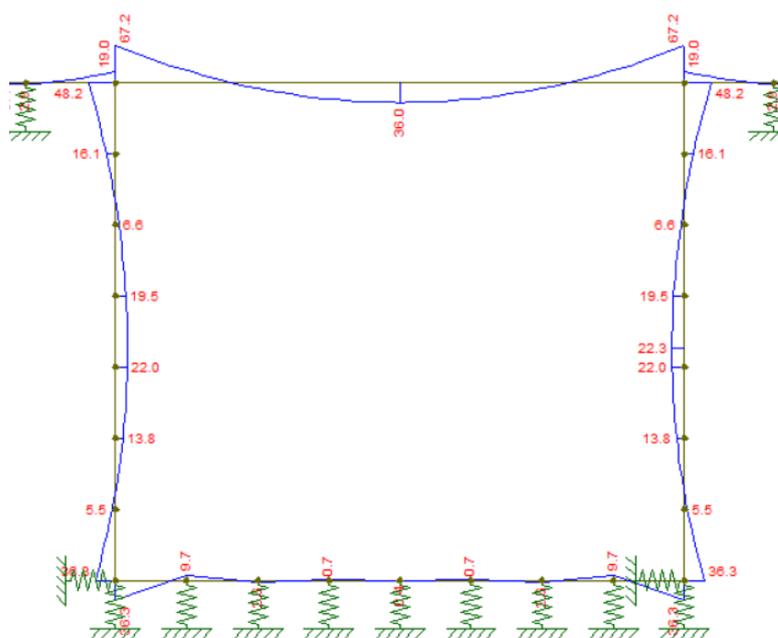
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 62 - Força Cortante em kN no estado limite de serviço



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 63 - Momento em kNm no estado limite de serviço.



Fonte: elaborado pela autora.

Posteriormente, calculou-se a área de aço mínima, obtendo-se uma área de aço de 3,9 cm<sup>2</sup>/m. Para atender a área de aço mínima, optou-se pelo uso de uma tela eletrosoldada Q-396, com área de aço de 3,96 cm<sup>2</sup>/m, distribuídas em todas as faces de paredes, laje de fundo e de cobertura. Com a obtenção dos momentos reduzidos, foi possível analisar que todas as regiões se encontravam no domínio 2 e calcular o braço de alavanca  $z$  das regiões analisadas para obter as áreas de aço conforme a Equação 117.

A área de aço obtida através da Equação 117 foi subtraída da área de aço da tela e, a partir disso, obteve-se a área de aço adicional interna, conforme indicado no Quadro 37. Após a determinação da área de aço necessária para a armadura, foi verificada a resistência ao esforço cortante calculada através da Equação 129 para os cantos superior e inferior, onde se apresentam os maiores cortantes. Ainda foi verificada a força resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto conforme Equação 135.

Por fim, avaliou-se a fissuração, através do cálculo determinado no Quadro 38 e esforços obtidos através da combinação frequente, obteve-se a abertura de fissuras através das Equações 143 e 144, tais aberturas ficam dentro do limite estabelecido pela NBR 6118:2023 de 0,30mm. Os detalhes de armadura podem ser vistos nas Figuras 64 para a tela soldada e 65 para a barra solta.

Quadro 37 - Cálculo da armadura da galeria

Posição	Momento (kNcm)	Normal (kN)	$\mu$	$z$	As (cm <sup>2</sup> /m)	As, tela escolhida (cm <sup>2</sup> /m)	Armadura Adicional Interna (cm <sup>2</sup> /m)	Armadura Escolhida (cm <sup>2</sup> /m)
Meio da laje da cobertura	7938	132,3	0,084	19,91	3,90	3,96	8,25	Ø 10 c/ 9
Meio da laje de fundo	1298	86	0,014	20,83	3,90	3,96	Não necessário	-
Meio da parede lateral	2980	479,9	0,032	20,6	3,90	3,96	10,40	Ø 12.5 c/ 11
Canto Superior	14180	479,9	0,150	18,95	3,90	3,96	24,29	Ø 16 c/8
Canto Inferior	4675	479,9	0,049	20,38	3,90	3,96	12,35	Ø 12.5 c/ 9

Fonte: elaborado pela autora.

Quadro 38 - Verificação da resistência à força cortante.

Verificação quanto ao $V_{Rd1}$		
Posição	$V_{Rd1}$	Vsd
Canto Superior	188,87	141,6
Canto Inferior	166,27	48,45
Verificação quanto ao $V_{Rd2}$		
$V_{Rd2}$	Vsd	Vsd
1069,2 kN	141,6 kN	48,5 kN

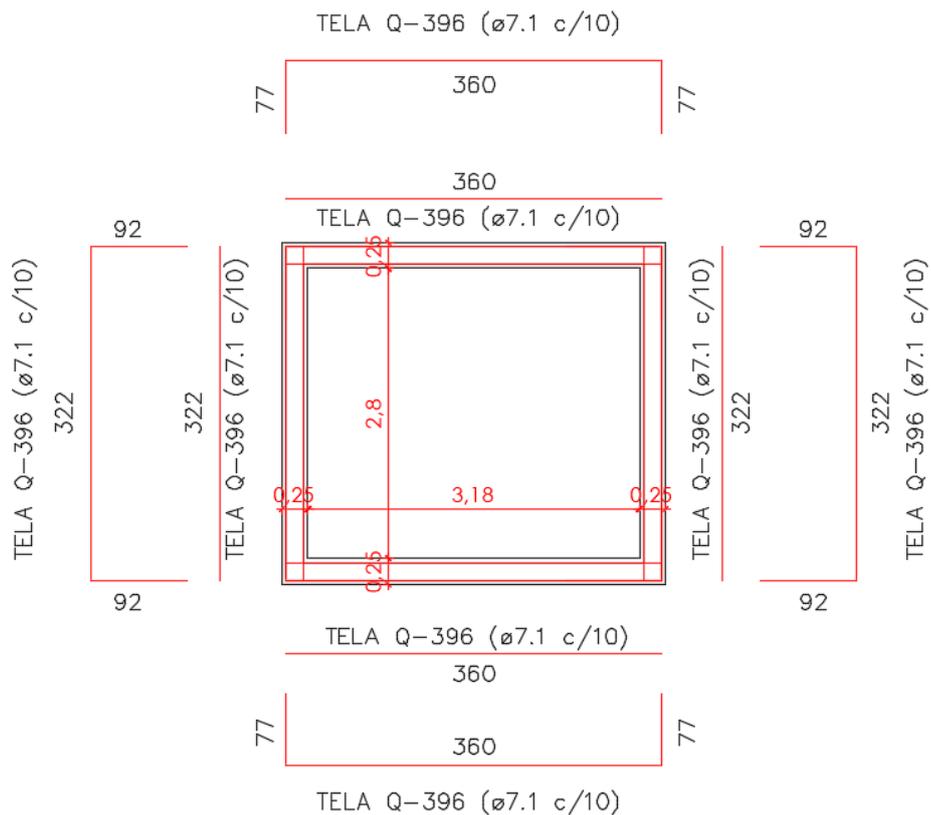
Fonte: elaborado pela autora.

Quadro 39 - Verificação quanto à fissuração.

Posição	Momento (kNcm)	Normal (kN)	$\rho_{ri}$	$\sigma_s$	wk1 (mm)	wk2 (mm)
Meio da laje da cobertura	3597	91,3	0,105	12,967	0,029	0,092
Meio da laje de fundo	972	63,2	0,074	8,592	0,009	0,052
Meio da parede lateral	2235	194,1	0,131	3,503	0,003	0,028
Canto Superior	6722	194,1	0,168	10,186	0,029	0,096
Canto Inferior	3634	194,1	0,131	7,622	0,013	0,062

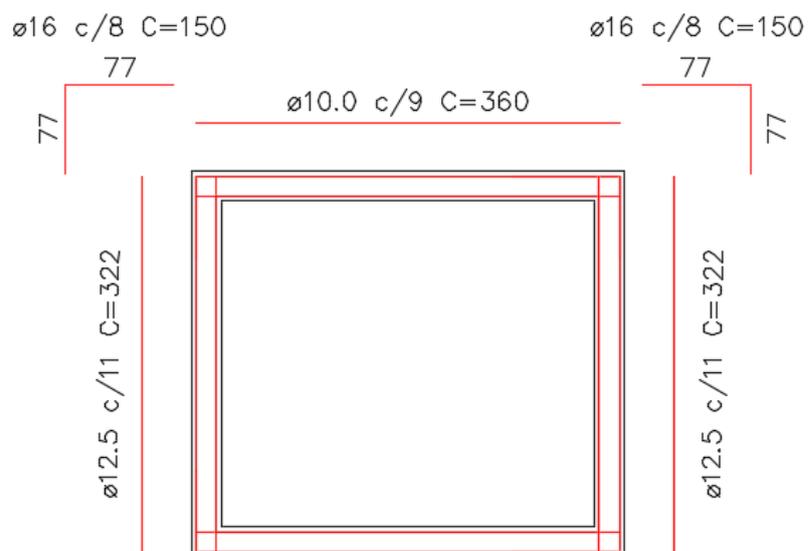
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 64 - Armadura da galeria em tela



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 65 - Armadura da galeria em barra solta.



Fonte: elaborado pela autora.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho abordou a análise detalhada de normas estrangeiras para a determinação de pressões exercidas pelos grãos armazenados. Tendo em vista que a norma brasileira sobre o assunto cita normas estrangeiras, o estudo objetivou elencar as principais diferenças entre as normas existentes ao referido assunto. A análise comparativa entre normas estrangeiras revelou diferenças significativas quanto à forma de consideração da pressão dos grãos armazenados. Em termos de abrangência, as normas australiana e europeia são mais completas, considerando uma maior variedade de situações em comparação com as normas ISO 11697 (ISO, 2012) e ANSI S 4331 (ASAE, 2019).

O dimensionamento de um silo requer uma análise detalhada das pressões internas que podem ocorrer, como durante no carregamento e o descarregamento, bem como das pressões locais que podem surgir na ausência de dispositivos que auxiliem na distribuição simétrica dos grãos dentro dos silos, gerando excentricidades de carregamento. Além disso, se não houver abertura dos registros de descarga de maneira que promovam a descarga simétrica, avaliações adicionais de pressões locais devem ser analisadas para obter resultados coerentes com a realidade. Ainda, deve-se levar em consideração as pressões externas, como as de vento, bem como situações de empuxo que ocorrem na viga e nas paredes da galeria.

O dimensionamento seguiu as diretrizes da norma brasileira, que determina que, para silos que não descarregam por fluxo de massa, apresentando cargas e descargas simétricas, o dimensionamento deve ser feito pelo prescrito na norma ANSI S 4331 (ASAE, 2019). No entanto, esse dimensionamento pode não configurar as situações mais críticas de carregamento, visto que, segundo as análises feitas, as outras normas apresentam esforços maiores.

No que se refere ao dimensionamento, as pressões horizontais são utilizadas para dimensionar a estrutura das paredes, armaduras verticais e horizontais. Para o dimensionamento, utilizaram-se bibliografias existentes para determinação da quantidade de aço necessária para a armação das paredes, visto que não há uma norma brasileira que trata diretamente sobre o assunto. O dimensionamento da viga e lajes seguiu as diretrizes estabelecidas pela NBR 6118:2023.

Destaca-se que o presente trabalho não considerou carregamentos decorrentes de ações térmicas, forças de estruturas anexas, cargas móveis em plataformas ou telhados. Além disso, o dimensionamento ocorreu pelo prescrito por uma única norma, sugere-se que para trabalhos futuros, sejam avaliadas as cargas adicionais descritas anteriormente, bem como a análise de

dimensionamento para todas as normas descritas no estudo, a fim de avaliar as diferenças construtivas que cada uma ocasionaria no que se refere à quantidade de material.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, V. **Análise e dimensionamento de silos de concreto armado**: desenvolvimento de um programa computacional. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2001.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE 313. **Recommended practice for design and construction of concrete bins, silo and bunkers for storing granular materials**. ACI (313R -1977). Detroit, 1997
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 313-16. **Design Specification for Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials**. 2016.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI S433.1. **Loads on bulk solids containers**. Estados Unidos, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17066: **Silos metálicos de chapas corrugadas**. ABNT, Rio de Janeiro, 2022. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projetos de estruturas de concreto**. ABNT, Rio de Janeiro, 2023. 260 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: **Forças devido ao vento em edificações**. ABNT, Rio de Janeiro, 1988. 66 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8186: **Ações e segurança nas estruturas**. ABNT, Rio de Janeiro, 2003. 15 p.
- AUSTRALIAN STANDARD. AS 3774: **Loads on bulks containers**. Sydney, 1996.
- BELANI, D. **Como o armazenamento de grãos pode reduzir riscos e perdas agrícolas?** [Entrevista disponibilizada em 13 de dezembro de 2022, Redação Agrishow]. Disponível em: <<https://digital.agrishow.com.br/graos/como-o-armazenamento-de-graos-pode-reduzir-riscos-e-perdas-agricolas>>. Acesso em: 16 jan. 2024.
- CALIL JR., C.; CHEUNG, A. B. **Silos**: pressões, fluxo, recomendações para o projeto, exemplos de cálculo. São Carlos: EESC, USP, 2007.
- CARSON, J.; CRAIG, D. **Silo design code: Its limits and inconsistencies**. *Procedia engineering*, v. 102, p. 647-656, 2015.
- CARVALHO, Haidassa F. **Análise de tensões em silos circulares metálicos de baixa relação altura/diâmetro**. 2018. 44f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.
- EL DEBS, Mounir Khalil. **Projeto estrutural de galerias e canais com aduelas de concreto pré moldado**. São Paulo: Associação Brasileira dos Fabricantes de Tubos de Concreto - ABTC, 2018.

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

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1**: General rules and rules for buildings. Brussels, 2004.

FANK, Z. M. **Pressões em silos verticais cilíndricos metálicos**: determinação experimental e cálculos teóricos por normas estrangeiras. Campina Grande, Paraíba, 2017.

GODOY, N. S. Estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de penetrômetro estático. (Estimate of the load capacity of pilings from the results of a static penetrometer). **Lecture given at the Engineering School of São Carlos USP**. 1983.

GUIA DA ENGENHARIA. **Empuxos de terra**: cálculo e aplicações. Disponível em: <<https://www.guiadaengenharia.com/empuxos-terra-calculo-aplicacoes/>>. Acesso em: 3 jun. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11697 - **Bases for design of structures** - Loads due to bulk materials. Etiópia, 1995.

LACERDA, Marcelo. Armazenamento de grãos no Brasil: entenda o problema. **Revista Cultivar**, 2022. Disponível em: <<https://revistacultivar.com.br/artigos/armazenamento-de-graos-no-brasil-entenda-o-problema>>. Acesso em: 16 jan. 2024.

SAFARIAN, S. E HARRIS, E. C. **Design and Construction of Silos and Bunkers**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1985.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL. **Grãos**: armazenamento de milho, soja, feijão e café. Brasília: Senar, 2018. Disponível em: <<https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/216-ARMAZENAMNTOS-GR%C3%83OS.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2024.

TEIXEIRA, A. H. Projeto e execução de fundações. In: **Anais do SEFE**. São Paulo: [s.n.], 1996. v. 1

TEIXEIRA, A. H., GODOY, N. S. Análise, projeto e execução de fundações rasas [Analysis, design and execution of shallow foundations]. In: HACHICH et al. (eds). **Fundações**: teoria e prática [Foundations: theory and practice]. São Paulo, 1996.