

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

Guilherme Arthur Kehl

**PROJETO DE SILO CILÍNDRICO DE CONCRETO ARMADO
PARA ARMAZENAMENTO DE ARROZ**

Porto Alegre
junho 2015

GUILHERME ARTHUR KEHL

**PROJETO DE SILO CILÍNDRICO DE CONCRETO ARMADO
PARA ARMAZENAMENTO DE ARROZ**

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

Orientador: Roberto Domingo Rios

Porto Alegre
julho 2015

GUILHERME ARTHUR KEHL

**PROJETO DE SILO CILÍNDRICO DE CONCRETO ARMADO
PARA ARMAZENAMENTO DE ARROZ**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2015

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

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Roberto Domingo Rios (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Jean Marie Désir (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Profa. Virgínia Maria Rosito d'Avila Bessa (UFRGS)
Dra. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, Marco e Clarice, e à
minha irmã, Ingrid, que sempre me apoiaram e me
incentivaram em todas as etapas de minha graduação.

Não é suficiente que façamos nosso melhor;
às vezes devemos fazer o que é necessário.

Winston Churchill

RESUMO

O armazenamento de grãos em recipientes verticais é uma prática utilizada há séculos. Porém, silos grandes para usos comerciais começaram a ser construídos apenas a partir da metade do século XIX. Desde então, o uso de silos tem sido extensivo, não somente para a estocagem de grãos, mas também para o armazenamento de diversos outros tipos de materiais granulares. Para a agricultura, uma rede de armazenamento de grãos é um grande incentivo para a produção e um estabilizador de preços para o consumidor, uma vez que a produção é periódica ao passo que o consumo é contínuo e ininterrupto. Em vista disso, torna-se necessário construir silos que sejam capazes de manter o produto armazenado por maior tempo e ainda com qualidade adequada ao consumo humano. Os principais fatores que afetam a durabilidade dos grãos durante a estocagem são a temperatura, o teor de umidade e a presença de pragas ou roedores. Os silos de concreto apresentam grande vantagens quanto a capacidade de retenção de alimentos, pois o concreto é um material que apresenta ótimas qualidades isolantes. No entanto, pode permitir a entrada de umidade devido a fissuração, que pode ser controlada, de forma que não interfira na qualidade e durabilidade dos grãos, por um projeto estrutural adequado. Este trabalho se propõe a apresentar um projeto de um silo de concreto armado em formato cilíndrico, esbelto e com tremonha cônica que forneça condições de durabilidade aos grãos armazenados.

Palavras-chave: Projeto de Silo. Silo Esbelto. Silo Cilíndrico. Tremonha. Concreto Armado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do delineamento da pesquisa	22
Figura 2 – Dimensões e excentricidades dos silos em corte	26
Figura 3 – Dimensões dos silos em planta	27
Figura 4 – Tipos de fluxos básicos	27
Figura 5 – Exemplos de silos em que ocorrem distintos trajetos	28
Figura 6 – Formas mais comuns de tremonhas	29
Figura 7 – Pressões simétricas de enchimento no segmento de parede vertical	39
Figura 8 – Vista em planta e em elevação das cargas locais – paredes espessas	42
Figura 9 – Distribuição das pressões de enchimento nas tremonhas	47
Figura 10 – Distribuição das pressões de esvaziamento nas tremonhas	47
Figura 11 – Mapa de isopletas da velocidade básica (m/s)	55
Figura 12 – Ângulo de incidência do vento	58
Figura 13 – Gráfico para determinação do tipo de fluxo	62
Figura 14 – Corte esquemático do silo	63
Figura 15 – Cargas de vento aplicadas	65
Figura 16 – Cargas simétricas de enchimento	65
Figura 17 – Cargas simétricas de esvaziamento	65
Figura 18 – Cargas locais aplicadas no topo do silo	67
Figura 19 – Cargas locais aplicadas no centro do silo	67
Figura 20 – Cargas locais aplicadas na base do silo	67
Figura 21 – Momento de flexão na direção y do eixo local (M_{yy}) da cobertura	73
Figura 22 – Momento de flexão na direção x do eixo local (M_{xx}) da cobertura	73
Figura 23 – Armadura inferior da cobertura	74
Figura 24 – Armadura superior da cobertura	74
Figura 25 – Detalhe da ligação entre cobertura e paredes verticais	75
Figura 26 – Força na direção x do eixo local (N_{xx}) das paredes verticais	76
Figura 27 – Força na direção y do eixo local (N_{yy}) das paredes verticais	76
Figura 28 – Armadura das paredes do silo	78
Figura 29 – Armadura das paredes do silo, corte e detalhe	79
Figura 30 – Eixos locais da tremonha e dos pilares (y verde, x azul, z vermelho)	79
Figura 31 – Força na direção x do eixo local (N_{xx}) da tremonha	80
Figura 32 – Força na direção y do eixo local (N_{yy}) da tremonha	80
Figura 33 – Armaduras da tremonha – planta	81

Figura 34 – Armaduras da tremonha – corte	81
Figura 35 – Momento de flexão nas vigas	82
Figura 36 – Esforço de corte nas vigas	82
Figura 37 – Detalhe das armaduras das vigas	83
Figura 38 – Posição dos pilares em relação ao cilindro	83
Figura 39 – Momento de flexão nos pilares	84
Figura 40 – Esforço axial nos pilares	84
Figura 41 – Detalhe das armaduras dos pilares	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes de avaliação de ações	31
Quadro 2 – Valores de propriedades dos sólidos a considerar para diferentes situações	33
Quadro 3 – Propriedades dos sólidos	35
Quadro 4 – Definições de superfície de paredes	37
Quadro 5 – Fator S_2	57
Quadro 6 – Valores mínimos do fator estatístico S_3	57
Quadro 7 – Coeficientes de pressão externa C_p para cilindros	59
Quadro 8 – Cargas de atrito e cargas verticais aplicadas durante o enchimento e o esvaziamento do silo	66
Quadro 9 – Coeficientes de ponderação e fatores de combinação	68
Quadro 10 – Combinações de ações	69
Quadro 11 – Significados das abreviações do quadro 10	71

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas maiúsculas

A – área da seção transversal do segmento de paredes verticais (m^2)

A – área de referência (m^2)

AC – cargas acidentais

A_s – área de aço (cm^2)

C_b – fator de majoração do fundo (adimensional)

C_h – fator de majoração da pressão horizontal de esvaziamento (adimensional)

C_o – fator de majoração de esvaziamento para todos os sólidos (1,15).

C_{op} – fator de referência do sólido para pressão local (fator de majoração de carga) (adimensional)

C_p – coeficiente de pressão externa (adimensional)

C_{pf} – fator de majoração da carga local de enchimento (adimensional)

C_w – fator de majoração do atrito da parede de esvaziamento (adimensional)

E – razão de excentricidade do fluxo e do raio do silo (adimensional)

ENCH SIM – carga simétrica de enchimento

ENCH LOC BOT 1 – carga local de enchimento aplicada na base do silo, paralela à incidência do vento

ENCH LOC BOT 2 – carga local de enchimento aplicada na base do silo, perpendicular à incidência do vento

ENCH LOC MID 1 – carga local de enchimento aplicada no centro do silo, paralela à incidência do vento

ENCH LOC MID 2– carga local de enchimento aplicada no centro do silo, perpendicular à incidência do vento

ENCH LOC TOP 1– carga local de enchimento aplicada no topo do silo, paralela à incidência do vento

ENCH LOC TOP 2– carga local de enchimento aplicada no topo do silo, perpendicular à incidência do vento

ESV SIM – carga simétrica de esvaziamento

ESV LOC BOT 1– carga local de esvaziamento aplicada na base do silo, paralela à incidência do vento

ESV LOC BOT 2– carga local de esvaziamento aplicada na base do silo, perpendicular à incidência do vento

ESV LOC MID 1– carga local de esvaziamento aplicada no centro do silo, paralela à incidência do vento

ESV LOC MID 2– carga local de esvaziamento aplicada no centro do silo, perpendicular à incidência do vento

ESV LOC TOP 1– carga local de esvaziamento aplicada no topo do silo, paralela à incidência do vento

ESV LOC TOP 2– carga local de esvaziamento aplicada no topo do silo, perpendicular à incidência do vento

F – razão entre a pressão normal na parede da tremonha e a tensão vertical no sólido

F_e – força externa (kN)

F_{pf} – força horizontal total causada pela carga local após enchimento (kN)

K – valor característico da razão de pressão lateral (adimensional)

K_m – valor médio da razão de pressão lateral (adimensional)

M_{xx} – momento de flexão na direção do eixo local x (kNm/m)

M_{yy} – momento de flexão na direção do eixo local y (kNm/m)

N – força axial

N_{xx} – força na direção do eixo local x (kN/m)

N_{yy} – força na direção do eixo local y (kN/m)

PP – carga permanente referente ao peso próprio da estrutura

Re – número de Reynolds

S – fator geométrico da tremonha

S_1 – fator topográfico

S_2 – fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação e de sua altura sobre o terreno

S_3 – fator estatístico

SÓLIDOS – cargas provenientes dos sólidos armazenados

U – perímetro interno da seção transversal (m)

VENTO – cargas de vento

Vol – volume mínimo necessário (m³)

V_k – velocidade característica do vento (m/s)

V_o – velocidade básica do vento (m/s)

Y_J – função de variação da pressão de Janssen

Letras romanas minúsculas

a – comprimento de um silo poligonal (m)

b – largura de um silo poligonal (m)

b – coeficiente empírico para pressões de tremonhas (0,2)

d_c – dimensão característica interna da seção transversal do silo (m)

e_f – máxima excentricidade na superfície durante o enchimento (m)

e_o – excentricidade do centro da saída (m)

e_t – excentricidade do centro do topo da superfície quando o silo está cheio (m)

esp – espessura da parede

f_{ck} – resistência característica do concreto

f_{cd} – resistência de projeto do concreto

f_{yk} – resistência característica do aço

$\sigma_{s,adm}$ – tensão admissível do aço

h_b – altura total do silo, medida da extremidade do fundo até a superfície equivalente (m)

h_c – altura do segmento de paredes verticais do silo, medida da transição até a superfície equivalente (m)

h_h – altura da tremonha, medida do ponto mais baixo até a transição (m)

h_o – altura da superfície equivalente até o ponto mais baixo da parede vertical que não está em contato com o material armazenado (m)

h_{tp} – altura total do ponto mais baixo da parede vertical que não está em contato com o material armazenado e a partícula mais alta do material armazenado (m)

l_1 – dimensão de referência na superfície frontal de uma edificação (m)

p_{he} – pressão horizontal durante o esvaziamento (kPa)

p_{hf} – pressão horizontal após enchimento (kPa)

p_{ho} – pressão horizontal assintótica após enchimento (kPa)

p_{pf} – pressão local após enchimento (kPa)

p_{pfi} – pressão local inversa complementar após enchimento (kPa)

p_{pfs} – pressão local em determinada coordenada após enchimento (kPa)

p_v – tensão vertical no sólido armazenado (kPa)

p_{vf} – tensão vertical nos sólidos após enchimento (kPa)

p_{vft} – tensão vertical nos sólidos armazenados na transição após enchimento (kPa)

p_{we} – tensão de atrito da parede durante o esvaziamento (kPa)

p_{wf} – tensão de atrito na parede após enchimento (kPa)

q – pressão dinâmica atuante na estrutura (kPa)

r – raio equivalente do silo (m)

s – dimensão da zona afetada pela carga local (m)

t – espessura da parede do silo (m)

x – coordenada vertical com origem no ponto mais baixo da tremonha (m)

z – profundidade abaixo da superfície equivalente dos sólidos na condição cheia (m)

z_o – profundidade característica de Janssen (m)

Letras gregas

α – ângulo de inclinação da tremonha medido da horizontal (°)

β – ângulo de inclinação da tremonha medido da vertical (°)

γ – valor característico superior do peso específico (kN/m³)

γ_i – valor característico inferior do peso específico (kN/m³)

λ – esbeltez do pilar (adimensional)

μ – valor característico do coeficiente de atrito da parede vertical (adimensional)

θ – coordenada angular (°)

μ_h – valor característico do coeficiente de atrito da parede da tremonha (adimensional)

μ_{heff} – coeficiente de atrito efetivo da tremonha (adimensional)

μ_m – valor médio do coeficiente de atrito da parede vertical (adimensional)

ϕ_i – valor característico do ângulo de atrito interno do sólido (°)

ϕ_{im} – valor médio do ângulo de atrito interno do sólido (°)

ϕ_r – ângulo de repouso do material armazenado (°)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	20
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA	20
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA	20
2.3 PRESSUPOSTO	20
2.4 DELIMITAÇÕES	20
2.5 LIMITAÇÕES	20
2.6 DELINEAMENTO	21
3 SILOS	23
3.1 DEFINIÇÃO DE SILO	25
3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SILOS	25
3.2.1 Geometria do silo	26
3.2.2 Tipos de fluxo durante o esvaziamento	27
3.2.3 Geometria do fluxo	28
3.2.4 Tipos de fundo	28
4. CARREGAMENTOS	30
4.1 PRESSÕES PROVENIENTES DOS MATERIAIS ARMAZENADOS	30
4.1.1 Condições de aplicabilidade da EN 1991-4/2006	30
4.1.2 Classes de avaliação de cargas	31
4.1.3 Considerações de projeto	32
4.1.4 Propriedades dos sólidos	33
4.1.5 Cargas nas paredes verticais	37
4.1.5.1 Cargas de enchimento em silos esbeltos	38
4.1.5.2 Cargas de esvaziamento em silos esbeltos	42
4.1.6 Cargas no fundo	46
4.1.6.1 Cargas em tremonhas íngremes	50
4.1.6.2 Cargas em tremonhas rasas	52
4.2 CARGAS PERMANENTES	54
4.3 CARGAS DE EQUIPAMENTOS	54
4.4 CARGAS DE VENTO	54
4.5 CARGAS TÉRMICAS	60
5. CARACTERÍSTICAS DO SILO PROJETADO	61
6. CARGAS E COMBINAÇÕES APLICADAS	64

7. DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA	72
7.1 COBERTURA	72
7.2 PAREDES VERTICAIS	75
7.3 TREMONHA	79
7.4 VIGAS	82
7.5 PILARES	83
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

O armazenamento de grãos em recipientes verticais é uma prática utilizada há séculos. Porém, silos grandes para usos comerciais começaram a ser construídos apenas a partir da metade do século XIX. Desde então, o uso de silos tem sido extensivo, não somente para a estocagem de grãos, mas também para o armazenamento de diversos outros tipos de materiais granulares. Métodos de produção aprimorados e manejo automatizado, tanto na indústria como na agricultura, abriram caminho para grandes complexos de armazenamento, com carregamento, descarregamento e manejo sofisticados (SAFARIAN; HARRIS, 1985, p. 1, tradução nossa).

Neste contexto, o aumento da produção de arroz tem sido muito importante para a humanidade. De acordo com Cantrell (2002), nenhuma atividade econômica tem tanto poder quanto o cultivo de arroz. O arroz alimenta quase metade da população mundial, sustenta milhões de famílias, é a base do desenvolvimento de diversos países e cobre 11% da área arável do mundo. No Brasil, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2014), a região Sul é a maior produtora nacional, responsável por 78% da produção, sendo o Rio Grande do Sul o maior produtor, com 67,8%.

No processo produtivo do arroz, a etapa de estocagem é de grande importância, pois é nela que ocorrem as maiores variações de temperatura, alterações metabólicas dos grãos, possibilidade de infestações, entre outros, ocasionando acentuado declínio de qualidade. Os grãos devem ser mantidos com as temperaturas mais baixas possíveis durante a estocagem, proporcionando maior tempo de armazenamento para a mesma qualidade. Deve-se utilizar processos de resfriamentos ou aeração com ar na condição ambiente, a fim de dispersar, remover ou distribuir a umidade e o calor acumulados (ELIAS et al., 2011).

Esta questão da temperatura é um fator favorável ao uso do concreto como material para um silo em função de sua baixa condutividade térmica em relação ao aço. O concreto é o material mais frequentemente utilizado na construção de silos, podendo ser moldado in loco ou pré-moldado, armado convencionalmente ou protendido. De acordo com Safarian e Harris (1985), as vantagens do concreto são diversas:

- a) pode ser moldado para assumir qualquer forma necessária;

- b) é relativamente inerte, não sendo necessária a instalação de revestimento protetor entre o grão e a parede;
- c) normalmente requer menos manutenção que outros materiais;
- d) devido a sua maior espessura, paredes de concreto são menos propensas a amassamento ou flambagem.

O concreto armado, no entanto, apresenta duas grandes desvantagens em relação a silos de aço: é mais pesado e, portanto, as fundações são mais solicitadas, e é mais suscetível a fissuração. Como afirmam Elias et al. (2011), a umidade é um fator muito importante para o armazenamento do grão. Desta forma, a fissuração do concreto deve ser avaliada com muito cuidado para não anular as vantagens ganhas com a redução da temperatura.

Assim, este trabalho tem por finalidade a apresentação de um projeto estrutural para um silo de concreto armado para armazenamento de grãos de arroz, que atenda a todos os critérios de segurança aplicáveis e que garanta o armazenamento apropriado do grão.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

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

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: a partir da escolha de solução através de um silo cilíndrico esbelto para armazenamento de arroz, qual seria um projeto para esta estrutura?

2.2 OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo da pesquisa é a apresentação de projeto estrutural para um silo cilíndrico de concreto armado para armazenamento de arroz.

2.3 PRESSUPOSTO

É pressuposto do trabalho que todos os métodos de cálculo e informações apresentadas no EN 1991-4/2006: Eurocode 1 – Actions on Structures – Part 4: Silos and Tanks, na NBR 6123/1988: Forças Devidas ao Vento em Edificações e na NBR 6118/2014: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento são válidos para o presente trabalho.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à análise estrutural e ao dimensionamento de um silo cilíndrico esbelto de capacidade de armazenamento pré-definida.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) utilização de um único *software* de análise estrutural via método dos elementos finitos: *Robot Structural Analysis Professional 2015*;
- b) o estudo em questão será válido apenas para silos que armazenam arroz;

- c) localização da obra na cidade de Cachoeira do Sul no Estado do Rio Grande do Sul;
- d) o cálculo e dimensionamento das fundações não são contemplados;
- e) não serão previstos equipamentos especiais para o silo, como esteiras, passarelas, elevadores, etc.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) concepção estrutural;
- c) definição do modelo estrutural;
- d) análise estrutural;
- e) dimensionamento da estrutura;
- f) detalhamento da estrutura;
- g) análise e considerações finais.

Durante a pesquisa bibliográfica, serão estudados diversos assuntos relativos ao projeto de silos, como as propriedades do material armazenado, as considerações das cargas de vento a serem analisadas, o dimensionamento e detalhamento das peças de concreto que fazem parte da estrutura. A pesquisa bibliográfica acompanha todas as etapas do trabalho, sendo, desta forma, essencial para a obtenção de um trabalho de qualidade.

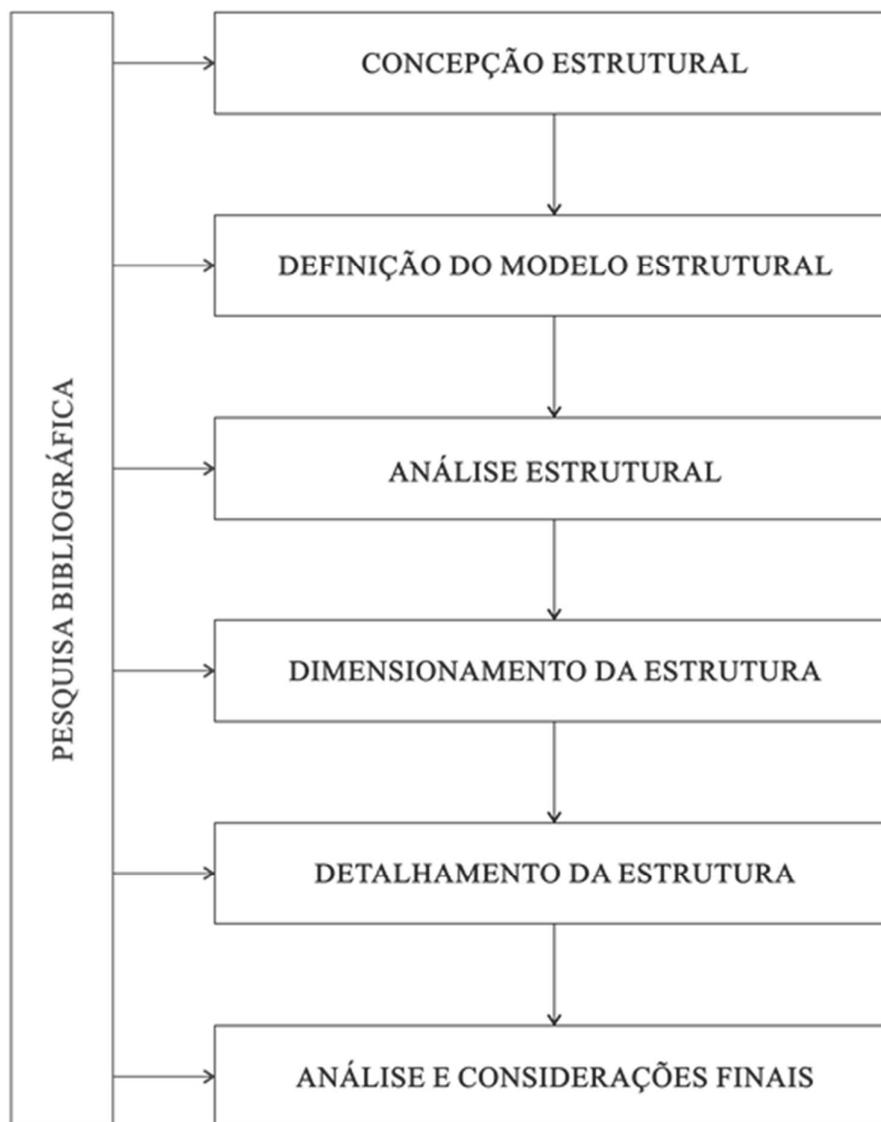
Para a concepção estrutural do silo, serão estudadas as dimensões mais adequadas ao uso da estrutura conforme a capacidade de armazenamento adotada e os modelos estruturais de silos de concreto armado mais empregados.

Na etapa definição do modelo estrutural, serão avaliados os carregamentos aplicados à estrutura, com base na EN 1991-4/2006: Eurocode 1 – Actions on Structures – Part 4: Silos and Tanks e na NBR 6123:1988 – Forças Devidas ao Vento em Edificações.

A análise estrutural será realizada através do software Robot Structural Analysis Professional 2015, utilizando-se o método dos elementos finitos. A partir desta análise, determinam-se as solicitações que devem ser tomadas para o dimensionamento e detalhamento da estrutura, considerando-se sempre a pior situação, de forma a garantir a segurança da estrutura.

O dimensionamento e o detalhamento serão feitos com base na NBR 6118:2014 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento.

Figura 1 – Representação esquemática do delineamento da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

3 SILOS

Sobre a produção agrícola, Merch e Gomes (1982, p. 10) afirmam que:

A produção agrícola é descontínua e periódica, enquanto que as necessidades de alimentação são permanentes e ininterruptas. Para conciliar estes aspectos que se contrapõem, faz-se mister conservar os excedentes da produção cíclica para atender às exigências de alimentação durante a entressafra e em períodos de escassez.

Os autores adicionam ainda, sobre o processo produtivo (MERCH; GOMES, 1982, p. 10):

O processo produtivo compreende duas funções distintas, porém interdependentes: a **produção** e a **comercialização**, as quais são caracterizadas por diferentes segmentos sequenciais, iniciando com a intenção de produzir e concluindo com a distribuição do produto para consumo final. Assim, o armazenamento posiciona-se entre as duas funções, como elo indissociável do processo integrado. Se não houver condições adequadas de processamento e estocagem do produto colhido, invariavelmente ocorrerá anomalias no segmento da comercialização, que por sua vez, face à debilidade dos resultados apurados, provocará desestímulos de produção, fechando a cadeia viciosa.

Para Puzzi (1977, p. 23):

Uma rede armazenadora de grãos é o aparelhamento destinado a receber a produção de grãos, conservá-los, em perfeitas condições técnicas e redistribuí-los posteriormente. Para a agricultura a rede armazenadora se constitui em um elemento indispensável para o incentivo da produção. Para o consumidor é um dos principais fatores para estabilizar os preços, além de garantir um abastecimento normal.

As redes armazenadoras, recebendo a produção que não encontra consumo imediato, formam os estoques que permitem a distribuição cronológica dos produtos e impedem as flutuações de preços que resultam das safras e entressafras.

Finalmente: a possibilidade de aumento da produção de grãos, a estabilização dessa produção e sua fixação em certas zonas dependem de uma série de medidas e, dentre elas, existe uma que é absolutamente necessária. Trata-se do estabelecimento das redes armazenadoras.

Sobre armazéns convencionais e silos, Puzzi (1977, p. 26) afirma que:

O armazenamento de grãos em sacos, nos armazéns, é a prática dominante no Brasil. O método, além de ser dispendioso, apresenta outros inconvenientes. Os grãos estocados em saco, nos armazéns, ficam sujeitos às variações ambientais e, em regiões úmidas, a qualidade do produto é, acentuadamente, prejudicada pela ação dos fungos.

Um sistema de Rede Armazenadora de Grãos só pode ser projetado tecnicamente à base de silos.

Nos países desenvolvidos, onde são manipuladas grandes massas de cereais, o armazenamento é feito sempre a granel, em silos adequados. Ganha-se tempo, evitam-se perdas, faz-se o trabalho mais higiênico (livre de infestações de insetos, microorganismos e roedores) podendo-se preservar as qualidades alimentícias do produto por muito tempo.

Sobre silos e abastecimento Puzzi (1977, p. 30) afirma que:

O manuseio a granel dos grãos alimentícios e o seu armazenamento em silos adequados contribui eficazmente para o abastecimento de um país. Pois, permite:

- a) a completa eliminação das perdas, estimadas, em alguns casos, em mais de 10%;
- b) o armazenamento por diversos anos, sem alterações substanciais do produto, evitando, assim, as flutuações do abastecimento;
- c) reduzir, apreciavelmente, o preço do produto em, pelo menos 10%, com a eliminação da sacaria e redução do custo de manuseio;
- d) a racionalização do comércio, visto que, elimina a identificação da mercadoria por meio de amostra e passa a caracterizá-las pelas especificações do produto;
- e) o estabelecimento de um produto uniforme, limpo, livre de ataque de insetos, roedores, microorganismos e com suas qualidades alimentícias preservadas;
- f) a eliminação do especulador com a distribuição diretamente dos silos aos varejistas (supermercados, etc), em pacotes de peso certo, mais barato e de melhor qualidade;
- g) o controle efetivo dos estoques e a divulgação exata de informações sobre a distribuição física.

Com base nas afirmações de Puzzi (1977) e Merch e Gomes (1982), confirma-se que o armazenamento de grãos é de alta importância para a produção agrícola nacional. Os silos em especial, pois estes são unidades armazenadoras com elevada eficácia e grande capacidade de manter os grãos em condições para o consumo por longos períodos de tempo.

Embora os autores comentem apenas a respeito do armazenamento de grãos, os silos têm diversas outras aplicações, como exemplificam Safarian e Harris (1985, p. 3, tradução nossa):

O armazenamento de materiais a granel em silos e bunkers é essencial para as indústrias de agricultura, mineração, processamento mineral, química, transporte, entre outras. Silos e bunkers podem servir para tanto o armazenamento a longo prazo como a curto prazo [...]. Ambos são usados para o armazenamento de materiais acabados bem como para armazenamento intermediário de produtos inacabados ou brutos.

Silos e *bunkers*, tanto isolados como em grupos, podem ser usados como terminais para recebimento e envio. Estes terminais normalmente envolvem múltiplos modos de transporte; por exemplo, material que chega por caminhão pode ser armazenado temporariamente no terminal e então descarregado em um trem, barca ou navio para envio ao destino final. Terminais usualmente tem sofisticados sistemas para pesagem dos materiais recebidos e enviados.

3.1 DEFINIÇÃO DE SILO

Segundo Merch e Gomes (1982, p. 93), uma unidade armazenadora é uma:

[...] edificação especialmente construída e organizada de modo funcional para reunir, pré-beneficiar e preservar a integridade quanti-qualitativa de uma determinada produção vegetal deteriorável (grãos em especial), sob o regime ambiental.

Sobre os silos, Merch e Gomes (1982, p. 93), afirmam:

Conceitua-se como unidade armazenadora de grão caracterizada por células ou compartimentos estanques e herméticos ou semi-herméticos, em que ocorre o mínimo de incidência ou trocas de influências do meio externo com o ambiente de estocagem.

Oferece condições técnicas de conservação do produto estocado por períodos de tempo normalmente prolongados, face às suas particularidades construtivas.

As células ou compartimentos, em geral, variam de tamanho e número, dependendo das necessidades quando da concepção construtiva.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SILOS

Merch e Gomes (1982, p. 96) classificam em silos verticais e horizontais. Sendo o silo vertical:

Assim denominado por predominar a dimensão da altura em relação ao diâmetro da base da célula, é um tipo de unidade bastante compartimentada que, através de células agrupadas ou justapostas, forma um conjunto com altura variável e normalmente em forma cilíndrica. É preferencialmente construído em concreto armado (formas deslizantes) ou armado e protendido, ou chapas metálicas com isolantes térmicos, além de outros materiais, dos quais vai depender a capacidades instalada.

A base da célula usualmente tem forma de cone, para permitir o total esvaziamento. Quanto à disposição e sustentação em relação ao solo, classifica-se como **elevado** (acima do nível) ou **semi-subterrâneo** (entre o nível).

E o silo horizontal:

Caracteriza-se por prevalecerem as dimensões da base em relação à altura do compartimento. Constitui-se em unidade armazenadora composta por compartimentos de estocagem cuja capacidade individual deverá ser igual ou inferior a 20% da capacidade estática total. [...] A base ou fundo dos compartimentos apresenta-se em talude (forma “V”, “W” ou semi “V”) e é preferencialmente construído em concreto armado ou pré-moldado. A cobertura será construída com o mesmo material, unida aos fechamentos laterais.

Quanto à disposição e sustentação em relação ao solo, o silo horizontal classifica-se em **elevado** (acima do nível), **semi-subterrâneo** ou **subterrâneo** (respectivamente, entre ou abaixo do nível do solo).

Freitas (2001, p. 8), no entanto, afirma que os silos podem ser classificados conforme as seguintes características:

- a) geometria do silo;
- b) tipo de fluxo durante o esvaziamento;
- c) geometria do fluxo;
- d) tipo de fundo.

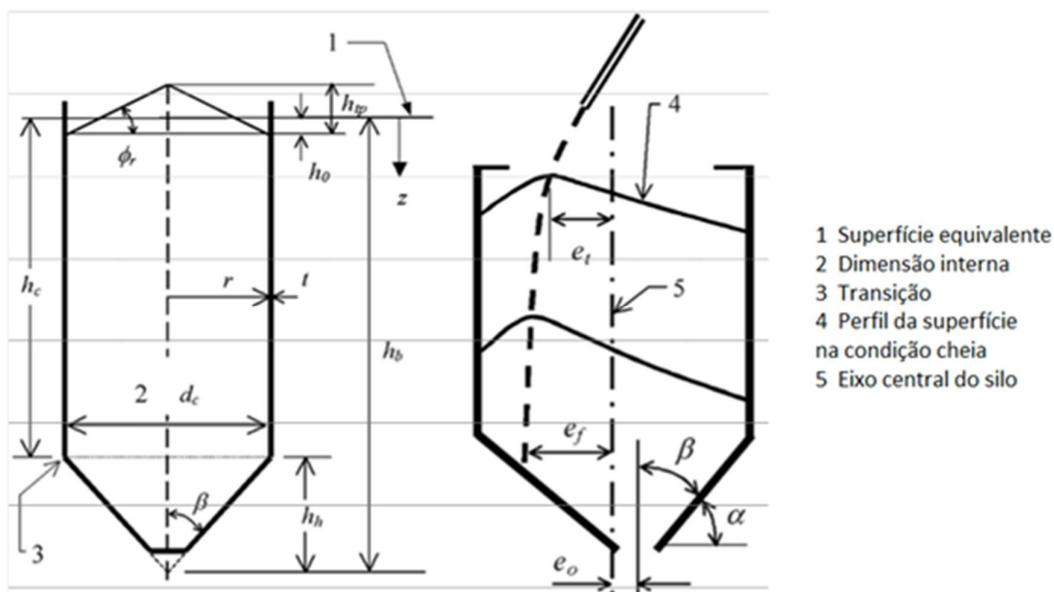
3.2.1 Geometria do silo

Segundo a EN 1991-4 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 40, tradução nossa), os silos são classificados, quanto à geometria nos seguintes tipos:

- a) silos esbeltos, $h_c/d_c \geq 2,0$;
- b) silos de esbeltez intermediária, $1,0 < h_c/d_c < 2,0$;
- c) silos entroncados, $0,4 < h_c/d_c \leq 1,0$;
- d) silos de retenção, $h_c/d_c \leq 0,4$ e com fundo plano;

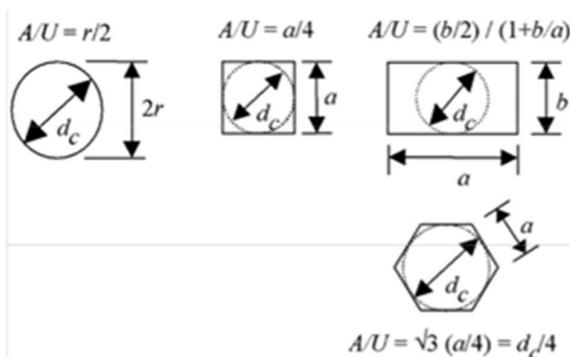
As figuras 2 e 3 indicam as dimensões características necessárias para a devida classificação quanto à geometria.

Figura 2 – Dimensões e excentricidades dos silos em corte



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

Figura 3 – Dimensões dos silos em planta



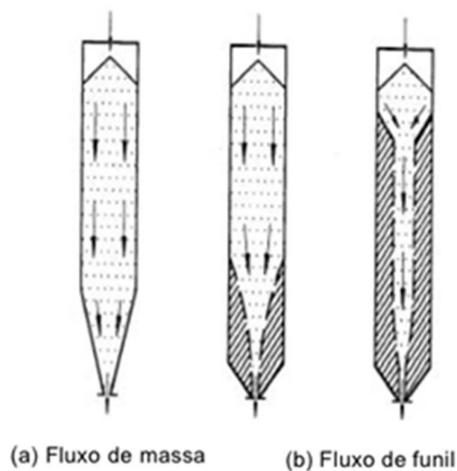
(fonte: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 9)

3.2.2 Tipos de fluxo durante o esvaziamento

O Eurocode 1 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 27, tradução nossa) aponta a existência de dois tipos básicos de fluxo durante o esvaziamento de um silo: fluxo de massa e fluxo de funil. Segundo Freitas (2001, p. 11), estes fluxos são ilustrados pela figura 4 e são descritos da seguinte forma:

- fluxo de massa: fluxo no qual todas as partículas armazenadas estão em movimento do começo até o fim do descarregamento;
- fluxo de funil: caracterizado pela formação de um canal de partículas em movimento dentro de uma zona limitada, enquanto o produto adjacente à parede permanece estacionário.

Figura 4 – Tipos de fluxos básicos



(fonte: FREITAS, 2001, p. 11)

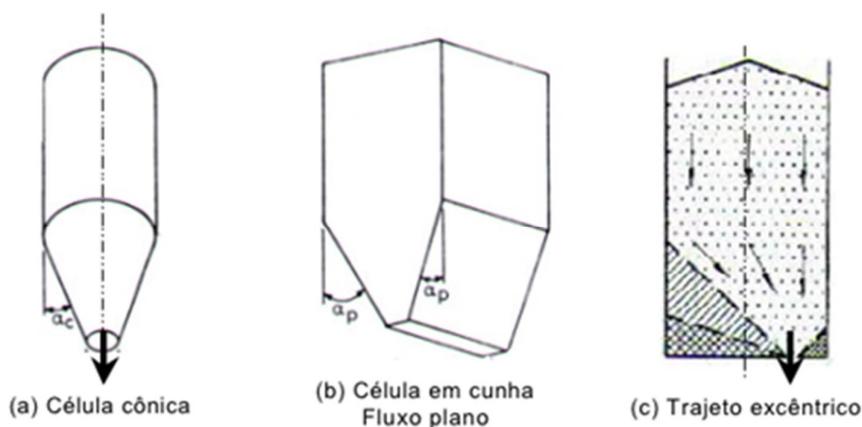
3.2.3 Geometria do fluxo

Freitas (2001, p. 11) afirma que o fluxo pode ocorrer de três formas geométricas diferentes e as descreve da seguinte forma:

- a) trajeto assimétrico: o centro de gravidade do produto fluindo coincide aproximadamente com o eixo vertical do silo, por exemplo, silo circular com abertura de descarga concêntrica [figura 5a];
- b) trajeto planar: é um fluxo uniforme que ocorre em silos de seção transversal retangular ou quadrada, com tremonhas em forma de cunha, onde uma das dimensões da boca de saída é paralela e de igual comprimento às paredes do silo. Neste caso, o canal do fluxo é simétrico em relação ao plano que passa pelo eixo longitudinal da abertura de saída [figura 5b];
- c) trajeto excêntrico: o canal do fluxo não é simétrico em relação ao eixo vertical do silo, ou em relação ao plano vertical que passa pelo eixo longitudinal do silo [figura 5c].

A figura 5 expõe exemplos dos trajetos mencionados acima.

Figura 5 – Exemplos de silos em que ocorrem trajetos distintos



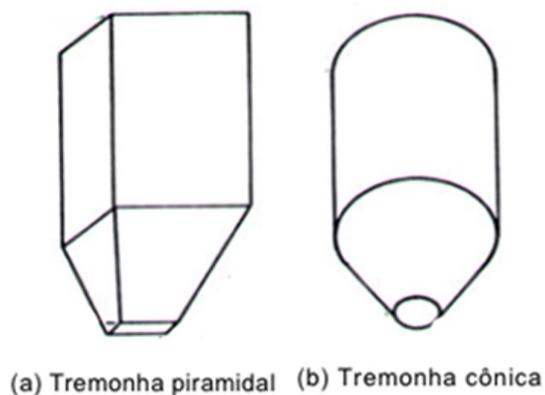
(fonte: FREITAS, 2001, p. 11)

3.2.4 Tipos de fundo

Os silos podem ser construídos com dois tipos de fundos distintos: fundo plano ou fundo inclinado (com tremonha), cuja principal função é promover o esvaziamento completo do material armazenado apenas por gravidade. Quando o esvaziamento por gravidade não for possível, pode-se utilizar máquinas que auxiliam o processo. De acordo com a EN 1991-4 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 66), o fundo é considerado

plano quando sua inclinação com a horizontal for inferior a 5° ($\alpha \leq 5^\circ$). Já as tremonhas podem ser classificadas em íngremes e rasas. Há diversos tipos de tremonhas que podem ser construídas, cônicas (silos cilíndricos) e piramidais (silos paralelepípedicos), por exemplo, como indica a figura 6.

Figura 6 – Formas mais comuns de tremonhas



(fonte: FREITAS, 2001, p. 13)

4 CARREGAMENTOS

Os carregamentos mais importantes para o projeto de silos são os provenientes das ações causadas pelos materiais armazenados. No entanto, outros carregamentos são igualmente importantes para a segurança da estrutura. Alguns deles são citados a seguir:

- a) peso próprio da estrutura;
- b) peso dos equipamentos (esteiras, elevadores, etc.);
- c) cargas de vento;
- d) cargas do fundo e da cobertura;
- e) cargas térmicas.

Neste capítulo, serão discutidos como devem ser obtidos os valores dos carregamentos relevantes para o correto dimensionamento do silo projetado neste trabalho.

4.1 PRESSÕES PROVENIENTES DOS MATERIAIS ARMAZENADOS

Devido à inexistência de Norma Brasileira referente a ações em silos, necessitamos utilizar normas internacionais para a previsão das cargas associadas aos materiais armazenados. Neste trabalho nos basearemos na norma EN 1991-4/2006: Eurocode 1 – Actions on Structures – Part 4: Silos and Tanks (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006) para a estimativa dos carregamentos provenientes dos materiais armazenados.

4.1.1 Condições de aplicabilidade da EN 1991-4/2006

A Norma EN 1991-4/2006: Eurocode 1 – Actions on Structures – Part 4: Silos and Tanks apresenta algumas limitações geométricas e dos sólidos armazenados para a aplicabilidade de suas recomendações (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 8-9, tradução nossa). São elas:

- a) a forma da seção transversal é limitada às formas apresentadas na figura 4, embora algumas pequenas variações possam ser aceitas, desde que as consequências estruturais das mudanças nas pressões sejam consideradas;
- b) a relação entre altura e diâmetro do silo deve ser inferior a 10 ($h_b/d_c < 10$);

- c) a altura do silo deve ser inferior a 100 metros ($h_b < 100$ m);
- d) o diâmetro do silo deve ser inferior a 60 metros ($d_c < 60$ m);
- e) a transição acontece num plano horizontal (ver figura 3);
- f) o silo não contém estruturas internas, como cones, pirâmides, vigas;
- g) cada silo é projetado para uma gama de propriedades dos sólidos;
- f) o material armazenado apresenta fluxo livre;
- h) o diâmetro máximo das partículas dos sólidos armazenados não é superior a $0,03d_c$ (3% do diâmetro do silo);
- i) os efeitos de inércia e cargas de impacto provenientes do enchimento são desprezíveis;
- j) quando dispositivos de esvaziamento são utilizados, o fluxo dos sólidos é suave e central.

4.1.2 Classes de avaliação de cargas

A Norma EN 1991-4/2006: Eurocode 1 – Actions on Structures – Part 4: Silos and Tanks prevê três classes de avaliação de cargas, as quais variam conforme as dimensões dos silos. Estas classes correspondem a diferentes níveis de rigor que devem ser adotados quando do projeto da estrutura de um silo, dependendo da confiança do arranjo estrutural e suscetibilidade a falhas (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 24, tradução nossa). As três classes são apresentadas no quadro 1.

Quadro 1 – Classes de avaliação de ações

Classe de Avaliação de Ações	Descrição
Classe 3	Silos de capacidade maior de 10.000 toneladas Silos de capacidade maior de 1.000 toneladas em que ocorram qualquer das situações a seguir: a) esvaziamento excêntrico com $e_0/d_c > 0,25$ b) silo entroncado com excentricidade de superfície $e_t/d_c > 0,25$
Classe 2	Todos os silos cobertos pela Norma e não contidos nas demais classes
Classe 1	Silo com capacidade abaixo de 100 toneladas

(fonte: adaptado de EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006)

Esta diferenciação foi criada devido às incertezas na determinação precisa das ações atuantes nos silos. Desta forma, para silos enquadrados na classe de avaliação de cargas 1, pode-se adotar

disposições simplificada. Sempre que o projetista achar apropriado, a estrutura pode ser enquadrada em uma classe de avaliação de cargas acima da classe definida pela Norma, mas nunca abaixo. Estas classes devem sempre ser determinadas considerando-se as condições individuais da unidade de armazenamento e jamais de todo o conjunto ou grupo de silos que possam fazer parte do projeto (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 24, tradução nossa).

4.1.3 Considerações de projeto

De acordo com a EN 1991-4/2006, as seguintes considerações devem ser seguidas para a determinação das ações provenientes dos sólidos armazenados (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 25-29, tradução nossa):

- a) as pressões causadas pelos sólidos armazenados devem ser consideradas quando o silo está na condição cheia;
- b) as cargas relativas ao enchimento e ao esvaziamento devem considerar as principais combinações que levam a estrutura aos seguintes estados últimos:
 - máxima pressão normal na parede vertical;
 - máxima força de atrito vertical na parede vertical;
 - máxima pressão vertical no fundo do silo;
 - máxima carga na tremonha;
- c) o peso específico superior (γ) dos sólidos armazenados deve ser usado em todos os carregamentos relevantes;
- d) a avaliação de cada carregamento deve ser feita com um único conjunto de valores para as propriedades coeficiente de atrito (μ), razão de pressão lateral (K) e ângulo de atrito interno (ϕ), de forma que cada estado limite corresponda a uma condição definida dos sólidos;
- e) como estes carregamentos atingem seus máximos quando os valores característicos de μ , K e ϕ assumem extremos diferentes de seus valores estatísticos, valores variados devem ser considerados, adotando-se os valores explicitados no quadro 2;
- f) diferentes valores de esbeltez, geometria de tremonha e arranjos de esvaziamento levam a diferentes situações de carregamentos;
- g) quando a trajetória dos sólidos durante o enchimento gerar um acúmulo excêntrico, os sólidos, diferentes compactações podem ocorrer em distintas partes do silo, o que induz pressões assimétricas;
- h) o projeto deve considerar as consequências dos diferentes tipos de fluxo durante o esvaziamento:

- fluxo de massa;
- fluxo tubular;
- fluxo misto.

Quadro 2 – Valores de propriedades dos sólidos a considerar para diferentes situações

Propósito:	Valor característico a adotar		
	Coefficiente de atrito da parede μ	Razão de pressão lateral K	Ângulo de atrito interno ϕ_i
Para a parede vertical			
Máxima pressão normal na parede vertical	Inferior	Superior	Inferior
Máxima força de atrito na parede vertical	Superior	Superior	Inferior
Máxima carga vertical na tremonha ou fundo	Inferior	Inferior	Superior
Para a parede da tremonha			
Máxima pressão na tremonha durante o enchimento	Inferior	Inferior	Inferior
Máxima pressão na tremonha durante o esvaziamento	Inferior	Superior	Superior

(fonte: adaptado de EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 26)

4.1.4 Propriedades dos sólidos

Segundo a Norma EN 1991-4/2006, as propriedades dos sólidos armazenados devem ser obtidas através de ensaios de laboratório ou de outras fontes de dados relevantes, no entanto, mesmo contando com dados de ensaios precisos, deve-se ter em mente que diferenças entre os resultados de testes e o comportamento dos sólidos dentro do silo possam existir. Ao avaliarmos estas possíveis discrepâncias nas propriedades dos sólidos, os seguintes itens devem ser observados (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 34, tradução nossa):

- a) muitos parâmetros não são constantes verdadeiras, mas dependem do nível de tensão e do modo de deformação;

- b) a forma, o tamanho e a granulometria das partículas podem assumir papéis diferentes no teste e no silo;
- c) efeitos do tempo;
- d) variações no teor de umidade;
- e) efeitos de ações dinâmicas;
- f) a fragilidade e ductilidade dos sólidos testados;
- g) o método de enchimento no silo e no equipamento de teste.

Devido a estas diferenças de comportamento, é provável que o atrito nas paredes apresentem propriedades distintas, desta forma, é recomendado que se considere os seguintes fatores (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 34, tradução nossa):

- a) corrosão e reação química entre partículas, umidade e a parede;
- b) abrasão e desgaste que podem tornar a parede áspera;
- c) polimento da parede;
- d) acúmulo de depósitos de gordura na parede;
- e) partículas de sólido forçadas contra a superfície da parede (geralmente causando aspereza).

Ao estabelecer quais serão os parâmetros dos materiais adotados para a determinação das cargas, os seguintes itens devem ser observados (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 34, tradução nossa):

- a) informações relevantes publicadas, bem como reconhecidas sobre o uso de cada tipo de teste;
- b) o valor de cada parâmetro comparado aos dados publicados e à experiência;
- c) a variação dos parâmetros que são relevantes ao projeto;
- d) os resultados de quaisquer medidas de campo em larga escala de silos similares;
- e) qualquer correlação entre os resultados de mais de um tipo de teste;
- f) qualquer variação significativa nas propriedades do material que possam ocorrer durante a vida útil do silo.

A escolha dos valores característicos das propriedades do material devem ser feitas baseadas no valor apropriado (o valor característico superior ou o inferior), dependendo da sua influência no carregamento sendo analisado (quadro 3). As propriedades dos sólidos podem ser obtidas

por meio de métodos simplificados ou de testes de laboratório, porém, para silos classificados na classe de avaliação de ações 3, as propriedades devem ser obtidas exclusivamente por meio de ensaios (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 35, tradução nossa).

Embora a Norma EN 1991-4/2006 recomende o uso de testes laboratoriais para a determinação das propriedades dos materiais, ela fornece um quadro (quadro 3) com valores padrões para sólidos usuais. O uso deste quadro constitui a aplicação do método simplificado citado anteriormente, lembrando que este é válido apenas para os silos cujas classes de avaliação de ações sejam 1 ou 2. O quadro informa os valores de μ_m , K_m e ϕ_{im} , que são multiplicados (para a obtenção dos valores superiores) ou divididos (valores inferiores) por fatores de conversão a_μ , a_K e a_ϕ para a obtenção dos valores característicos μ , K e ϕ_i , que devem ser usados para a determinação das cargas atuantes. Para o caso dos silos da classe de avaliação de ações 1, os valores médios, μ_m , K_m e ϕ_{im} podem ser utilizados sem que seja necessária a aplicação dos fatores de conversão mencionados (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 36, tradução nossa).

Quadro 3 – Propriedades dos Sólidos

Tipo de sólido	Peso específico γ		Ângulo de repouso ϕ	Ângulo de atrito interno ϕ		Razão de pressão lateral K		Coeficiente de atrito da parede μ				Fator de referência para pressão local C_{op}
	γ_l	γ_u		ϕ_m	a_ϕ	K_m	a_m	$D1$	$D2$	$D3$	a_μ	
	Inf.	Sup.		Méd.	Fator	Méd.	Fator	Méd.	Méd.	Méd.	Fator	
Material padrão	6,0	22,0	40	35	1,30	0,50	1,50	0,32	0,39	0,50	1,40	1,0
Agregado	17,0	18,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,39	0,49	0,59	1,12	0,4
Cimento	13,0	16,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5
Farinha*	6,5	7,0	45	42	1,06	0,36	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,6
Batatas	6,0	8,0	34	30	1,12	0,54	1,11	0,33	0,38	0,48	1,16	0,5
Areia	14,0	16,0	39	36	1,09	0,45	1,11	0,38	0,48	0,57	1,16	0,4
Açúcar*	8,0	9,5	38	32	1,19	0,50	1,20	0,46	0,51	0,56	1,07	0,4

(fonte: adaptado de EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 99)

Os sólidos marcados com “*”, no quadro 3, são sólidos conhecidos por serem suscetíveis a explosões de poeira, e, portanto, os silos que os contém devem ser projetados considerando-se esta ação acidental. O valor característico inferior do peso específico (γ) fornecido não deve ser considerado para o projeto estrutural do silo, mas apenas para auxiliar na estimativa do volume necessário para armazenamento dos grãos. Para situações em que o custo de testes de laboratório é inviável, podem ser usados os valores do material padrão fornecido no quadro 3. Ao utilizar os valores dos materiais padrão deve-se considerar que esta simplificação pode ser completamente adequada para silos pequenos, entretanto, para silos grandes, tal simplificação pode ser muito ineficiente e economicamente injustificável (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 99, tradução nossa).

Para a definição do valor característico do coeficiente de atrito (μ), é necessário que seja definida qual é a categoria da superfície das paredes do silo (D1, D2, D3 ou D4, conforme aparece no quadro 4). Esta classificação é função do material que faz contato com os grãos armazenados, no caso de silos de concreto, normalmente o material que faz este contato é o próprio concreto, pois, como afirmam Safarian e Harris (1985, p. 78, tradução nossa), o concreto é um material inerte que não exige a presença de um revestimento protetor entre a parede e o material armazenado.

A obtenção dos valores de coeficiente de atrito referentes às superfícies pertencentes a categoria D4 é distinta das demais e deve ser calculada. No entanto, como esta categoria corresponde a superfícies irregulares, que não fazem parte do escopo deste trabalho, o método de determinação do coeficiente não será abordado.

Quadro 4 – Definições de superfície de paredes

Categoria	Título descritivo	Materiais típicos
D1	Atrito pequeno “Escorregadio”	Aço inoxidável polido 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 desenformado ou concreto envelhecido Aço carbono envelhecido (corroído) Aço resistente a abrasão Azulejos cerâmicos
D4	Irregular	Paredes horizontalmente onduladas Paredes com grandes anomalias

(fonte: adaptado de EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 35)

4.1.5 Cargas nas paredes verticais

As cargas atuantes nas paredes verticais dos silos são compostas de duas ações: uma fixa, chamada de carga simétrica, e uma livre, chamada de carga local. Estas duas ações devem ser consideradas atuando simultaneamente. Quando houver grandes excentricidade de enchimento e esvaziamento, são definidos diferentes casos de cargas, que não devem ser tomadas como atuando simultaneamente às cargas simétricas e locais. Os valores característicos dos carregamentos são calculados de formas distintas variando de acordo com o tipo de silo, que é definido conforme a esbeltez, exceto pelo caso de silos contendo sólido com ar aprisionado. Os tipos de silo e suas definições em função da relação entre altura e diâmetro são as seguintes (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 40, tradução nossa):

- a) silos esbeltos, $h_c/d_c \geq 2,0$;
- b) silos de esbeltez intermediária, $1,0 < h_c/d_c < 2,0$;
- c) silos entroncados, $0,4 < h_c/d_c \leq 1,0$;
- d) silos de retenção, $h_c/d_c \leq 0,4$ e com fundo plano;
- e) silos que contém sólidos com ar aprisionado.

Como este trabalho trata apenas de um silo do tipo esbelto, não serão apresentados os métodos de determinação das cargas para os demais tipos de silos.

4.1.5.1 Cargas de enchimento em silos esbeltos

Os valores de pressão horizontal (p_{hf}), pressão de atrito na parede (p_{wf}) e pressão vertical (p_{vf}), em qualquer profundidade referentes a carga simétrica de enchimento e armazenamento devem ser calculados de acordo com as seguintes fórmulas. (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 41, tradução nossa):

$$p_{hf}(z) = p_{ho} Y_J(z) \quad (\text{fórmula 1})$$

$$p_{wf}(z) = \mu p_{ho} Y_J(z) \quad (\text{fórmula 2})$$

$$p_{vf}(z) = \frac{p_{ho}}{K} Y_J(z) \quad (\text{fórmula 3})$$

$$p_{ho} = \gamma K z_o \quad (\text{fórmula 4})$$

$$z_o = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U} \quad (\text{fórmula 5})$$

$$Y_J(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_o}} \quad (\text{fórmula 6})$$

Sendo:

p_{hf} = pressão horizontal após enchimento;

p_{ho} = pressão horizontal assintótica após enchimento;

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

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

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

z_o = profundidade característica de Janssen;

μ = valor característico do coeficiente de atrito da parede vertical;

Y_J = função de variação da pressão de Janssen;

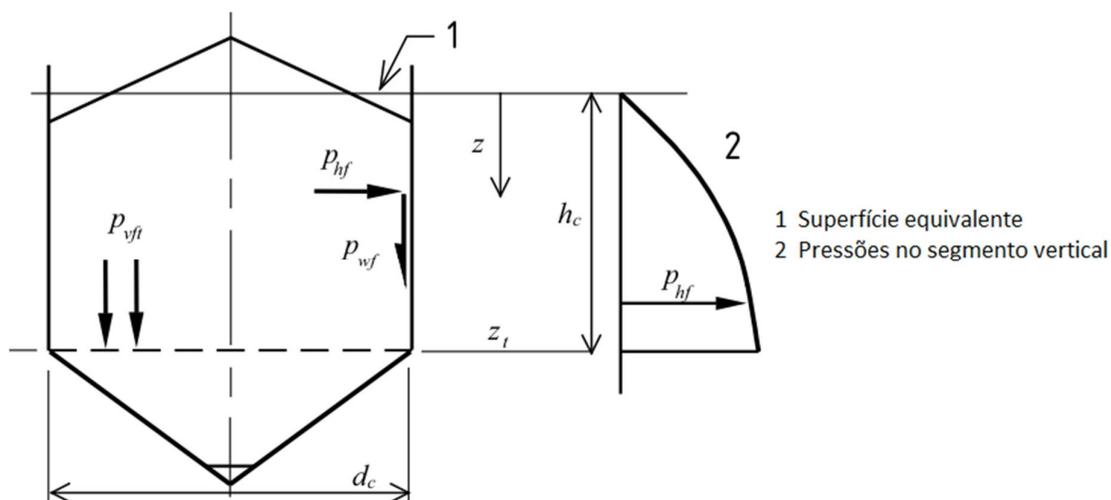
K = valor característico da razão de pressão lateral;

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

U = perímetro interno da seção transversal.

As pressões simétricas são indicadas na figura 7.

Figura 7 – Pressões simétricas de enchimento no segmento de parede vertical



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

As cargas locais são usadas para considerar a possibilidade de que hajam possíveis assimetrias associadas a excentricidades e imperfeições durante o processo de enchimento do silo. Estas cargas consistem apenas em cargas normais e não devem ser consideradas alterações nas pressões de atrito devidas a ela. Em silos da classe de avaliação de ações 1, as cargas locais podem ser desconsideradas. As cargas locais atuam conforme indicado na figura 8 e são calculadas de acordo com as seguintes fórmulas (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 42-43, tradução nossa):

$$p_{pf} = C_{pf} h_{hf} \quad (\text{fórmula 7})$$

$$C_{pf} = 0,21C_{op} [1 + 2E^2] (1 - e^{(-1,5[h_c/d_c - 1])}) \quad (\text{fórmula 8})$$

$$E = 2e_f / d_c \quad (\text{fórmula 9})$$

Sendo:

p_{pf} = pressão local após enchimento;

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

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

C_{op} = fator de referência do sólido para pressão local;

e_f = máxima excentricidade na superfície durante o enchimento;

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

Caso a fórmula 8 produza um resultado negativo, devemos tomar C_{pf} como igual a zero (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 43, tradução nossa):

$$C_{pf} = 0 \quad (\text{fórmula 10})$$

A altura da área onde a carga local é aplicada é definida pela fórmula 11:

$$s = \pi d_c / 16 \cong 0,2d_c \quad (\text{fórmula 11})$$

Sendo:

s = dimensão da zona afetada pela carga local.

A forma da pressão local de enchimento depende do tipo de construção do silo, classificadas da seguinte forma (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 43, tradução nossa):

- a) silos com paredes circulares espessas, caso de silos de concreto;
- b) silos com paredes circulares finas, caso de silos metálicos;
- c) silos não circulares.

Em silos com paredes circulares espessas (geralmente silos de concreto armado), a carga local age em dois quadrados de lado s , opostos um ao outro e com direção e sentido radial para fora. A carga local pode agir em qualquer altura do silo, como indicado na figura 8. Adicionalmente a esta pressão para fora, há uma pressão atuante no restante do perímetro do silo que age em sentido contrário (para dentro). Esta pressão é calculada de forma que o valor médio da pressão na altura de aplicação da carga local permaneça inalterado. O valor desta pressão é dada pela fórmula 12 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 43, tradução nossa):

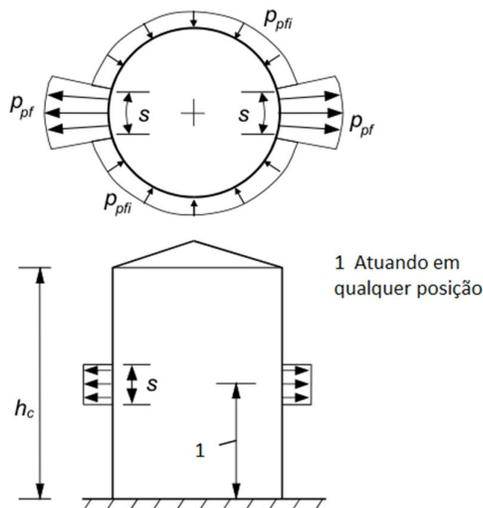
$$p_{pfi} = p_{pf} / 7 \quad (\text{fórmula 12})$$

Sendo:

p_{pfi} = pressão local inversa complementária após enchimento;

d_c = diâmetro do silo.

Figura 8 – Vista em planta e elevação das cargas locais – paredes espessas



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

Nos silos da classe de avaliação de ações 2, pode-se utilizar um método simplificado. Nesta simplificação, considera-se que o pior caso acontece quando a carga local é aplicada a meia altura do silo. A partir do aumento de tensão a meia altura devido a carga local, escala-se as demais tensões atuantes no silo com a mesma porcentagem. Por exemplo, se a carga local ocasionou um aumento de pressão de 20%, pode-se escalar as demais cargas em 20%, sem que seja necessário calcular a pressão em todas as alturas (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 44, tradução nossa).

Os silos com paredes finas ($d_c/t > 200$) e os silos com paredes não circulares não serão abordados por não fazerem parte do escopo deste trabalho.

4.1.5.2 Cargas de esvaziamento em silos esbeltos

As pressões simétricas de esvaziamento são determinadas pelas fórmulas 13 e 14 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 45, tradução nossa):

$$p_{he} = C_h p_{hf} \quad (\text{fórmula 13})$$

$$p_{we} = C_w p_{wf} \quad (\text{fórmula 14})$$

Sendo:

p_{he} = pressão horizontal durante o esvaziamento;

p_{hf} = pressão horizontal após enchimento;

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

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

C_h = fator de majoração da pressão horizontal de esvaziamento;

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

Para silos em que o esvaziamento acontece pelo topo, isto é, sem fluxo interno, os valores dos fatores de majoração são os seguintes (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 46, tradução nossa):

$$C_h = C_w = 1,0 \quad (\text{fórmula 15})$$

Para silos esbeltos nas classes de avaliação de ações 2 e 3, os fatores de majoração são os seguintes (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 46, tradução nossa):

$$C_h = C_o = 1,15 \quad (\text{fórmula 16})$$

$$C_w = 1,10 \quad (\text{fórmula 17})$$

Sendo:

C_o = fator de esvaziamento para todos os sólidos (1,15).

Quando o silo esbelto for da classe de avaliação de ações 1, e os valores médios de K e μ foram utilizados, os fatores de majoração serão os seguintes (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 46, tradução nossa):

$$C_h = 1,15 + 1,5(1 + 0,4e/d_c)C_{op} \quad (\text{fórmula 18})$$

$$C_w = 1,4(1 + 0,4e/d_c) \quad (\text{fórmula 19})$$

$$e = \max(e_f, e_o) \quad (\text{fórmula 20})$$

Sendo:

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

e_f = máxima excentricidade da superfície durante o enchimento;

e_o = excentricidade do centro da saída.

As cargas locais de esvaziamento dos silos são utilizadas para representar assimetrias acidentais que podem ocorrer durante o processo de esvaziamento do silo. Estas cargas consistem apenas em cargas normais e não devem ser consideradas alterações nas pressões de atrito devidas a ela. Assim como para o enchimento, as cargas locais de esvaziamento podem ser desprezadas caso o silo esteja enquadrado na classe de avaliação de ações 1. Para as demais classes, as pressões são representadas como indica a figura 9 e calculadas como com as seguintes fórmulas (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 47, tradução nossa):

$$p_{pe} = C_{pe} p_{he} \quad (\text{fórmula 20})$$

Sendo:

p_{pe} = pressão local durante o esvaziamento;

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

p_{he} = pressão horizontal durante o esvaziamento.

Caso $h_c/d_c > 1,2$, C_{pe} é calculado pela fórmula 21:

$$C_{pe} = 0,42C_{op}[1 + 2E^2](1 - \exp\{-1,5[(h_c/d_c) - 1]\}) \quad (\text{fórmula 21})$$

Se $h_c/d_c \leq 1,2$, C_{pe} será o maior valor entre as fórmulas 22, 23 e 24.

$$C_{pe} = 0,272C_{op}\{(h_c/d_c) - 1 + E\} \quad (\text{fórmula 22})$$

$$C_{pe} = 0 \quad (\text{fórmula 23})$$

$$E = 2e/d_c \quad (\text{fórmula 24})$$

$$e = \max(e_f, e_o) \quad (\text{fórmula 25})$$

Sendo:

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

A forma da pressão local de esvaziamento se comporta exatamente da mesma forma que a pressão local de enchimento. Em vista disso, deve-se consultar o item anterior (cargas de enchimento em silos esbeltos) para obter informações sobre as cargas locais de esvaziamento.

4.1.6 Cargas no fundo

A Norma EN 1991-4/2006 apresenta diversos procedimentos para a obtenção das cargas no fundo dos silos conforme o tipo do fundo. Os tipos de fundo, de acordo com a Norma, são os seguintes (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 66, tradução nossa):

- a) fundo plano;
- b) tremonha íngreme;
- c) tremonha rasa.

O fundo é considerado plano se sua inclinação com a horizontal α for inferior a 5° . O fundo será uma tremonha rasa se ele não for classificado como fundo plano ou tremonha íngreme. O fundo será uma tremonha íngreme caso a seguinte condição for satisfeita (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 66, tradução nossa):

$$\tan \beta < \frac{1-K}{2\mu_h} \quad (\text{fórmula 26})$$

Sendo:

β = ângulo de inclinação da tremonha medido da vertical;

K = valor característico inferior da razão de pressão lateral;

μ_h = valor característico inferior do coeficiente de atrito da parede da tremonha.

A pressão vertical média na transição entre o segmento de paredes verticais e a tremonha ou o fundo é determinada pela fórmula 27 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, p. 67, tradução nossa):

$$p_{vft} = C_b p_{vf} \quad (\text{fórmula 27})$$

Sendo:

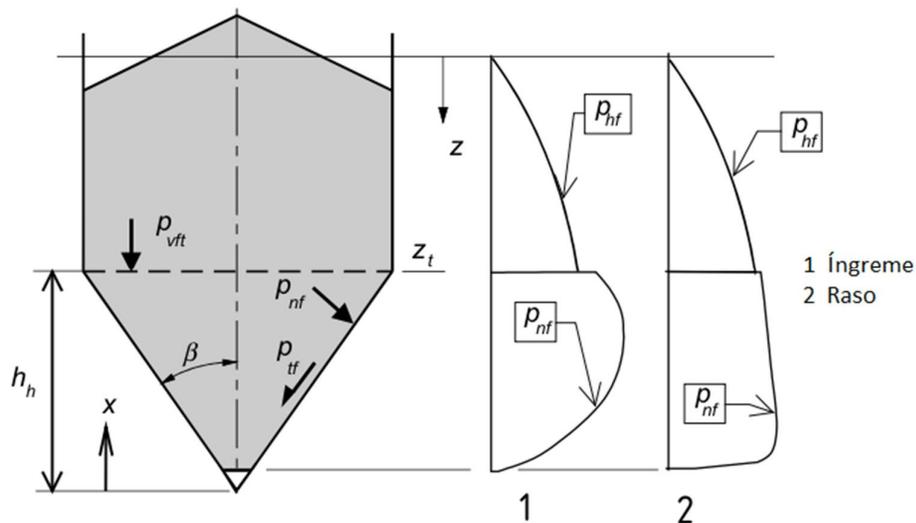
p_{vft} = tensão vertical nos sólidos armazenados na transição após enchimento;

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

C_b = fator de majoração do fundo.

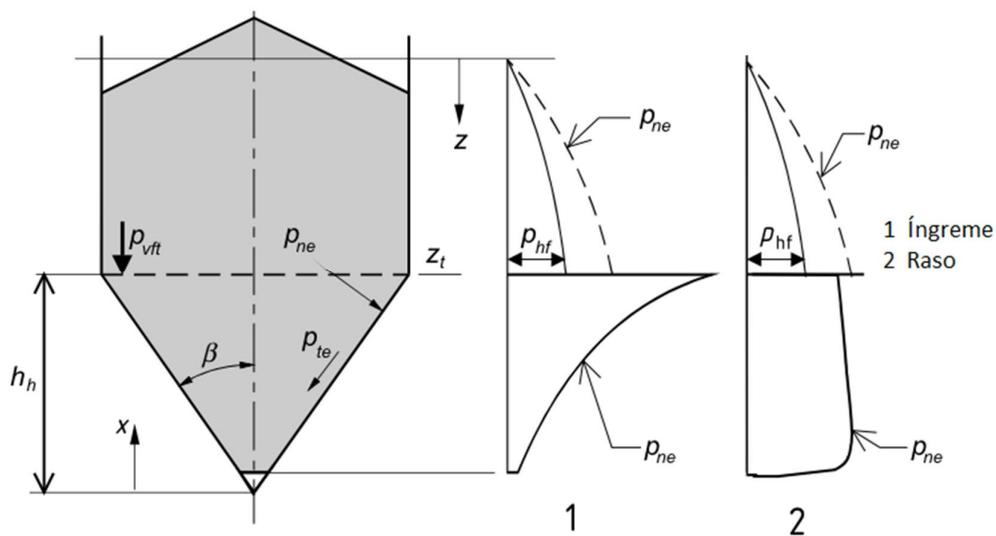
As figuras 9 e 10 apresentam as distribuições de pressões atuantes na tremonha durante o enchimento e o esvaziamento do silo.

Figura 9 – Distribuição das pressões de enchimento nas tremonhas



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

Figura 10 – Distribuição das pressões de esvaziamento nas tremonhas



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

Para silos das classes de avaliação de ações 2 e 3, o fator de majoração C_b deverá ser (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 68, tradução nossa):

$$C_b = 1,0 \quad (\text{fórmula 28})$$

Se o silo for pertencente a classe de avaliação de ações 1, o fator de majoração C_b deverá ser (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 68, tradução nossa):

$$C_b = 1,3 \quad (\text{fórmula 29})$$

Quando o silo é usado para armazenar materiais de baixa coesão ou materiais suscetíveis a intertravamento, como clínquer de cimento, por exemplo, é possível que os carregamentos apresentem comportamento dinâmico. Se isto ocorrer, o fundo ou a tremonha estarão sujeitos a cargas maiores, necessitando, portanto, de fatores de majoração mais elevados (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 68, tradução nossa). Estes fatores de majoração são dados pelas seguintes fórmulas:

$$C_b = 1,2, \text{ para classes de avaliação de ações 2 e 3} \quad (\text{fórmula 30})$$

$$C_b = 1,6, \text{ para classe de avaliação de ações 1} \quad (\text{fórmula 31})$$

A pressão vertical nos sólidos na altura x acima da base da tremonha, é determinada pela fórmula 32 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 68, tradução nossa):

$$p_v = \left(\frac{\gamma h_h}{n-1} \right) \left\{ \left(\frac{x}{h_h} \right) - \left(\frac{x}{h_h} \right)^n \right\} + p_{vft} \left(\frac{x}{h_h} \right)^n \quad (\text{fórmula 32})$$

$$n = S(F\mu_{heff} \cot \beta + F) - 2 \quad (\text{fórmula 33})$$

$$S = 2, \text{ para tremonhas cônicas ou piramidais} \quad (\text{fórmula 34})$$

$$S = 1, \text{ para tremonhas em cunha} \quad (\text{fórmula 35})$$

$$S = (1 + b/a), \text{ para tremonhas de seção transversal retangular} \quad (\text{fórmula 36})$$

Sendo:

p_v = tensão vertical no sólido armazenado;

p_{vft} = tensão vertical nos sólidos armazenados na transição após enchimento;

γ = valor característico superior do peso específico;

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

μ_{heff} = atrito efetivo da tremonha;

x = coordenada vertical com origem no ponto mais baixo da tremonha;

S = fator geométrico da tremonha;

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

β = ângulo de inclinação da tremonha medido da vertical;

b = largura de um silo poligonal;

a = comprimento de um silo poligonal.

4.1.6.1 Cargas em tremonhas íngremes

O coeficiente de atrito efetivo μ_{heff} utilizado para as definição das cargas nas tremonhas íngremes no enchimento e no esvaziamento deve ser (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 70, tradução nossa):

$$\mu_{heff} = \mu_h \quad (\text{fórmula 37})$$

Sendo:

μ_{heff} = coeficiente de atrito efetivo;

μ_h = valor característico do coeficiente de atrito da parede da tremonha.

Na situação de enchimento, a tensão vertical p_v no sólido em qualquer altura deve ser determinada pela fórmula 32, porém com $F=F_f$ (fórmula 38) e com o valor de n dado pela fórmula 39 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 71, tradução nossa):

$$F_f = 1 - \frac{b}{\left(1 + \frac{\tan \beta}{\mu_h}\right)} \quad (\text{fórmula 38})$$

$$n = S(1 - b)\mu_h \cot \beta \quad (\text{fórmula 39})$$

Sendo:

b = coeficiente empírico (0,2);

S = fator geométrico da tremonha (fórmulas 34, 35 e 36).

A pressão normal p_{nf} e a tensão de atrito p_{tf} em qualquer ponto na parede da tremonha, na situação de enchimento, devem ser definidas pelas fórmulas 40 e 41 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 71, tradução nossa):

$$p_{nf} = F_f p_v \quad (\text{fórmula 40})$$

$$p_{tf} = \mu_n F_f p_v \quad (\text{fórmula 41})$$

Sendo:

p_{nf} = pressão normal à parede da tremonha após enchimento;

p_v = tensão vertical no sólido armazenado;

p_{tf} = tensão de atrito após enchimento.

Na situação de esvaziamento, a tensão vertical p_v no sólido em qualquer altura deve ser determinada pelas fórmulas 35 e 36, porém com $F=F_e$ (fórmulas 42 e 43)(EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 71, tradução nossa):

$$F_e = \frac{1 + \sin \phi_i \cos \varepsilon}{1 - \sin \phi_i \cos(2\beta + \varepsilon)} \quad (\text{fórmula 42})$$

$$\varepsilon = \phi_{wh} + \sin^{-1} \left\{ \frac{\sin \phi_{wh}}{\sin \phi_i} \right\} \quad (\text{fórmula 43})$$

$$\phi_{wh} = \tan^{-1} \mu_n \quad (\text{fórmula 44})$$

Sendo:

ϕ_i = valor característico do ângulo de atrito interno do sólido;

β = ângulo de inclinação da tremonha medido da vertical;

ϕ_{wh} = ângulo do atrito da parede da tremonha entre o sólido e a parede;

μ_h = valor característico do coeficiente de atrito da parede da tremonha.

A pressão normal p_{ne} e a tensão de atrito p_{te} em qualquer ponto na parede da tremonha, na situação de esvaziamento, devem ser definidas pelas fórmulas 45 e 46 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 72, tradução nossa):

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

$$p_{te} = \mu_h F_e p_v \quad (\text{fórmula 46})$$

Sendo:

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

p_v = tensão vertical no sólido armazenado;

p_{te} = tensão de atrito de esvaziamento.

4.1.6.2 Cargas em tremonhas rasas

O coeficiente de atrito efetivo μ_{heff} utilizado para a definição das cargas nas tremonhas rasas no enchimento e no esvaziamento deve ser (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 72, tradução nossa):

$$\mu_{heff} = \frac{1 - K}{2 \tan \beta} \quad (\text{fórmula 47})$$

Sendo:

μ_{heff} = coeficiente de atrito efetivo;

Na situação de enchimento, a tensão vertical p_v no sólido em qualquer altura deve ser determinada pela fórmula 32, porém com $F = F_f$ (fórmula 48) e com o valor de n dado pela fórmula 49 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 73, tradução nossa):

$$F_t = 1 - \left\{ b / (1 + \tan \beta / \mu_{heff}) \right\} \quad (\text{fórmula 48})$$

$$n = S(1 - b)\mu_{heff} \cot \beta \quad (\text{fórmula 49})$$

Sendo:

b = coeficiente empírico (0,2);

S = fator geométrico da tremonha (fórmulas 34, 35 e 36).

A pressão normal p_{nf} e a tensão de atrito p_{tf} em qualquer ponto na parede da tremonha, na situação de enchimento, devem ser definidas pelas fórmulas 50 e 51 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 73, tradução nossa):

$$p_{nf} = F_f p_v \quad (\text{fórmula 50})$$

$$p_{tf} = \mu_{heff} F_t p_v \quad (\text{fórmula 51})$$

Sendo:

p_{nf} = pressão normal à parede da tremonha após enchimento;

p_v = tensão vertical no sólido armazenado;

p_{tf} = tensão de atrito após enchimento.

Para tremonhas rasas, as cargas de esvaziamento podem ser consideradas idênticas às de enchimento (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 73, tradução nossa).

4.2 CARGAS PERMANENTES

As cargas permanentes são os carregamentos que atuarão sobre a estrutura durante toda sua vida útil e, por este motivo, devem ser consideradas em todas as combinações de ações. Estas cargas são provenientes do peso próprio dos elementos da construção. Podemos citar alguns destes elementos (SAFARIAN; HARRIS, 1985, p. 65, tradução nossa):

- a) peso do próprio silo: paredes, cobertura, tremonha, vigas, pilares;
- b) peso de equipamentos internos e externos, como escadarias e plataformas;
- c) peso de equipamentos instalados na cobertura, como coletores de poeira e esteiras.

O peso próprio dos elementos estruturais podem ser estimados pelo projetista através de pré-dimensionamentos e de valores de peso específico dos materiais empregados. No entanto, não há como estimar o peso dos equipamentos que serão instalados no silo, logo, estes devem ser fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos, conforme a necessidade.

4.3 CARGAS DE EQUIPAMENTOS

Segundo Safarian e Harris (1985, p. 67, tradução nossa), os equipamentos, além do seu peso próprio (classificado como cargas permanentes), podem aplicar carregamentos dinâmicos consideravelmente severos à estrutura. Teoricamente, os fabricantes dos equipamentos são capazes de prever o carregamento que seus produtos aplicarão à estrutura, porém, se, durante a operação de determinado equipamento, ele apresentar vibrações excessivas, outros carregamentos poderão ser influenciados. Esta vibração, por exemplo, pode ser capaz de aumentar a densidade do material armazenado, alterando as pressões nas paredes e no fundo dos silos. Outro exemplo interessante é o caso de uma esteira de abastecimento do silo aplicar um esforço horizontal na cobertura da estrutura quando sofre cargas de vento. Desta forma, a consideração dos possíveis esforços causados por equipamentos, além do peso próprio, pode ser importante.

4.4 CARGAS DE VENTO

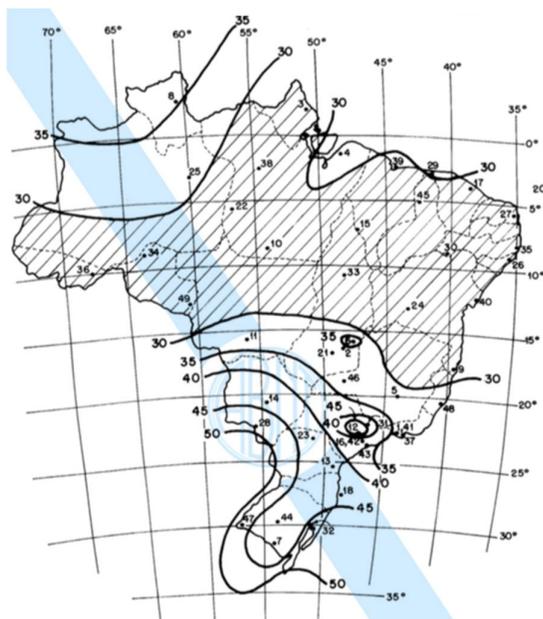
Todos os silos devem ser projetados para resistir ao tombamento causado por ventos, principalmente quando estão vazios, pois quando cheios, o peso dos materiais armazenados

aumenta a estabilidade da estrutura. Os efeitos de vizinhança podem ser muito importantes para o projeto de silos, principalmente quando o projeto envolve grupos ou baterias de silos (SAFARIAN; HARRIS, 1985, p. 66-67, tradução nossa).

A estimativa das cargas de vento no Brasil deve ser feita com o uso da NBR 6123: forças devidas ao vento em edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988) ou de simulação em túnel de vento. Segundo a Norma Brasileira, deve-se seguir os seguintes passos para a determinação destas forças:

- a) determinação da velocidade básica do vento V_o através de mapa de isopletas oferecido pela Norma (figura 11);
- b) determinação do fator topográfico S_1 ;
- c) determinação do fator S_2 , que combina a rugosidade do terreno, a variação de velocidade dos ventos em função da altura e as dimensões básicas da estrutura;
- d) determinação do fator estatístico S_3 , que considera o uso da construção e a segurança necessária para tal uso;
- e) cálculo da velocidade característica V_k , conforme fórmula 55;
- f) cálculo da pressão dinâmica atuante na estrutura q , conforme fórmula 56;
- g) determinação do coeficientes de pressão externo, conforme quadro 7;
- h) cálculo das forças atuantes, conforme fórmula 57.

Figura 11 – Mapa de isopletas da velocidade básica (m/s)



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

O fator topográfico S_1 assume os seguintes valores (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 5):

- a) 1,0 para terrenos planos;
- b) valor que deve ser calculado através de diversas fórmulas, para taludes ou morros;
- c) 0,9 para vales profundos, totalmente protegidos dos ventos.

Para determinar o fator S_2 , devemos definir a categoria do terreno, a classe da construção e a altura considerada. De posse destas informações, consultamos o valor de S_2 no quadro 5.

As categorias para determinação do fator S_2 , de acordo com a NBR 6123, são as seguintes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8):

- a) categoria 1: superfícies lisas e extensas, e.g. mar calmo, lagos e rios;
- b) categoria 2: terrenos abertos, em nível, com poucos obstáculos, e.g. campos, fazendas sem morros;
- c) categoria 3: terrenos com obstáculos, e.g. fazendas com morros, casas de campo;
- d) categoria 4: terrenos cobertos por obstáculos, e.g. parques, pequenas cidades;
- e) categoria 5: terrenos cobertos por grandes e numeroso obstáculos, e.g. centros de grandes cidades, complexos industriais.

As classes de edificações para determinação do fator S_2 , de acordo com a NBR 6123, são as seguintes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 9):

- a) classe A: edificação cuja maior dimensão não exceda 20 m;
- b) classe B: edificação cuja maior dimensão esteja entre 20 e 50 m;
- c) classe C: edificação cuja maior dimensão exceda 50 m.

Quadro 5 – Fator S_2

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

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

Os valores do fator estatístico S_3 são apresentados no quadro 6.

Quadro 6 – Valores mínimos do fator estatístico S_3

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações 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, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

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

A velocidade característica e a pressão dinâmica são calculadas através das fórmulas 52 e 53.

$$V_k = V_o S_1 S_2 S_3 \quad (\text{fórmula 52})$$

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (\text{fórmula 53})$$

Sendo:

V_k = velocidade característica do vento;

V_o = velocidade básica do vento;

S_1 = fator topográfico;

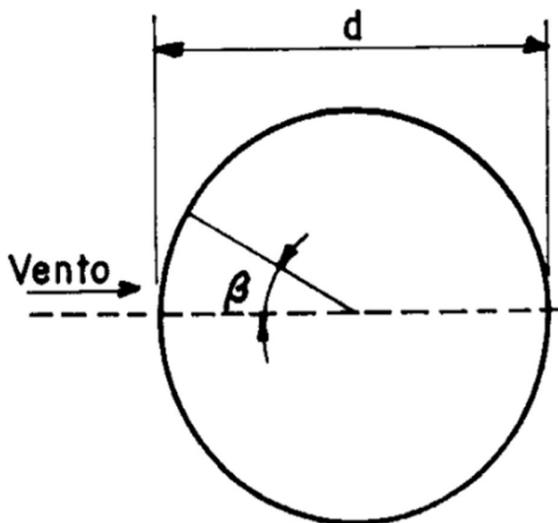
S_2 = fator de rugosidade do terreno, variação de velocidade do vento em função da altura e dimensões da construção;

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

q = pressão dinâmica atuante na estrutura.

Os coeficientes de pressão externa C_p para cilindros são obtidos através do quadro 7, variando com o ângulo, como indicado na figura 12.

Figura 12 – Ângulo de incidência do vento



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

Quadro 7 – Coeficientes de pressão externa C_p para cilindros

β	Coeficiente de pressão externa C_p			
	Superfícies rugosas ou com saliências		Superfície lisa	
	$h_c/d_c = 10$	$h_c/d_c \leq 2,5$	$h_c/d_c = 10$	$h_c/d_c \leq 2,5$
0°	+1,0	+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
60°	-0,95	-0,8	-1,2	-1,05
70°	-1,25	-1,1	-1,4	-1,25
80°	-1,2	-1,05	-1,45	-1,3
90°	-1,0	-0,85	-1,4	-1,2
100°	-0,8	-0,65	-1,1	-0,85
120°	-0,5	-0,35	-0,6	-0,4
140°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25
160°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25
180°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25

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

A força externa à edificação F_e é calculada pelas fórmulas 54.

$$F_e = qC_eA \quad (\text{fórmula 54})$$

Sendo:

F_e = força externa;

q = pressão dinâmica atuante na estrutura;

C_p = coeficiente de pressão externa;

A = área de referência;

4.5 CARGAS TÉRMICAS

Conforme afirmam Safarian e Harris (1985, p. 67, tradução nossa), há dois tipos de efeitos térmicos de grande importância para a estrutura de um silo. O primeiro é o gradiente de temperatura que atravessa a parede, causado pelo armazenamento de materiais mais quentes que a temperatura ambiente. O segundo é a variação de temperatura diária devido a radiação solar intensa, que pode causar contrações e expansões problemáticas em grupos de silos. Tensões provocadas pelo último podem fazer com que as paredes de concreto dos silos fissurem, admitindo mais umidade ao interior do silo e reduzindo o tempo de armazenamento dos grãos. O efeito da temperatura é mais preocupante em silos metálicos, que podem chegar a ruína pelas expansões e contrações térmicas diárias, que compactam o material armazenado a cada iteração. Em vista disso, é muito importante que as cargas térmicas sejam avaliadas apropriadamente.

5 CARACTERÍSTICAS DO SILO PROJETADO

A geometria do silo foi definida seguindo-se as etapas abaixo:

- a) definição da capacidade de armazenamento;
- b) definição da forma básica;
- c) determinação do volume mínimo necessário;
- d) determinação do ângulo da tremonha;
- e) cálculo das dimensões características;
- f) definição da forma da tampa;
- g) definição de estruturas e detalhes adicionais.

A capacidade de armazenamento do silo geralmente é definida conforme solicitação do proprietário ou cliente, no entanto, neste trabalho, foi adotado o valor de 200 toneladas de arroz (2000 kN), de forma que o projeto fosse enquadrado na classe de avaliação de carga 2, pois é a classe que permite mais precisão nos resultados sem que seja necessário colher amostras do material armazenado e fazer testes em laboratório.

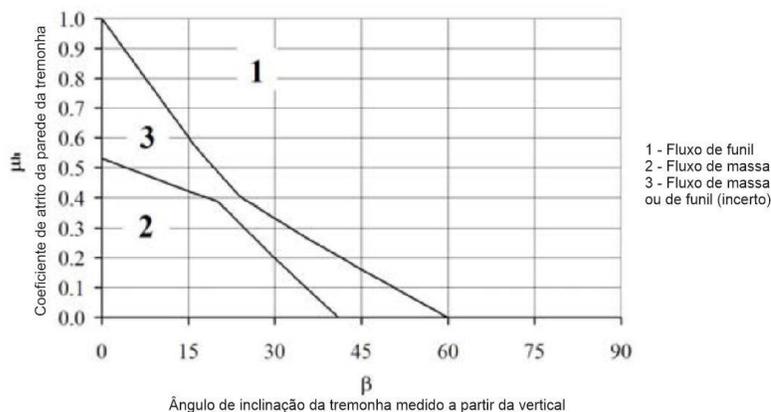
Definiu-se que a forma básica do silo seria cilíndrica, esbelta e com tremonha cônica, pois a forma cilíndrica apresenta momento de flexão reduzido nas suas paredes sob tensão lateral uniforme, o que proporciona economia de material em relação aos silos de seção retangular (SAFARIAN; HARRIS, 1985, p. 78).

O volume mínimo necessário é calculado com o uso do valor característico inferior do peso específico, fornecido por Puzzi (1986, p. 131) como sendo de 5,80 kN/m³. Assim o valor do volume de armazenamento do silo é de aproximadamente 345 m³ para a capacidade adotada.

O ângulo da tremonha foi definido de forma que não houvesse dúvida do tipo de fluxo que ocorreria durante o esvaziamento. Conseguem-se esta informação com o uso da figura 13, fornecida pelo European Committee for Standardization (2006, p. 100). Geralmente é ideal que o fluxo seja de massa, pois permite que todos os sólidos permaneçam armazenados durante o mesmo período de tempo, evitando acúmulos de material na tremonha e tornando desnecessária a utilização de equipamentos específicos para facilitar a movimentação dos grãos nestas regiões de acúmulo. No entanto, para que seja possível afirmar que o fluxo é realmente de massa, o

ângulo da tremonha (medido em relação a vertical) deveria ser muito baixo, acarretando maior custo para o proprietário. Assim, toma-se o ângulo da tremonha como 60°, uma vez que para este ângulo o fluxo será sempre de funil, independente dos demais dados da estrutura.

Figura 13 – Gráfico para determinação do tipo de fluxo



(fonte: adaptado de EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 100)

O diâmetro do silo e as alturas características do cilindro e da tremonha são então calculadas com o uso do volume estimado em função das características definidas anteriormente, através das seguintes fórmulas:

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

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

Sendo:

β = ângulo de inclinação da tremonha medido da vertical (°);

Vol = volume mínimo necessário do silo;

h_c = altura do segmento de paredes verticais do silo (m);

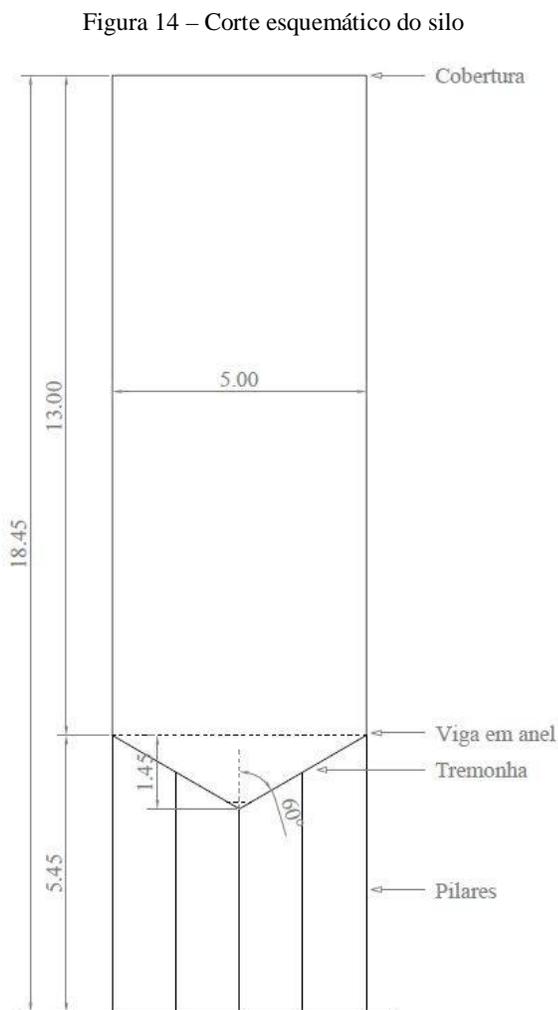
d_c = dimensão característica interna da seção transversal do silo (m);

h_h = altura da tremonha, medida do ponto mais baixo até a transição (m).

A cobertura do silo transmitirá seus esforços às paredes, que, por sua vez, descarregarão numa viga circular que será projetada na transição entre a tremonha e as paredes do silo. A tremonha também será suportada apenas por esta viga, não havendo qualquer outro suporte previsto exclusivamente para a tremonha. Esta viga transmitirá seus esforços às fundações através de oito pilares igualmente espaçados pelo seu perímetro. Todas as peças do silo são engastadas nas peças adjacentes.

A cobertura do silo será plana e com uma abertura central (0,50x0,50m) para o enchimento do silo.

A figura 14 apresenta um corte esquemático, indicando as formas básicas definidas para o silo projetado.



(fonte: elaborado pelo autor)

6 CARGAS E COMBINAÇÕES APLICADAS

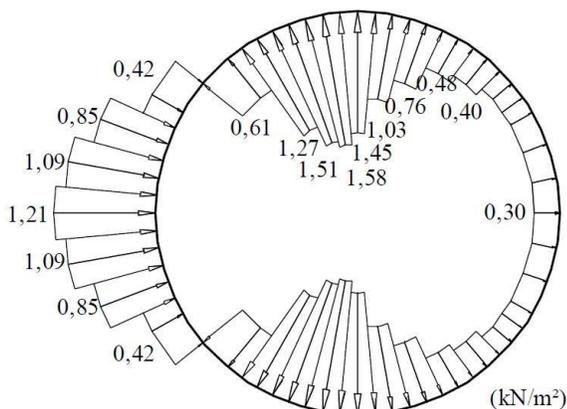
As cargas aplicadas ao modelo estrutural no *software Robot Structural Analysis Professional 2015* foram as seguintes:

- a) peso próprio;
- b) vento;
- c) carga simétrica de enchimento e esvaziamento;
- d) cargas locais de enchimento e esvaziamento;
- e) cargas acidentais.

As demais cargas apresentadas no capítulo 4, térmicas e de equipamentos, não foram incluídas. As cargas térmicas não foram consideradas pois o grão de arroz é armazenado no silo a temperatura ambiente, tornando esta verificação dispensável. As cargas de equipamentos, no entanto, são necessárias, porém não foram incluídas pois não encontra-se na literatura fontes confiáveis destes dados. Assim, para a obtenção da estimativa das cargas de equipamentos, deve-se contatar o fornecedor do equipamento.

O peso próprio é calculado automaticamente pelo *Robot Structural Analysis Professional 2015*, tornando dispensável o cálculo manual. A carga acidental considerada foi de 3,0 kN/m², aplicada na cobertura da estrutura, tomada como terraço, de acordo com a NBR 6120: cargas para o cálculo de estruturas de edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980, p. 4). As cargas de vento, baseadas na NBR 6123: forças devidas ao vento em edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988), são apresentadas na figura 15.

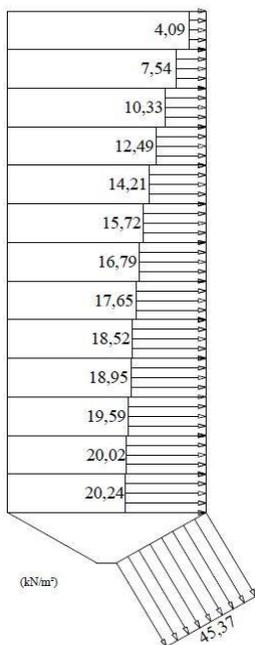
Figura 15 – Cargas de vento aplicadas



(fonte: elaborado pelo autor)

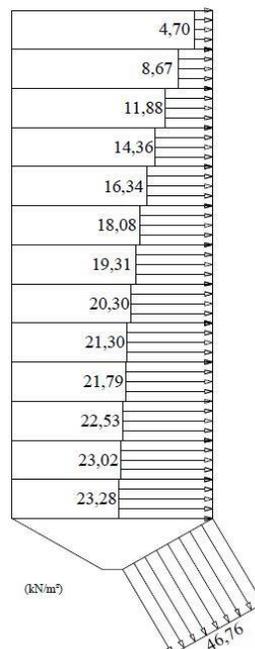
As figuras 16 e 17 apresentam os valores aplicados das cargas horizontais de enchimento e esvaziamento simétrico. As suas respectivas cargas de atrito e cargas verticais são apresentadas no quadro 8. Para a análise da tremonha foram considerados os valores máximos (no vértice inferior), pois ela tem altura relativamente pequena, o que justifica esta simplificação.

Figura 16 – Cargas simétricas de enchimento (kN/m²)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 17 – Cargas simétricas de esvaziamento (kN/m²)



(fonte: elaborado pelo autor)

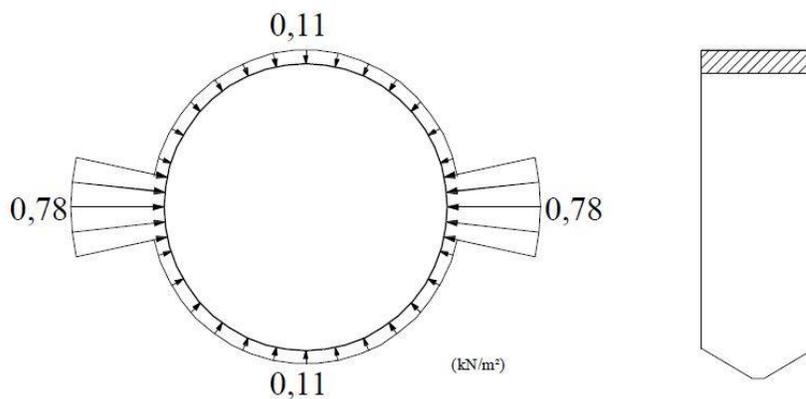
Quadro 8 – Cargas de atrito e cargas verticais aplicadas durante o enchimento e o esvaziamento do silo

z (m)	Enchimento		Esvaziamento
	Pressão de atrito (kN/m ²)	Pressão vertical (kN/m ²)	Pressão de atrito (kN/m ²)
Cilindro			
0	0	0	0
1	2,63	5,87	2,89
2	4,42	11,09	4,86
3	5,58	16,30	6,14
4	6,28	20,87	6,91
5	6,82	24,78	7,50
6	7,13	28,04	7,84
7	7,36	31,95	8,10
8	7,52	34,56	8,27
9	7,59	37,17	8,35
10	7,67	39,78	8,44
11	7,67	42,39	8,44
12	7,67	44,34	8,44
13	7,75	46,30	8,53
Tremonha			
14,45	9,07	46,30	9,35

(fonte: elaborado pelo autor)

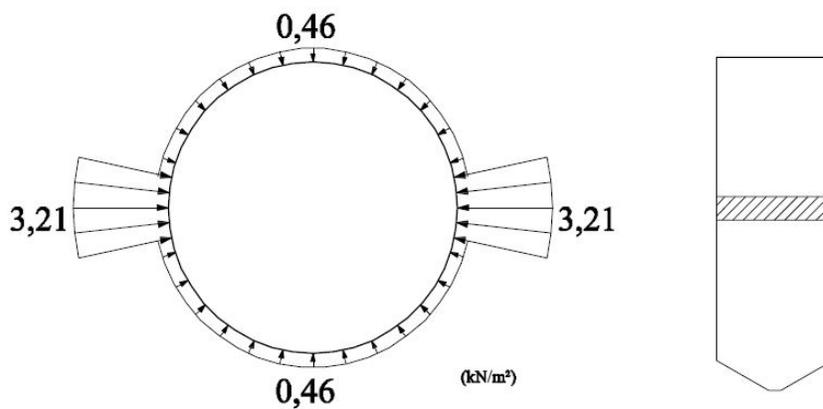
As cargas locais, no entanto, foram aplicadas em três posições diferentes do silo, no centro, no topo e na base do cilindro, em faixas de um metro de altura. Como as cargas locais servem para considerar possíveis assimetrias durante o enchimento ou o esvaziamento do silo, elas devem ser aplicadas em diversas direções em função da simetria da estrutura. Neste caso elas foram aplicadas segundo os eixos X e Y, para considerar a combinação delas com os efeitos das cargas de vento. Os valores destas cargas nas diferentes alturas de aplicação são apresentados nas figuras 18, 19 e 20.

Figura 18 – Cargas locais aplicadas no topo do silo



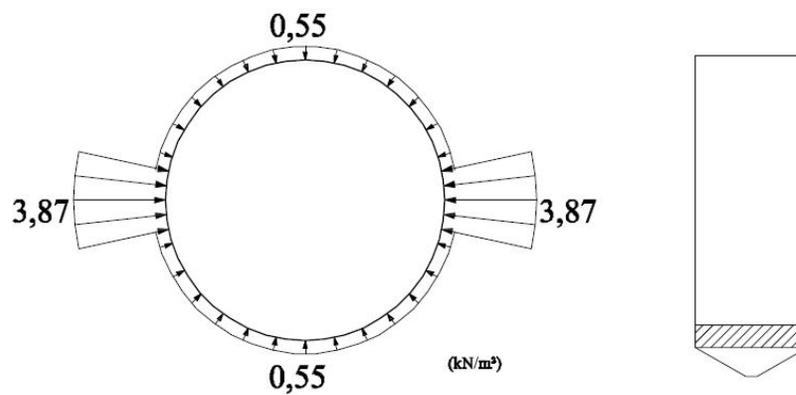
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 19 – Cargas locais aplicadas no centro do silo



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 20 – Cargas locais aplicadas na base do silo



(fonte: elaborado pelo autor)

As combinações de ações foram calculadas seguindo os critérios e os coeficientes da NBR 8681: ações e segurança nas estruturas – procedimento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), sendo os coeficientes de ponderação e fatores de combinação apresentados no quadro 9.

Quadro 9 – Coeficientes de ponderação e fatores de combinação

Carga	Coeficiente de ponderação	Fatores de combinação
Peso próprio (desfavorável)	1,4	–
Peso próprio (favorável)	0,9	–
Carga acidental	1,5	0,8
Vento	1,4	0,6
Carga simétrica	1,5	0,8
Carga local	1,5	0,8

(fonte: elaborado pelo autor)

As cargas aplicadas formam um total de 37 combinações de ações distintas e 54 situações de cálculo (destes, 17 são casos simples). Este número elevado de combinações deve-se a possibilidade de variação da posição de atuação das cargas locais em relação a direção do vento. O quadro 10 apresenta as combinações consideradas e o quadro 11 o complementa apresentando os significados das abreviações.

Quadro 10 – Combinações de ações

Combinação	Componentes	Ação variável principal
1	PP (favorável) + VENTO	VENTO
2	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC TOP 1	AC
3	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC MID 1	AC
4	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC BOT 1	AC
5	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC TOP 1	AC
6	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC MID 1	AC
7	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC BOT 1	AC
8	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC TOP 1	VENTO
9	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC MID 1	VENTO
10	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC BOT 1	VENTO
11	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC TOP 1	VENTO
12	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC MID 1	VENTO
13	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC BOT 1	VENTO
14	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC TOP 1	SÓLIDOS
15	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC MID 1	SÓLIDOS
16	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC BOT 1	SÓLIDOS
17	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC TOP 1	SÓLIDOS
18	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC MID 1	SÓLIDOS
19	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC BOT 1	SÓLIDOS
20	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC TOP 2	AC
21	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC MID 2	AC
22	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC BOT 2	AC
23	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC TOP 2	AC
24	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC MID 2	AC
25	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC BOT 2	AC

continua

continuação

26	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC TOP 2	VENTO
27	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC MID 2	VENTO
28	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC BOT 2	VENTO
29	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC TOP 2	VENTO
30	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC MID 2	VENTO
31	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC BOT 2	VENTO
32	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC TOP 2	SÓLIDOS
33	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC MID 2	SÓLIDOS
34	PP + AC + VENTO + ENCH SIM + ENCH LOC BOT 2	SÓLIDOS
35	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC TOP 2	SÓLIDOS
36	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC MID 2	SÓLIDOS
37	PP + AC + VENTO + ESV SIM + ESV LOC BOT 2	SÓLIDOS

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 11: Significados das abreviações do quadro 10

Abreviação	Significado
PP	Cargas do peso próprio
AC	Cargas acidentais
VENTO	Cargas de vento
ENCH SIM	Carga simétrica de enchimento
ESV SIM	Carga simétrica de esvaziamento
ENCH LOC TOP 1	Carga local de enchimento aplicada no topo do silo, paralela à incidência do vento
ENCH LOC MID1	Carga local de enchimento aplicada no centro do silo, paralela à incidência do vento
ENCH LOC BOT 1	Carga local de enchimento aplicada na base do silo, paralela à incidência do vento
ESV LOC TOP 1	Carga local de esvaziamento aplicada no topo do silo, paralela à incidência do vento
ESV LOC MID 1	Carga local de esvaziamento aplicada no centro do silo, paralela à incidência do vento
ESV LOC BOT 1	Carga local de esvaziamento aplicada na base do silo, paralela à incidência do vento
ENCH LOC TOP 2	Carga local de enchimento aplicada no topo do silo, perpendicular à incidência do vento
ENCH LOC MID 2	Carga local de enchimento aplicada no centro do silo, perpendicular à incidência do vento
ENCH LOC BOT 2	Carga local de enchimento aplicada na base do silo, perpendicular à incidência do vento
ESV LOC TOP 2	Carga local de esvaziamento aplicada no topo do silo, perpendicular à incidência do vento
ESV LOC MID 2	Carga local de esvaziamento aplicada no centro do silo, perpendicular à incidência do vento
ESV LOC BOT 2	Carga local de esvaziamento aplicada na base do silo, perpendicular à incidência do vento
SÓLIDOS	Carga simétrica + carga local referente ao caso

(fonte: elaborado pelo autor)

7 DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA

Neste capítulo serão apresentadas as solicitações e o dimensionamento das seguintes peças da estrutura:

- a) cobertura;
- b) paredes verticais;
- c) tremonha;
- d) vigas em anel;
- e) pilares.

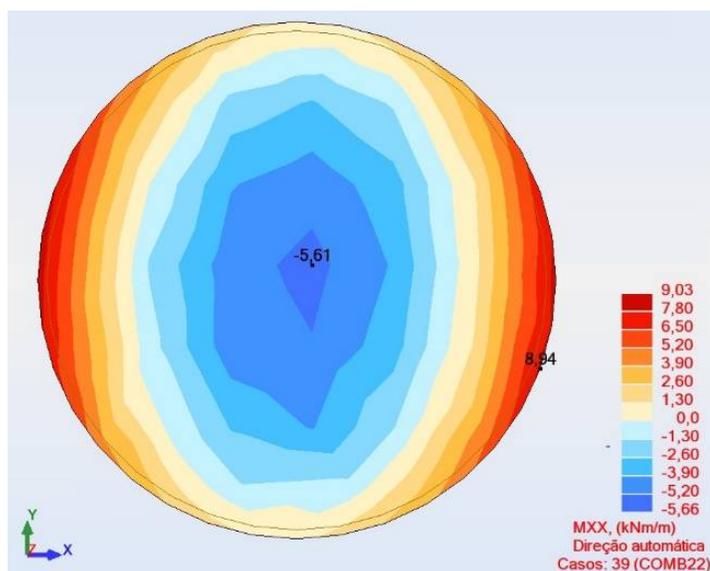
Todos as peças foram dimensionadas com aço CA-50, CA-60 e concreto C25.

7.1 COBERTURA

A cobertura do silo foi modelada como uma laje rígida de 15 cm de espessura. As figuras 21 e 22 mostram as solicitações máximas (momentos M_{xx} e M_{yy}) resultantes da modelagem, correspondentes às combinações 22 e 24. A partir destes valores, calcula-se a área de aço com o auxílio do programa computacional VigaS¹, considerando-se a laje como uma viga de um metro de largura e 15 cm de altura.

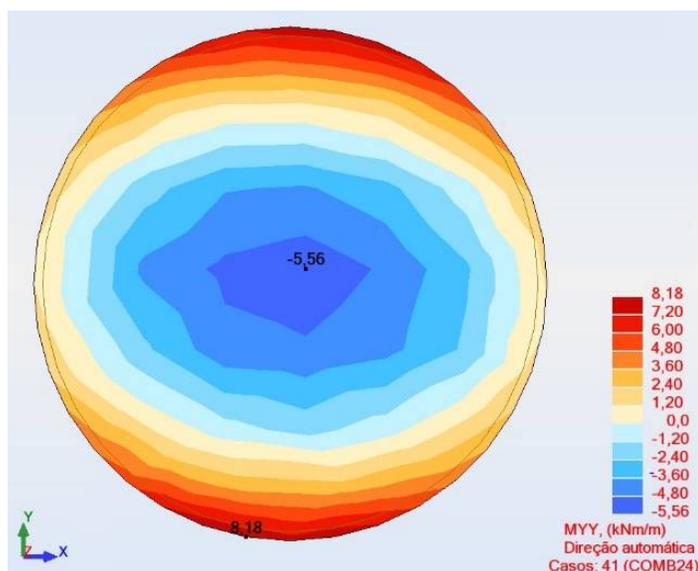
¹ Programa desenvolvido pelo Prof. Roberto Domingo Rios e pelo bolsista Serguem Trott no Programa de Iniciação Científica PIBIC/CNPq (2004-2005), na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Figura 21 – Momento de flexão na direção x do eixo local (M_{xx}) da cobertura



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 22 – Momento de flexão na direção y do eixo local (M_{yy}) da cobertura

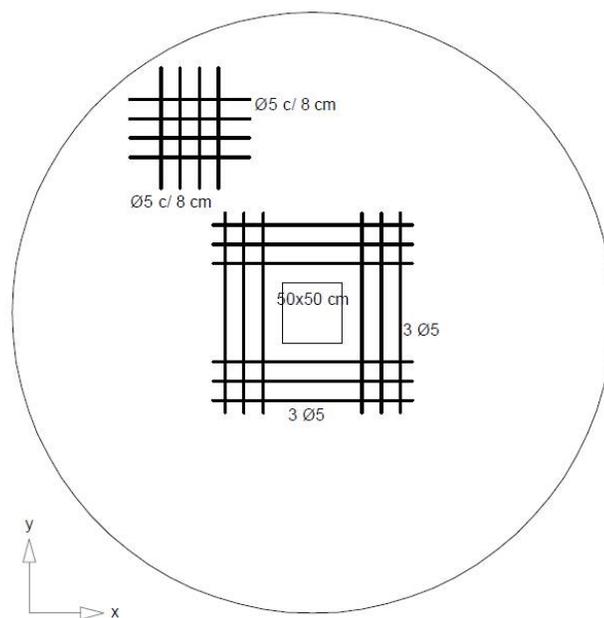


(fonte: elaborado pelo autor)

Calcula-se então que, para uma laje com cobrimento de 3 cm ($d=12$ cm), a área de aço calculada deverá ser de 2,47 cm² para a região engastada e 1,80 cm² (valor mínimo admissível por norma) para a região central da laje. A partir destas áreas de aço adotam-se malhas de diâmetro 5 mm a cada 8 cm para a armadura inferior e barras de 4,2 mm a cada 7,5 cm (4,2 mm a cada 1,7°) para a armadura superior, além de uma armadura de distribuição de diâmetro 5,0 mm a cada 10

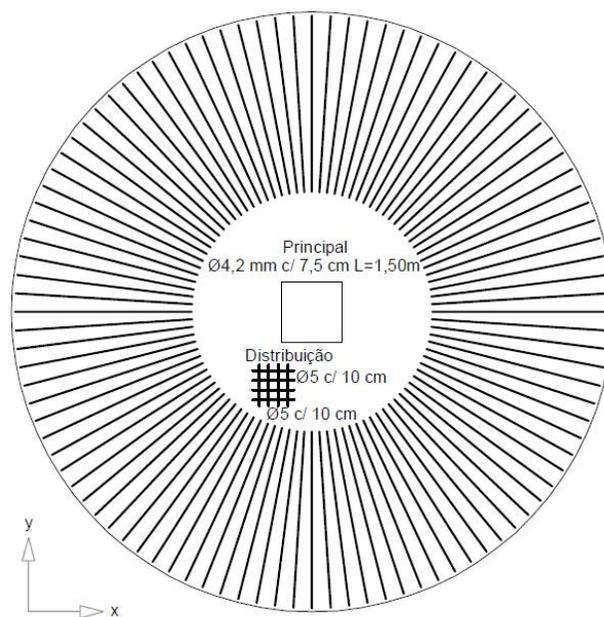
cm, conforme apresentado nas figuras 23 e 24. A figura 25 mostra um detalhe da conexão entre a cobertura e as paredes verticais.

Figura 23 – Armadura inferior da cobertura



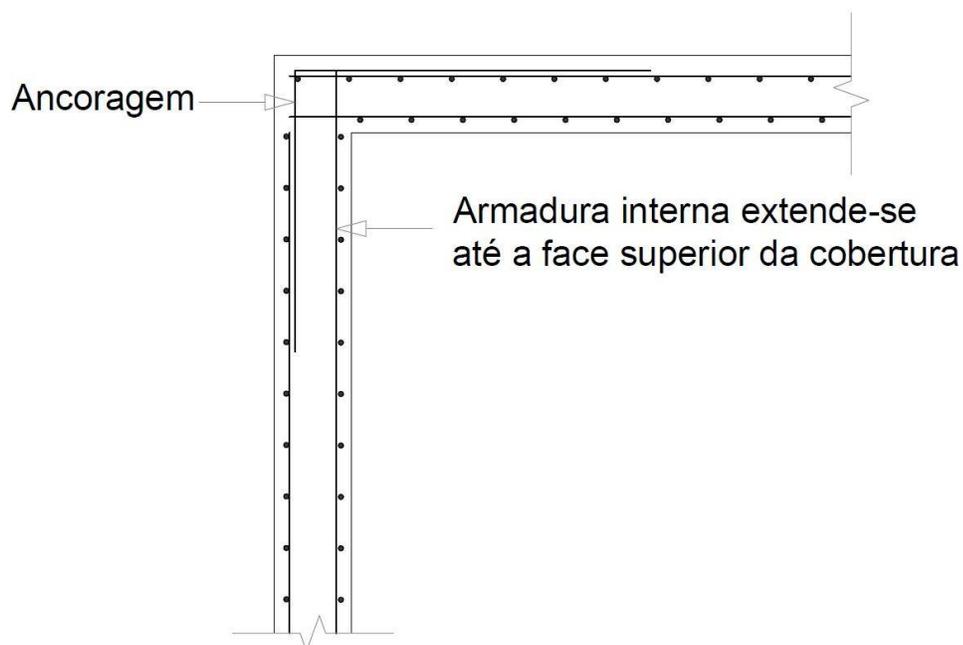
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 24 – Armadura superior da cobertura



(fonte: elaborado pelo autor)

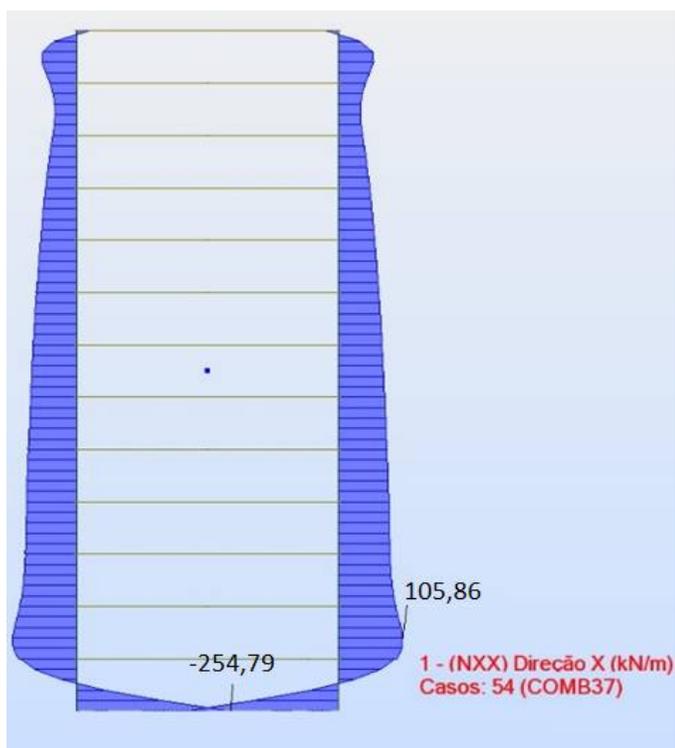
Figura 25 – Detalhe da ligação entre cobertura e paredes verticais



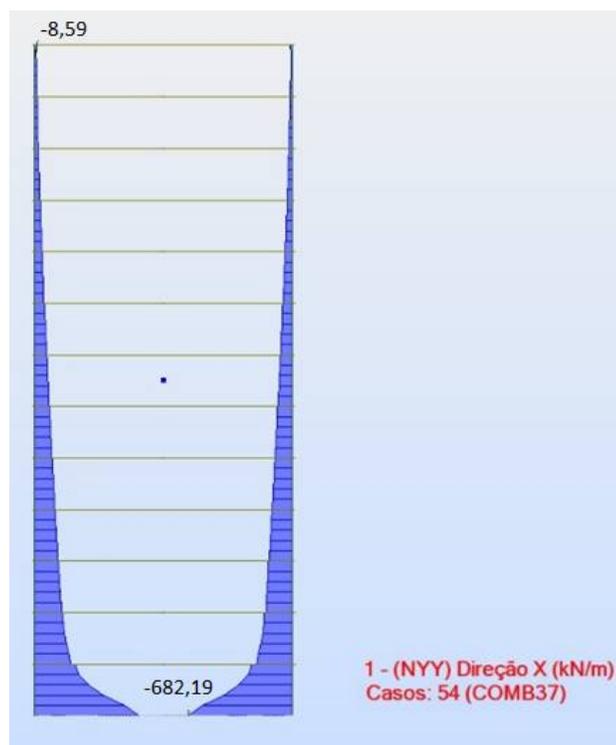
(fonte: elaborado pelo autor)

7.2 PAREDES VERTICAIS

As paredes verticais são dimensionadas de forma mais simplificada, uma vez que os esforços mais significantes são os de tração e de compressão. Neste trabalho foram encontrados valores de momentos nas paredes verticais da ordem de 0,50 kNm/m enquanto as solicitações de forças N_{xx} e N_{yy} são da ordem de 100 kN/m, confirmando que o dimensionamento para momento é dispensável. Com base nestas considerações, as paredes são verificadas em tração e compressão simples. Os valores das solicitações máximas N_{xx} e N_{yy} (combinação 37) são apresentados nas figuras 26 e 27, sendo os valores “xx” na direção longitudinal e os “yy” na direção circunferencial. Os valores negativos indicam compressão enquanto os positivos indicam tração.

Figura 26 – Força na direção x do eixo local (N_{xx}) das paredes verticais

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 27 – Força na direção y do eixo local (N_{yy}) das paredes verticais

(fonte: elaborado pelo autor)

Portanto verifica-se o N_{xx} , que apresenta valores negativos (compressão), apenas calculando a capacidade do concreto de suportar a carga, sem contribuição da armadura de aço, conforme as fórmulas 57 e 58. Os valores de N_{yy} são calculados considerando-se que apenas a armadura de aço resistirá aos esforços, uma vez que o concreto não apresenta boa resistência a tração, conforme as fórmulas 59 e 60, adaptadas de Montoya et al (2011, p. 438).

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

$$N \leq f_{cd} \times esp \quad (\text{fórmula 58})$$

$$A_s = \frac{N}{\sigma_{s,adm}} \quad (\text{fórmula 59})$$

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

Sendo:

f_{cd} = resistência de projeto do concreto;

f_{ck} = resistência característica do concreto;

N = força axial;

esp = espessura da parede;

A_s = área de aço;

$\sigma_{s,adm}$ = tensão admissível do aço;

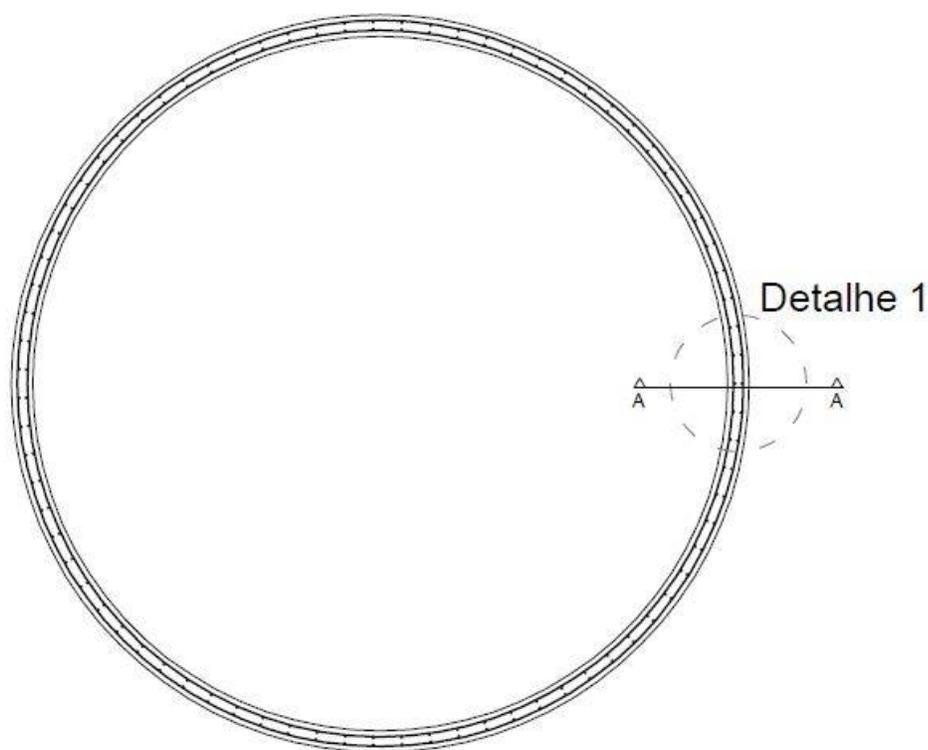
f_{yk} = resistência característica do aço.

Assim, confirma-se que, com os 15 cm de espessura previstos, a parede é capaz de suportar 2679 kN, o que é um valor muito superior ao de sua solicitação em qualquer ponto. A espessura

não é então reduzida porque o autor segue a indicação de Safarian e Harris (1985, p. 92), que afirma que paredes de espessura menor de 15 cm não devem ser projetadas, pois apresentam dificuldades executivas e pequenos erros de construção podem ocasionar grandes efeitos adversos na resistência da parede, além de facilitar a entrada de umidade.

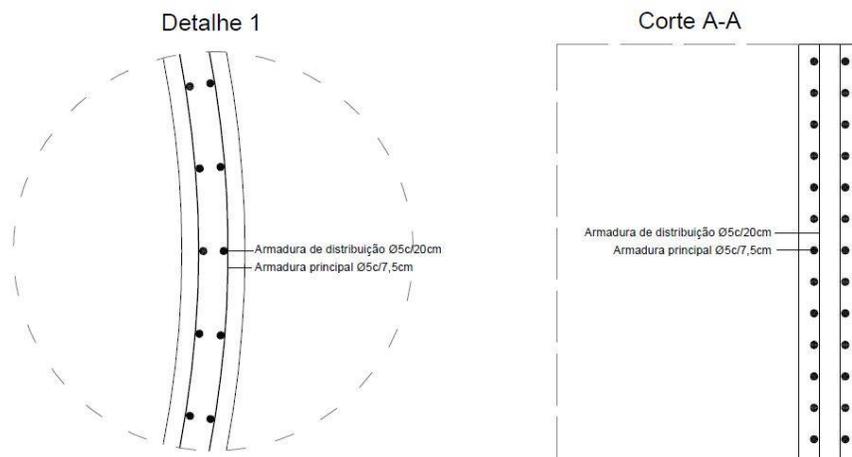
O valor da máxima área de aço para as paredes do silo é de $2,44 \text{ cm}^2/\text{m}$, calculado para o segundo metro do silo. A partir desta área de aço, adota-se uma armadura disposta na horizontal, em formato de anel, de 5 mm de diâmetro a cada 7,5 cm e uma armadura de distribuição de diâmetro 5 mm a cada 20 cm, conforme informam as figuras 28 e 29.

Figura 28 – Armadura das paredes do silo



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 29 – Armadura das paredes do silo, corte e detalhe

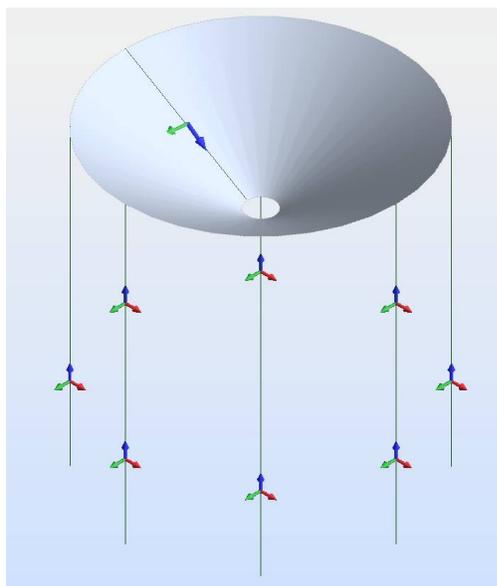


(fonte: elaborado pelo autor)

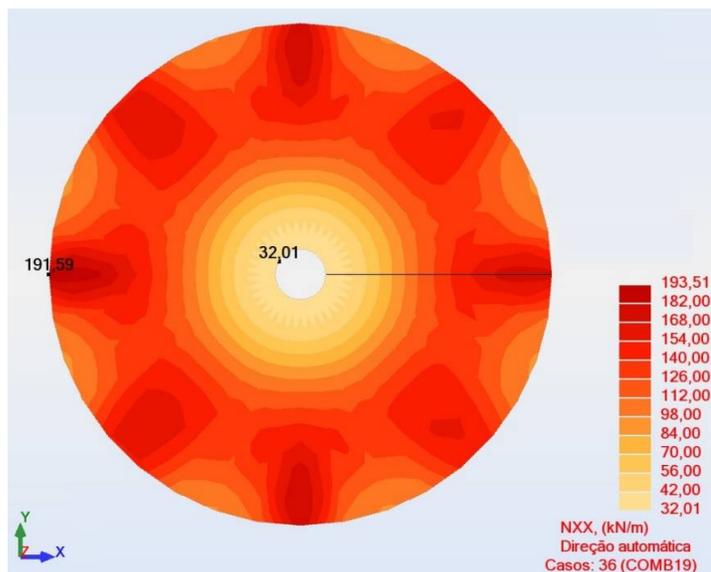
7.3 TREMONHA

O procedimento para a tremonha é similar ao das paredes verticais, a diferença é que ele está em tração nos dois sentidos “xx” (radial) e “yy” (circunferencial), identificados na figura 30. As figuras 31 e 32 apresentam os valores máximos (combinações 19 e 37) de N_{xx} e N_{yy} para a tremonha. Estes valores devem ser utilizados nas fórmulas 59 e 60 para a obtenção das áreas de aço necessárias.

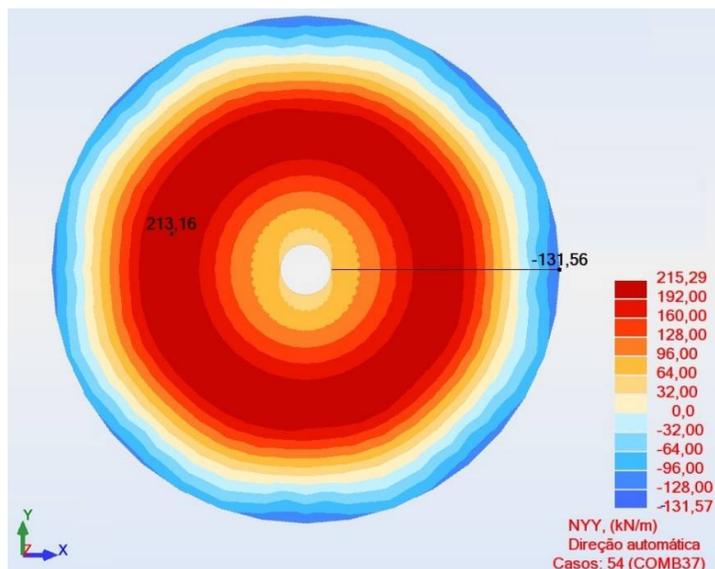
Figura 30 – Eixos locais da tremonha e dos pilares (y verde, x azul, z vermelho)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 31 – Força na direção x do eixo local (N_{xx}) da tremonha

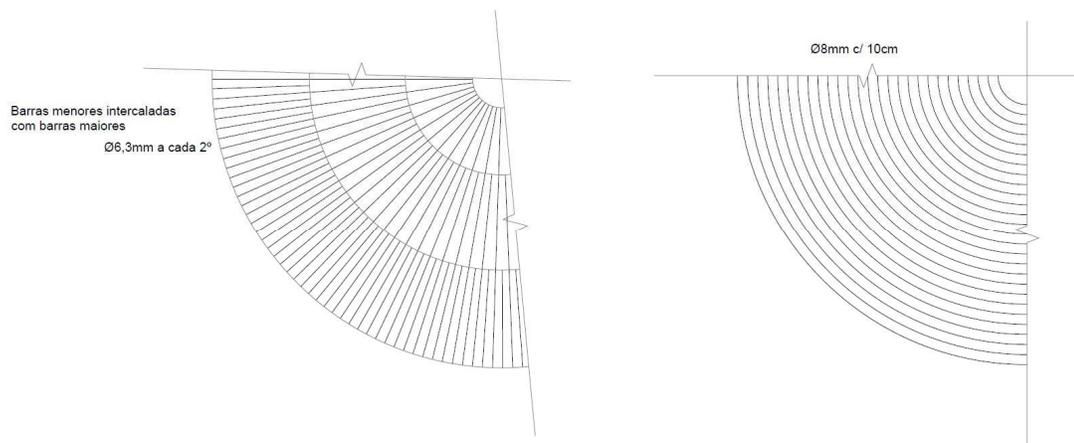
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 32 – Força na direção y do eixo local (N_{yy}) da tremonha

(fonte: elaborado pelo autor)

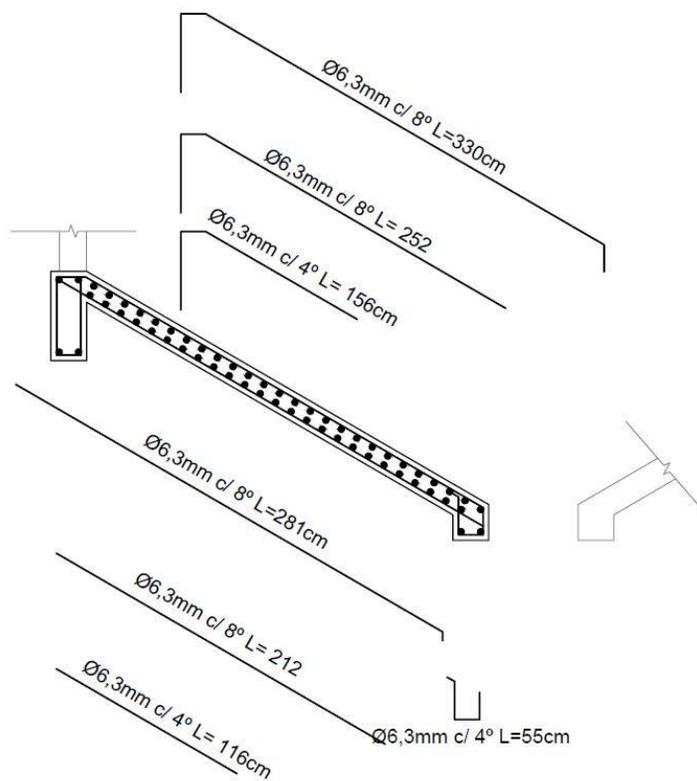
As áreas de aço encontradas são 4,37 cm²/m para a direção “xx” (direção radial) e 4,89 cm²/m para a direção “yy” (direção horizontal). Adotam-se barras 6,3 mm na direção radial a cada 7 cm (1,7°) e anéis de diâmetro 8 mm a cada 10 cm na horizontal, conforme indica a figura 33.

Figura 33 – Armaduras da tremonha – planta



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 34 – Armaduras da tremonha – corte

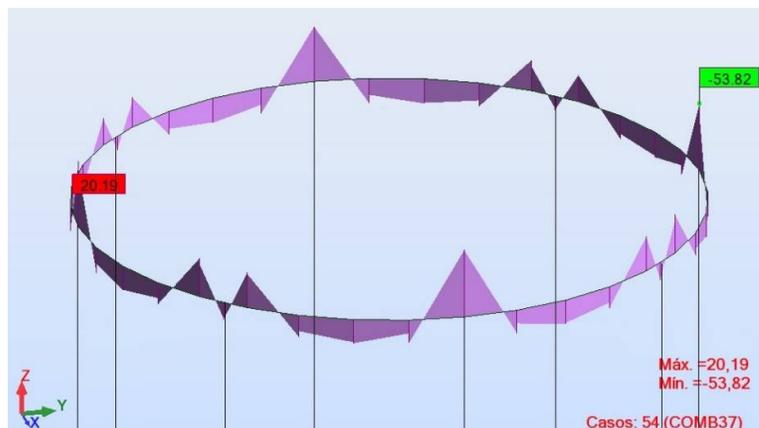


(fonte: elaborado pelo autor)

7.4 VIGAS

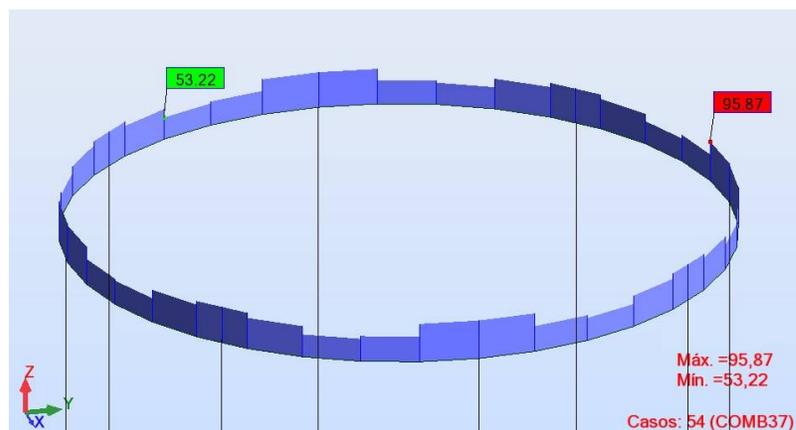
As vigas devem ser dimensionadas ao momento de flexão e ao esforço de corte. Este dimensionamento foi realizado com a utilização do programa “VigaS²”, empregando-se os dados de solicitação máximos (combinação 37) apresentados nas figuras 35 e 36.

Figura 35 – Momento de flexão nas vigas



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 36 – Esforço de corte nas vigas



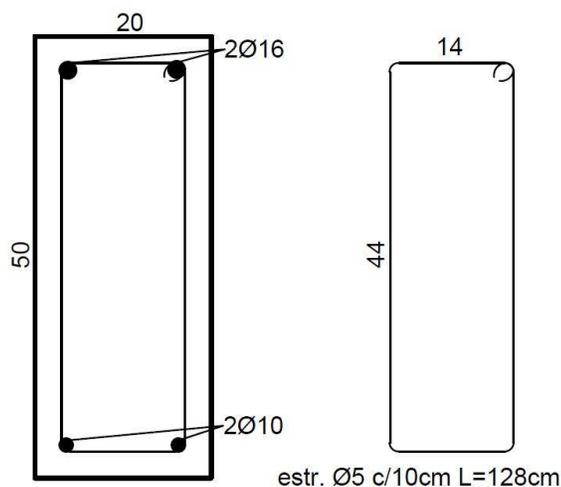
(fonte: elaborado pelo autor)

Desta forma, as áreas de aço nas regiões onde o momento de flexão é positivo são de 1,48 cm² e na região onde o momento é negativo são de 4,01 cm². A armadura transversal deverá ser de 3,70 cm²/m. A partir destas áreas de aço, adotam-se 2 barras de 10 mm para a armadura positiva

² Programa desenvolvido pelo Prof. Roberto Domingo Rios e pelo bolsista Serguem Trott no Programa de Iniciação Científica PIBIC/CNPq (2004-2005), na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

(no centro do vão entre os pilares) e 2 barras de 16 mm para a armadura negativa (região de apoio nos pilares), com estribos de 5 mm a cada 10 cm, conforme indica a figura 37.

Figura 37 – Detalhe das armaduras das vigas

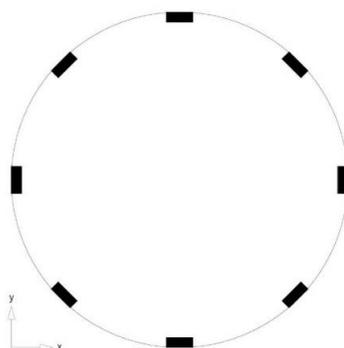


(fonte: elaborado pelo autor)

7.5 PILARES

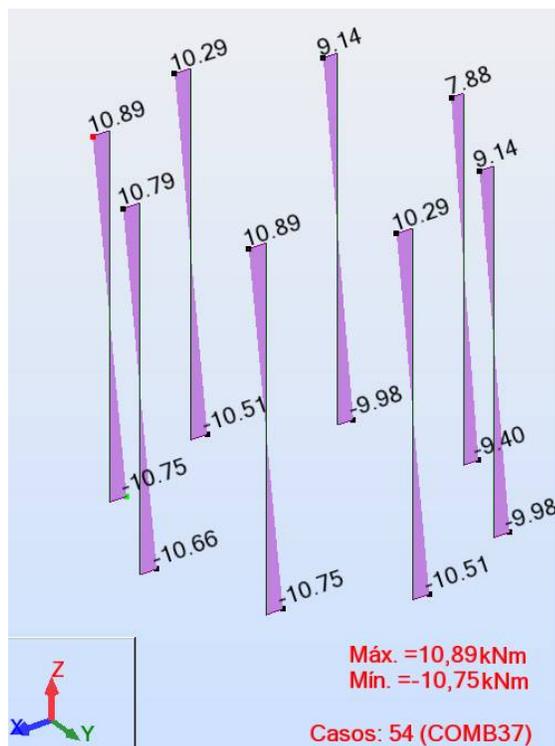
Os pilares são dimensionados com o uso do programa “Flexão Composta” (CAMPOS FILHO, 1990), considerando-se as dimensões de 15x40 cm e 5,45 m de altura. Os valores das solicitações são apresentados nas figuras 39 e 40. Assim, para estas solicitações, as áreas de aço calculadas são 5,55 cm² para as armaduras longitudinais. A figura 38 apresenta a disposição básica dos pilares em relação ao silo.

Figura 38 – Posição dos pilares em relação cilindro



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 39 – Momento de flexão nos pilares



(fonte: elaborado pelo autor)

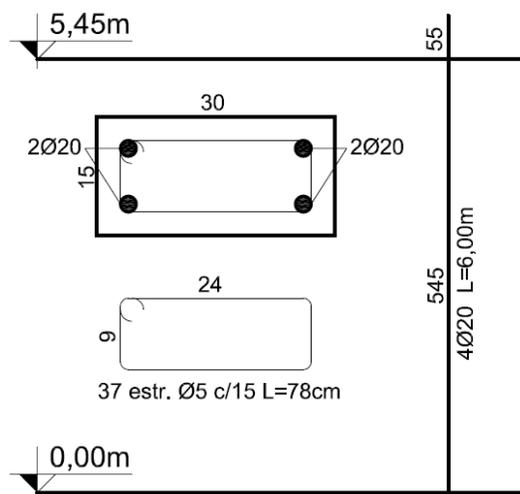
Figura 40 – Esforço axial nos pilares



(fonte: elaborado pelo autor)

Para resistir a estas solicitações, foram projetadas 4 barras de 20 mm de diâmetro por pilar, dispostas nos quatro cantos da seção e estribos de diâmetro 5 mm a cada 15 cm, conforme indicado na figura 41.

Figura 41 – Detalhe das armaduras dos pilares



(fonte: elaborado pelo autor)

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como um dos objetivos praticar os conceitos e habilidades adquiridos ao longo da graduação em Engenharia Civil. Além disso, foi possível expandir os conhecimentos sobre as estruturas do tema escolhido: silos de armazenamento de grãos.

No decorrer do trabalho, constatou-se que para dimensionar estruturas de silos de armazenamento de grãos é necessário considerar diversos fatores, como cargas de vento, relevo e implantação no terreno, forma, tipo de estrutura a ser utilizado, o peso da estrutura e, principalmente, o tipo de grão a ser armazenado.

Sendo que o principal fator a ser considerado é o tipo de grão que será estocado na estrutura. Pois o grão influencia no comportamento das cargas atuantes nas paredes e no fundo. Sendo assim, é importante que seja armazenado sempre o mesmo tipo adequado de grão, de acordo com o projeto, para garantir a eficácia e segurança da estrutura.

Observa-se que, embora existam diversas dissertações e teses acerca de silos, há pouca literatura sobre o tema no Brasil, justamente um dos maiores produtos de grãos do mundo. De forma que os projetistas brasileiros interessados em trabalhar neste ramo são forçados a procurar fontes na literatura estrangeira.

Neste trabalho foram apresentadas as etapas que devem ser cumpridas para a elaboração de um projeto de silo cilíndrico de concreto armado para armazenamento de grãos – no caso, arroz em Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul – fazendo uso de Normas Internacionais, Normas Brasileiras, programas computacionais e experiência de projetistas veteranos encontradas na literatura estrangeira. A partir destas etapas, confirma-se que o objetivo inicial do projeto foi cumprido.

REFERÊNCIAS

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

_____. **NBR 6120**: cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 6123**: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas – procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

CABRÉ, F. M.; MONTOYA, J.; MESEGUER, Á.G.; PORTERO, J. C. A.; **Hormigón armado**. 15. Ed. Barcelona: Gustavo Gili, 2011.

CAMPOS FILHO, A. **Flexão composta**. Porto Alegre, 1990. Programa computacional. Disponível em: <<http://chasqueweb.ufrgs.br/~americo/eng01112/>>. Acesso em: 22 abr. 2015.

CANTRELL, R. Rice: why it's so essencial for global security and stability. **Food Safety and Security**: economic perspectives. [s.l.], v. 7, n. 2, May 2002. Disponível em: <<https://www.hsdl.org/?view&did=446238>>. Acesso em 29 set. 2014.

ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M. de; SCHIAVON, R. de A.; VANIER, N. L.; RUTZ, D. Medidas tecnológicas na qualidade do arroz. **Planeta Arroz**, Pelotas, 2 maio 2011. Disponível em: <http://planetaarroz.com.br/site/artigos_detalle.php?idArtigo=91>. Acesso em 29 set 2014.

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

FREITAS, E. das G. A. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano**. 2001. 175f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. [Levantamento de dados da safra agrícola nacional no mês de agosto de 2014]. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**: pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. Rio de Janeiro, v. 27, n. 8, ago. 2014. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_\[mensal\]/Fasciculo/lspa_201408.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/lspa_201408.pdf)>. Acesso em 28 set. 2014.

MERCH, R. F.; GOMES, N. K. **Armazenamento de Grãos**. Porto Alegre: CESA, 1982.

PUZZI, D. **Abastecimento e Armazenagem de Grãos**. Campinas: Instituto Campaneiro de Ensino Agrícola, 1986.

_____. **Manual de Armazenamento de Grãos**. São Paulo: Ceres, 1977.

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