

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

Luiz Roberto Ceolin Meneghetti

**SILOS CIRCULARES EM ALVENARIA DE BLOCOS
CERÂMICOS: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA FORMA NO
COMPORTAMENTO ESTRUTURAL**

Porto Alegre
julho 2010

LUIZ ROBERTO CEOLIN MENEGHETTI

**SILOS CIRCULARES EM ALVENARIA DE BLOCOS
CERÂMICOS: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA FORMA NO
COMPORTAMENTO ESTRUTURAL**

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: Jean Marie Désir
Coorientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Porto Alegre
julho 2010

LUIZ ROBERTO CEOLIN MENEGHETTI

**SILOS CIRCULARES EM ALVENARIA DE BLOCOS
CERÂMICOS: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA FORMA NO
COMPORTAMENTO ESTRUTURAL**

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 Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 15 de julho de 2010

Prof. Jean Marie Désir
Doutor pela UFRJ
Orientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
PhD pela University of Leeds, UK
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Roberto Domingo Rios (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

**Prof. Uziel Cavalcanti de Medeiros
Quinino (UNISINOS)**
Me. pela UFRGS

**Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
(UFRGS)**
PhD pela University of Leeds, Grã-Bretanha

Prof. Jean Marie Désir (UFRGS)
Dr. pela UFRJ

Dedico este trabalho a meus pais, Robertinho e Zenita, que sempre me apoiaram e, especialmente durante o período da Graduação, estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Jean Marie Désir, orientador deste trabalho, por todo o ensinamento passado e, principalmente, pelo tempo doado para orientação deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, coorientador deste trabalho, pelo conhecimento transmitido durante a execução deste trabalho e no período em que fui bolsista do Laboratório de Modelos e Ensaios Estruturais – LEME/UFRGS.

Agradeço a Profa. Carin Maria Schmitt, regente da disciplina, pelo acompanhamento e suporte durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Robertinho Luiz Meneghetti e Zenita Ceolin Meneghetti, por serem os principais responsáveis pela minha formação como pessoa.

Agradeço às minhas irmãs, Rosana Ceolin Meneghetti e Priscila Ceolin Meneghetti, pelo carinho e respeito desde sempre.

Agradeço a todos os meus colegas e amigos, em especial a Alisson Ramos Madeira, por todos os momentos que passamos durante a nossa graduação.

Agradeço a todos os professores com os quais convivi durante estes últimos anos, pelas experiências e conhecimentos transmitidos, fundamentais na minha formação acadêmica.

Não se pode criar experiência. É preciso passar por ela.

Albert Camus

RESUMO

MENEGHETTI, L. R. C. **Silos circulares em alvenaria de blocos cerâmicos**: análise da influência da forma no comportamento estrutural. 2010. 80 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O crescimento da produção brasileira de grãos nos últimos anos aumenta a importância de uma maior capacidade de armazenamento destes na cadeia produtiva do Brasil. Visto que a malha de transporte rodoviário e ferroviário não apresenta as melhores condições para o escoamento da produção, o aumento do armazenamento local surge como opção para se amenizar estas limitações. Atualmente, a solução tem sido a construção de silos metálicos, porém a necessidade de mão de obra especializada e os altos custos envolvidos muitas vezes tornam inviável a execução destes em pequenas e médias propriedades. Neste contexto, silos em alvenaria de blocos cerâmicos apresentam-se como alternativa, principalmente pela possibilidade de utilização de mão de obra e materiais locais, possibilitando a difusão deste sistema em todo o País. A utilização de blocos cerâmicos proporcionará, pelo maior peso próprio da estrutura, um melhor comportamento estrutural frente às ações do vento, além de melhor comportamento térmico no armazenamento dos grãos e menor consumo energético em comparação com o aço e o concreto. Como não se encontra um procedimento racional de dimensionamento deste tipo de estruturas, este trabalho analisou como a variação da relação de forma (h/d_c) influencia no comportamento estrutural de silos em alvenaria de blocos cerâmicos.

Palavras-chave: silos; relação de forma; alvenaria; blocos cerâmicos; sobrepressão; elementos finitos; análise estrutural; dimensionamento

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: cenário agrícola brasileiro.....	10
Figura 2: diagrama das etapas de pesquisa	14
Figura 3: classificação dos silos de acordo com sua esbeltez	17
Figura 4: tipos de fluxo em silos	19
Figura 5: geometria do fluxo em silos	19
Figura 6: tipos de fundo em silos	20
Figura 7: seções transversais previstas pelo EN 1991-4:2006	24
Figura 8: pressões simétricas atuantes na parede de um silo	25
Figura 9: pressão local em silos de paredes espessas ($d_c/t < 200$) com $h/d_c > 1,0$	25
Figura 10: posição de incidência do vento	36
Figura 11: flexo-compressão em seção retangular	45
Figura 12: pressão horizontal no silo esbelto ao longo da altura h	51
Figura 13: atrito lateral no silo esbelto ao longo da altura h	51
Figura 14: pressão horizontal no silo intermediário ao longo da altura h	52
Figura 15: atrito lateral no silo intermediário ao longo da altura h	53
Figura 16: pressão horizontal no silo baixo ao longo da altura h	54
Figura 17: atrito lateral no silo baixo de ao longo da altura h	54
Figura 18: distribuição das pressões externas devido às ações do vento	55
Figura 19: distribuição das pressões de arrasto devido às ações do vento	55
Figura 20: modelo em elementos finitos do silo baixo	59
Figura 21: elemento de casca curva adotado	60
Figura 22: solicitações resultantes no eixo local do elemento	60
Figura 23: solicitações resultantes do elemento	61
Figura 24: deformada resultante da combinação 1 no silo esbelto	62
Figura 25: deformada resultante da combinação 1 no silo intermediário	64
Figura 26: deformada resultante da combinação 1 no silo baixo	65
Figura 27: esforço lateral (N_{xx})	67
Figura 28: esforço vertical (N_{yy})	68
Figura 29: momento horizontal (M_{xx})	69
Figura 30: momento vertical (M_{yy})	69
Figura 31: combinação 1 + vento (M_{xx})	71
Figura 32: combinação 1 + vento (M_{yy})	72
Figura 33: combinação 1 + vento (N_{xx})	72

Figura 34: distribuição das cintas nos silos	74
Figura 35: trecho de parede adotado no dimensionamento	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: distribuição das pressões externas em edificações cilíndricas de seção circular	36
Quadro 2: coeficientes de arrasto (C_a) para cilindros de seção circular	37
Quadro 3: coeficientes de ponderação das resistências	39
Quadro 4: valores característicos da resistência à tração na flexão	40
Quadro 5: valores característicos da resistência ao cisalhamento	40
Quadro 6: valores máximos do índice de esbeltez	42
Quadro 7: características do material armazenado	47
Quadro 8: dimensões dos silos estudados	48
Quadro 9: pressões devidas ao material armazenado no silo esbelto	50
Quadro 10: pressões devidas ao material armazenado no silo intermediário	52
Quadro 11: pressões devidas ao material armazenado no silo baixo	53
Quadro 12: pressões devidas ao vento no silo esbelto	56
Quadro 13: pressões devidas ao vento no silo intermediário	56
Quadro 14: pressões devidas ao vento no silo baixo	57
Quadro 15: solicitações resultantes da combinação 1 no silo esbelto	63
Quadro 16: solicitações resultantes da combinação 1 no silo intermediário	64
Quadro 17: solicitações resultantes da combinação 1 no silo baixo	66
Quadro 18: solicitações resultantes da combinação 2 no silo esbelto	70
Quadro 19: dimensionamento das cintas para o silo esbelto	75
Quadro 20: dimensionamento das cintas para o silo intermediário	75
Quadro 21: dimensionamento das cintas para o silo baixo	75
Quadro 22: solicitações utilizadas para o dimensionamento	78
Quadro 23: quadro resumo do dimensionamento	78

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 MÉTODO DE PESQUISA	12
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	12
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	12
2.2.1 Objetivo principal	12
2.2.2 Objetivos secundários	12
2.3 PRESSUPOSTO	13
2.4 DELIMITAÇÃO	13
2.5 LIMITAÇÕES	13
2.6 DELINEAMENTO	14
3 SILOS	16
3.1 DEFINIÇÃO	16
3.2 CLASSIFICAÇÃO	16
3.2.1 Geometria	17
3.2.2 Tipo e geometria de fluxo	18
3.2.3 Tipo de fundo	20
4 CARREGAMENTOS ATUANTES	21
4.1 CARGAS PERMANENTES	21
4.2 PRESSÕES DEVIDAS AO MATERIAL ARMAZENADO	22
4.2.1 Considerações iniciais	22
4.2.2 Condições para o correto uso da EN 1991-4:2006	23
4.2.2.1 Limitações	23
4.2.2.2 Aspectos considerados	24
4.2.3 Determinação das pressões através da EN 1991-4:2006	25
4.2.3.1 Silos esbeltos	26
4.2.3.1.1 Pressões durante o enchimento	26
4.2.3.1.2 Pressões durante o esvaziamento	29
4.2.3.2 Silos intermediários e baixos	31
4.2.3.2.1 Pressões durante o enchimento	31
4.2.3.2.2 Pressões durante o esvaziamento	33
4.3 AÇÕES DEVIDAS AO VENTO	35
5 TEORIA DE DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS EM ALVENARIA ...	38
5.1 RESISTÊNCIAS DE CÁLCULO	38

5.1.1 Resistência à compressão simples	39
5.1.2 Resistência à tração na flexão	39
5.1.3 Resistência ao cisalhamento	40
5.2 DISPOSIÇÕES ESPECÍFICAS PARA PAREDES EM ALVENARIA	41
5.2.1 Altura efetiva	41
5.2.2 Espessura efetiva	41
5.2.3 Esbeltez	41
5.3 DIMENSIONAMENTO	42
5.3.1 Dimensionamento da alvenaria à compressão simples	42
5.3.2 Dimensionamento da alvenaria ao cisalhamento	43
5.3.3 Dimensionamento da alvenaria à flexo-compressão	44
6 MODELO ESTRUTURAL	47
6.1 MATERIAL A SER ARMAZENADO	47
6.2 DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DOS SILOS ESTUDADOS	48
6.3 DETERMINAÇÃO DAS CARGAS ATUANTES	49
6.3.1 Cargas permanentes	49
6.3.2 Pressões devidas ao material armazenado	49
6.3.2.1 Silo esbelto	49
6.3.2.2 Silo intermediário	51
6.3.2.3 Silo baixo	53
6.3.3 Pressões devidas ao vento	54
6.4 COMBINAÇÃO DE CARGAS	57
7 ANÁLISE ESTRUTURAL	59
7.1 MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS	59
7.1.1 Elemento adotado	60
7.1.2 Considerações acerca do modelo	61
7.2 COMBINAÇÃO 1: 0,9 PP + 1,4 Grãos	62
7.2.1 Silo esbelto	62
7.2.2 Silo intermediário	63
7.2.3 Silo baixo	65
7.2.4 Comparação entre as relações de forma	66
7.3 COMBINAÇÃO 2: 0,9 PP + 1,4 Vento	70
8 DIMENSIONAMENTO DAS PAREDES	73
8.1 DIMENSIONAMENTO DOS TRAVAMENTOS HORIZONTAIS	73
8.2 DIMENSIONAMENTO DAS PAREDES	76

8.2.1 Esquema da seção a ser dimensionada	76
8.2.2 Determinação das seções críticas	76
8.2.3 Dimensionamento das seções	77
9 CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS	80
APÊNDICE A	81

1 INTRODUÇÃO

O aumento da produtividade e da área plantada no Brasil (figura 1a) resultou em um aumento considerável da safra brasileira de grãos nos últimos anos. Na safra de 2008/09, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (BRASIL, 2010), a produção brasileira atingiu a marca de 135 milhões de toneladas, realçando a condição de potência agrícola do País. Para uma melhor gestão desta cadeia produtiva, recomenda-se uma capacidade de armazenamento de, no mínimo, 120% da produção anual. No caso do Brasil, existe um déficit, mostrado na figura 1b, que demonstra a necessidade de ampliação da capacidade de armazenamento de grãos na cadeia produtiva brasileira.

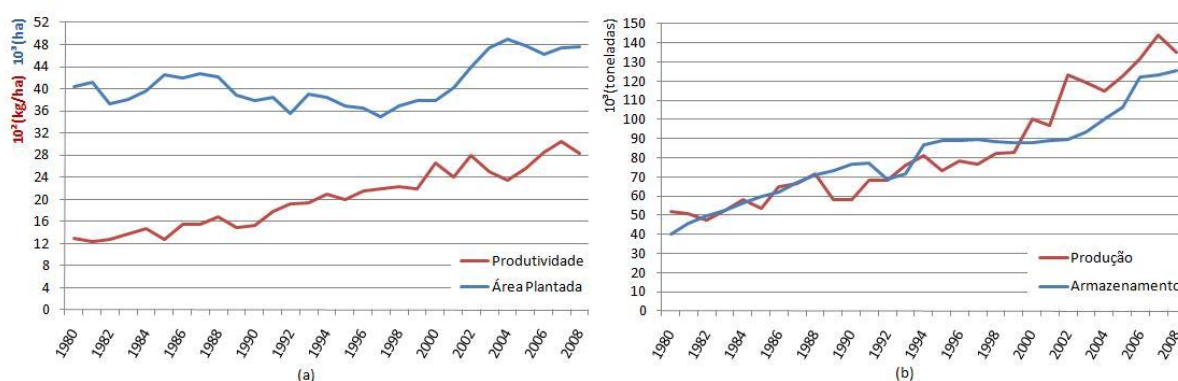


Figura 1: cenário agrícola brasileiro

Aliado a este aumento da produção, a deficiência da malha rodoviária e ferroviária torna atrativo o armazenamento local da produção agrícola. Atualmente, a solução mais utilizada nestes casos é a construção de silos metálicos, porém os altos custos e a necessidade de mão de obra especializada tornam, muitas vezes, sua execução inviável quando se consideram pequenas e médias propriedades.

Neste contexto, os silos em alvenaria de blocos cerâmicos apresentam-se como alternativa potencialmente viável para a redução deste déficit. Apresentando maior peso próprio, silos construídos em alvenaria possuem melhor comportamento estrutural quando submetidos às ações de vento que são uma das principais causas de colapso em silos metálicos. Além de que

a menor condutividade térmica resulta em menores temperaturas no interior do silo, conseqüentemente em uma melhor manutenção do grão armazenado.

A possibilidade de construção com material e mão de obra local possibilita ampla difusão no País por tornar o sistema atrativo para pequenas e médias propriedades. Além disto, o consumo energético para a produção de blocos cerâmicos é consideravelmente menor quando comparado ao do concreto e ao do aço, conforme Sarrablo¹ (2002 apud FONTES, 2005, p. 26), a energia utilizada para a produção destes materiais se relaciona numa proporção de 1:2,5:15. Num período em que são discutidos métodos construtivos mais sustentáveis, este menor consumo energético é outro importante fator para a utilização de blocos cerâmicos neste estudo.

Entretanto, apesar de todas as possibilidades que a execução de silos em alvenaria de blocos cerâmicos apresenta, não se encontra disponível um procedimento racional de dimensionamento deste tipo de estrutura. Resultado disto é o registro de silos em alvenaria superdimensionados no interior do estado do Rio Grande do Sul, sendo esta constatação fator motivador para realização deste trabalho. Logo, este estudo tem por finalidade apresentar a análise de alguns parâmetros fundamentais no dimensionamento de um silo.

Este trabalho está organizado de forma que o método de pesquisa seja apresentado no capítulo 2, sendo seguido pelo capítulo 3 onde o tipo de estrutura estudado neste trabalho, silos para armazenamento de grãos, será discutido de forma sucinta. Os carregamentos que farão parte do modelo estrutural serão apresentados no capítulo 4, e a base teórica para o dimensionamento de elementos em alvenaria estrutural será apresentada no capítulo 5.

O modelo estrutural construído para validar este trabalho será discutido no capítulo 6, onde serão detalhadas as dimensões da estrutura, bem como as solicitações atuantes na mesma. O trabalho segue pela análise estrutural dos silos, apresentada no capítulo 7, sendo então dimensionados os elementos em alvenaria estrutural no capítulo 8. As considerações finais sobre este estudo sobre silos circulares em alvenaria de blocos cerâmicos serão apresentadas no decorrer do capítulo 9.

¹ SARRABLO, V. **Contribución a la viabilidad de cubiertas laminares de cerámica armada mediante soluciones semiprefabricadas**: propuesta para láminas cilíndricas de pequeña luz. 2002. 200 f. Tesis Doctoral – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

2 MÉTODO DE PESQUISA

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: na análise estrutural de um silo circular para armazenamento de grãos em alvenaria de blocos cerâmicos, qual relação h/d_c apresenta melhor comportamento estrutural?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a determinação da relação h/d_c que apresenta melhor comportamento estrutural para construção de um silo circular em alvenaria de blocos cerâmicos.

2.2.2 Objetivos secundários

São objetivos secundários deste trabalho, a apresentação:

- a) de um modelo estrutural adequado para a análise estrutural de um silo circular em alvenaria de blocos cerâmicos;
- b) dos resultados da análise estrutural e dimensionamento dos silos de cada relação h/d_c estudada no trabalho.

2.3 PRESSUPOSTO

É pressuposto do trabalho que todos os métodos de cálculo e informações apresentados no EN 1991-4/2006: Eurocode 1 – Actions on Structures – Part 4: Silos and Tanks, na NBR 6123/1988: Forças Devido ao Vento em Edificações e na NBR 15812-1/2010: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos – Parte 1: Projetos são válidos para o presente trabalho.

2.4 DELIMITAÇÃO

Este trabalho será delimitado à análise estrutural e dimensionamento de um silo circular em alvenaria de blocos cerâmicos de capacidade de armazenamento pré-determinada, variando sua relação h/d_c .

2.5 LIMITAÇÕES

As limitações deste trabalho são:

- a) utilização de um único software de análise estrutural via método dos elementos finitos: TNO-Diana Versão 9.4;
- b) o estudo em questão será válido apenas para silos que armazenam materiais particulados não-coesivos;
- c) serão analisados três valores para a relação h/d_c de forma a se obter os seguintes tipos de estrutura,
 - silo esbelto ou alto;
 - silo intermediário;
 - silo baixo;
- d) as lajes de fundo serão consideradas planas e muito rígidas;
- e) a cobertura da estrutura não será discutida neste trabalho sendo apenas considerada como carga permanente na análise estrutural;
- f) não será considerada nenhuma excentricidade, tanto para enchimento como para esvaziamento da estrutura.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi desenvolvido através das seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) seleção das dimensões da estrutura e das relações de forma a serem adotadas;
- c) definição do modelo estrutural;
- d) análise estrutural;
- e) dimensionamento das estruturas;
- f) conclusões.

Na figura 2 apresenta-se a sequência de etapas de como este trabalho será desenvolvido.

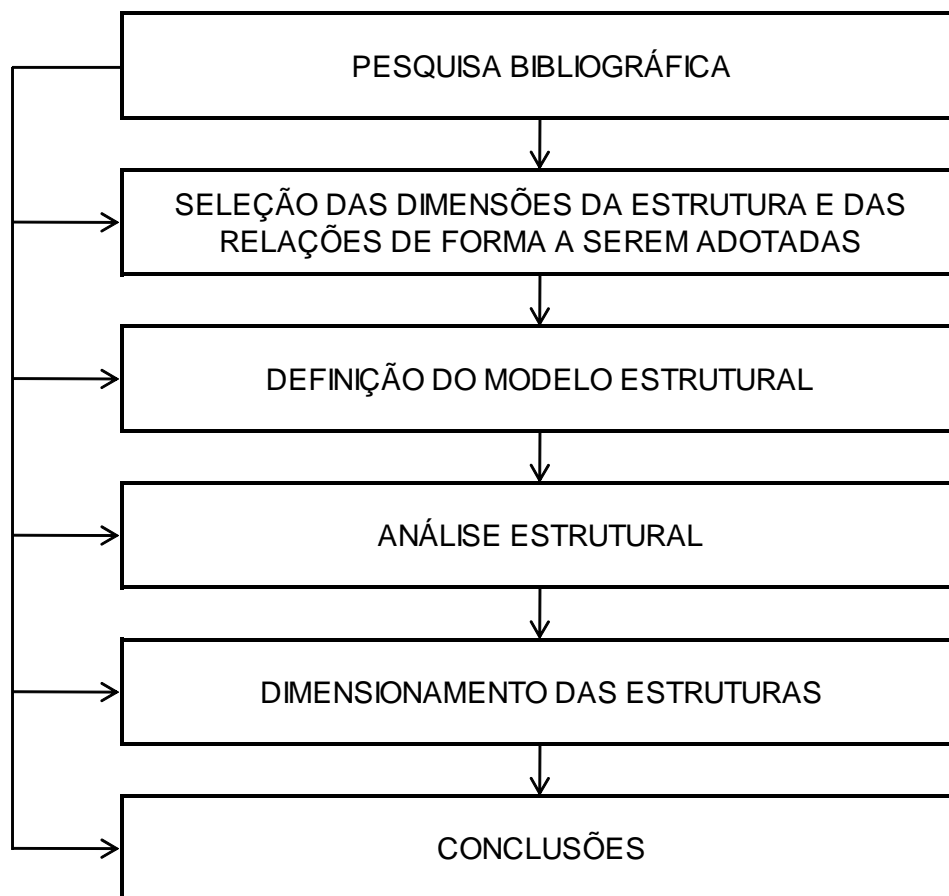


Figura 2: diagrama das etapas de pesquisa

A pesquisa bibliográfica foi direcionada principalmente ao estudo das normas que foram utilizadas para determinação do modelo estrutural, bem como a livros e publicações relacionadas a silos e alvenaria de blocos cerâmicos.

A partir de uma capacidade de armazenamento adotada, foram determinadas as dimensões das estruturas a serem estudadas e as relações de forma (h/d_c) que serviram de parâmetro para a análise da variação do comportamento estrutural do silo. Juntamente com as solicitações previstas para o caso de uma estrutura de armazenamento de grãos, previstos nas normas estudadas, foi desenvolvido o modelo estrutural utilizado neste trabalho.

A análise estrutural foi realizada através de um *software* de cálculo estrutural, baseado no método dos elementos finitos e, a partir das solicitações resultantes dos modelos estudados, foi realizado o dimensionamento das estruturas em alvenaria de blocos cerâmicos. Com base nos resultados coletados nas etapas anteriores, os dados foram analisados e discutidos para definição das conclusões do trabalho.

3 SILOS

Neste capítulo serão tratados aspectos gerais relacionados aos silos. Inicia-se pela definição deste tipo de estruturas, para posterior classificação segundo aspectos definidos por normas estrangeiras.

3.1 DEFINIÇÃO

Segundo o EN 1991-4 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 14), silos são estruturas utilizadas para o armazenamento de sólidos particulados, isto é, sólidos que se comportam como partículas discretas e independentes. Safarian e Harris (1985, p. 4), afirmam que esta definição é compartilhada pelo ACI 313² que, de forma simplificada, considera todas as estruturas de armazenamento verticais como silos.

3.2 CLASSIFICAÇÃO

No Brasil, ainda não se possui uma norma específica que regule o dimensionamento e construção de silos. Desta forma, para se classificar este tipo de estrutura, deve-se recorrer a normas estrangeiras acerca deste tema. Conforme estas normas estrangeiras os silos podem ser classificados de acordo com as seguintes características (FREITAS, 2001, p. 8):

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

Estas características serão detalhadas nos próximos itens.

² AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 313**: Recommended Practice for Design of Concrete Bins, Silos and Bunkers for Storing Granular Materials (ACI 313-77) and Commentary. Detroit, 1983.

3.2.1 Geometria

Quanto à sua geometria, os silos são classificados de acordo com a relação entre a altura efetiva do produto armazenado (h) e o maior diâmetro inscrito de sua seção transversal (d_c). Porém, segundo Freitas (2001, p. 9), não há um consenso entre as normas estrangeiras em relação a essa classificação e, conforme Safarian e Harris (1985, p. 4), o mesmo se verifica entre os pesquisadores relacionados a esse tipo de estrutura.

Neste trabalho será adotada a classificação geométrica apresentada pelo EN 1991-4 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006) que, a partir das considerações demonstradas na figura 3, dispõe os silos em quatro diferentes tipos de acordo com suas esbeltezas.

- a) *retaining silo* – quando $h/d_c \leq 0,4$ se o silo possuir fundo plano (figura 3a);
- b) silos baixos – quando $0,4 < h/d_c \leq 1,0$ e quando $h/d_c \leq 0,4$ se o silo possuir fundo inclinado (figura 3b);
- c) silos intermediários – quando $1,0 < h/d_c < 2,0$ (figura 3c);
- d) silos esbeltos – quando $h/d_c \geq 2,0$ (figura 3d).

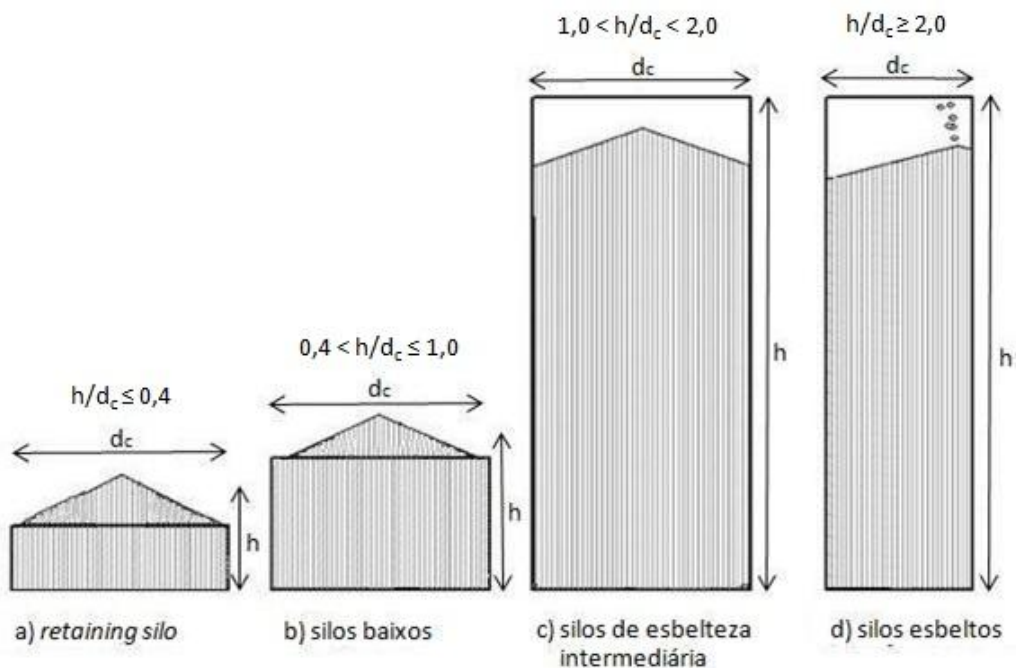


Figura 3: classificação dos silos de acordo com sua esbelteza
(adaptado de EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 30)

3.2.2 Tipo e geometria do fluxo

Sabe-se que o tipo de fluxo desenvolvido pelas partículas de um sólido está intimamente relacionado com as características geométricas do silo e, segundo Calil Júnior et al.³ (1997 apud FREITAS, 2001, p. 11), pode caracterizar o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de estagnação de movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente. Isto influencia também na distribuição das pressões nas paredes do silo e na fundação, na integridade e no custo da construção.

De acordo com Nascimento (2008, p. 28), para a determinação do tipo de fluxo que se dará na estrutura, é importante que sejam considerados os seguintes fatores influentes na formação do fluxo: geometria, tipo de fundo (tremonha ou fundo plano) e propriedades físicas do produto a ser armazenado (tamanho dos grãos, peso específico, coesão, ângulo de atrito interno, coeficiente de atrito com as paredes, teor de umidade, temperatura e tempo de consolidação).

A partir da variabilidade dos fatores acima citados, existe a possibilidade de formação, como representado na figura 4, de dois tipos principais de fluxo (NASCIMENTO, 2008, p. 45):

- a) **de massa**: aquele em que o produto entra substancialmente em movimento em todas as partes do silo, no momento do processo de esvaziamento (figura 4a);
- b) **de funil**: aquele em que apenas parte do produto entra em movimento através de um canal vertical formado no interior do silo, alinhado com a boca de descarga, cercado por uma zona na qual o produto permanece estático (figura 4b).

³ CALIL JR., C.; NASCIMENTO, J. W. B.; ARAÚJO, E. C. **Silos metálicos multicelulares**. São Carlos, Serviço gráfico da EESC/USP, 1997.

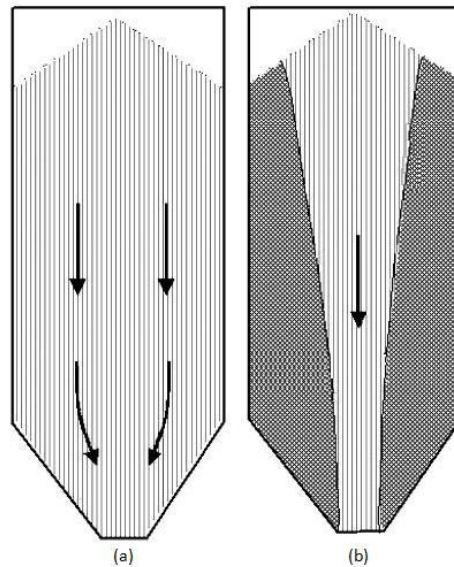


Figura 4: tipos de fluxo em silos
(adaptado de EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 27)

Quanto à geometria do fluxo do material armazenado, este pode assumir diferentes configurações, podendo apresentar, conforme mostrado na figura 5, trajeto de eixo (STANDARDS AUSTRALIA⁴, 1996 apud NASCIMENTO, 2008, p. 48):

- a) **axissimétrico**: o centro de gravidade do produto em movimento coincide, aproximadamente, com o eixo vertical do silo (figura 5a);
- b) **planar**: é um fluxo uniforme onde o canal do fluxo é simétrico em relação ao plano que passa pelo eixo longitudinal da abertura de saída (figura 5b);
- c) **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).

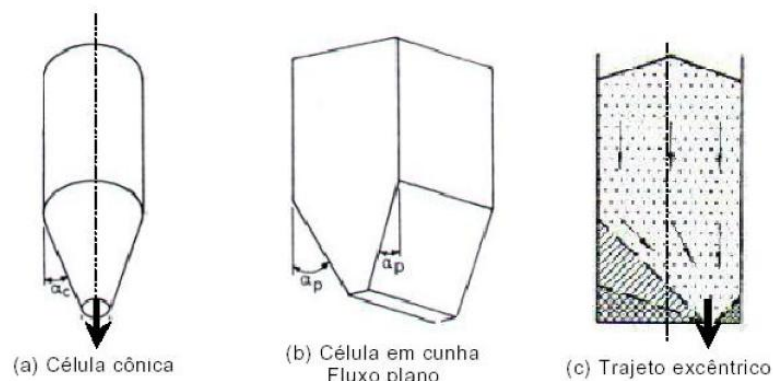


Figura 5: geometria do fluxo em silos (NASCIMENTO, 2008, p. 48)

⁴ STANDARDS AUSTRALIA. **AS 3774**: Loads on bulk solids containers. Sydney, 1997.

3.2.3 Tipo de fundo

Quanto ao tipo de fundo, conforme o EN 1991-4 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 12-13), os silos podem ser construídos de acordo com os tipos apresentados na figura 6:

- a) **fundo plano**: silo de fundo horizontal ou com paredes inclinadas de um ângulo $\alpha \leq 5^\circ$ com a horizontal (figura 6a);
- b) **fundo inclinado**: fundo em forma de funil, cujas formas mais comuns são a tronco-piramidal e a tronco-cônica (figura 6b).

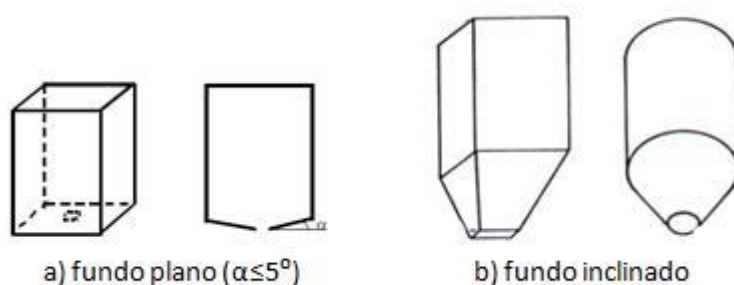


Figura 6: tipos de fundo em silos (adaptado de FREITAS, 2001, p. 12-13)

4 CARREGAMENTOS ATUANTES

Os principais carregamentos atuantes no projeto de silos são devidos aos materiais armazenados. Porém, devem ser considerados outros carregamentos, não menos importantes, como as cargas permanentes e as pressões devidas às ações do vento (SAFARIAN; HARRIS, 1985, p. 65). Neste capítulo serão discutidos aspectos relevantes a esses carregamentos para a correta análise e dimensionamento de um silo.

4.1 CARGAS PERMANENTES

As cargas permanentes são carregamentos que atuarão sobre a estrutura durante toda a sua vida útil, devendo ser consideradas em todas as combinações previstas no dimensionamento. No caso de um silo em blocos cerâmicos de alvenaria, deverão ser incluídos nas cargas permanentes (SAFARIAN; HARRIS, 1985, p. 65):

- a) peso específico da alvenaria;
- b) peso específico do revestimento, quando houver;
- c) peso específico da cobertura.

O peso das paredes em alvenaria, por unidade de comprimento, pode ser determinado através da expressão 1:

$$p_a = \gamma_a \times e_a \times h \quad (\text{expressão 1})$$

Onde:

p_a é o peso da alvenaria, por unidade de comprimento;

γ_a é o peso específico da alvenaria;

e_a é a espessura da parede;

h é a altura da parede.

O peso específico da cobertura não será calculado neste trabalho, sendo assim, será adotado valor representativo deste elemento durante a modelagem da estrutura.

4.2 PRESSÕES DEVIDAS AOS MATERIAIS ARMAZENADOS

Nos próximos itens serão apresentados os passos para obtenção das pressões devidas ao material armazenado, bem como aspectos que deverão ser considerados para a correta aplicação da EN 1991-4:2006, norma que servirá de base teórica para a determinação destas pressões.

4.2.1 Considerações iniciais

Segundo Scalabrin (2008, p. 47), as pressões devidas ao armazenamento de grãos comportam-se de forma diferente das formadas pelos líquidos (carregamento hidrostático com distribuição linear com a profundidade). Enquanto nos líquidos encontra-se apenas pressão horizontal normal à parede, no armazenamento de grãos surge outra pressão devida ao atrito do material com a parede da estrutura. De acordo com Safarian e Harris (1985, p. 10), os primeiros projetistas de silos, desconhecendo a existência deste atrito, acabavam por projetar estruturas conservadoras que acarretavam em gastos desnecessários.

Sabendo da existência de diversas normas internacionais que tratam de silos e das solicitações impostas a este tipo de estrutura, faz-se necessário a escolha de uma para servir de base ao trabalho. A Norma utilizada neste trabalho foi escolhida a partir de Scalabrin (2008, p. 72), onde este compara os valores de pressão obtidos entre duas normas bastante utilizadas no Brasil para dimensionamento de silos – UNE-ENV 1991-4:1998⁵ e ANSI/ASAE

⁵ ASSOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE-ENV 1991-4**: Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones em estructuras - Parte 4: Acciones em silos y depósitos. Madrid, 1998.

EP433:2000⁶ – e a primeira apresenta valores mais realistas. Desta maneira, foi adotado o EN 1991-4:2006 para a determinação dos carregamentos devidos ao material armazenado nos silos neste trabalho.

4.2.2 Condições para o correto uso da EN 1991-4:2006

O EN 1991 fornece princípios e ações gerais para o projeto estrutural de edificações e trabalhos de Engenharia Civil incluindo alguns aspectos geotécnicos. Sua parte 4 – Ações em Silos e Tanques – trata do projeto estrutural de silos para armazenamento de sólidos particulados e tanques para armazenamento de fluidos (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, p. 8). A seguir serão apresentadas considerações acerca de como se utilizar esta Norma a fim de que os resultados obtidos através dela sejam válidos.

4.2.2.1 Limitações

Para a correta utilização de todos os princípios previstos nesta Norma, há uma série de limitações que devem ser respeitadas pelos usuários (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, p. 8-9):

- a) a seção transversal do silo tem a forma limitada às mostradas na figura 7;
- b) a relação entre a altura e o diâmetro deve ser menor do que 10 ($h/d_c < 10$);
- c) a altura do silo deve ser menor que 100m ($h < 100m$);
- d) o diâmetro deve ser menor que 50m ($d_c < 50m$);
- e) o diâmetro máximo da partícula do sólido armazenado não é superior a $0,03d_c$;
- f) o material armazenado se comporta em regime de fluxo livre;
- g) o enchimento gera efeitos de inércia e cargas de impacto desprezíveis.

⁶ AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ANSI/ASAE EP 433**: Loads exerted by free-flowing grain on bins. St. Joseph, USA, 2000.

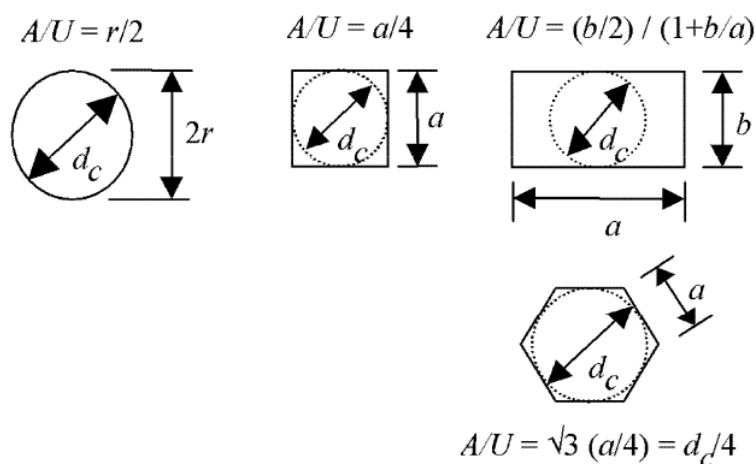


Figura 7: seções transversais previstas pelo EN 1991-4:2006 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 9)

4.2.2.2 Aspectos considerados

Baseando-se na mesma Norma, a determinação das situações de projeto dos materiais armazenados em silos deve considerar os seguintes aspectos (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, p. 25-27):

- a) os carregamentos em silos devidos aos materiais armazenados devem ser calculados quando o silo está com sua capacidade máxima;
- b) propriedades dos materiais,
 - peso específico (γ);
 - coeficiente de atrito do material com a parede (μ);
 - coeficiente de atrito interno do material (φ_i);
 - relação entre pressão horizontal e vertical (K);
- c) variação nas condições de atrito com a superfície;
- d) especificações de enchimento e esvaziamento da estrutura;
- e) geometria do silo;
- f) padrão de fluxo do material armazenado.

4.2.3 Determinação das pressões através da EN 1991-4:2006

Nesta seção serão apresentadas as equações propostas pela EN 1991-4:2006 para a determinação das pressões devidas aos materiais armazenados em silos esbeltos, intermediários e baixos. As figuras 8 e 9 mostram de que forma atuam estas pressões nas paredes de um silo.

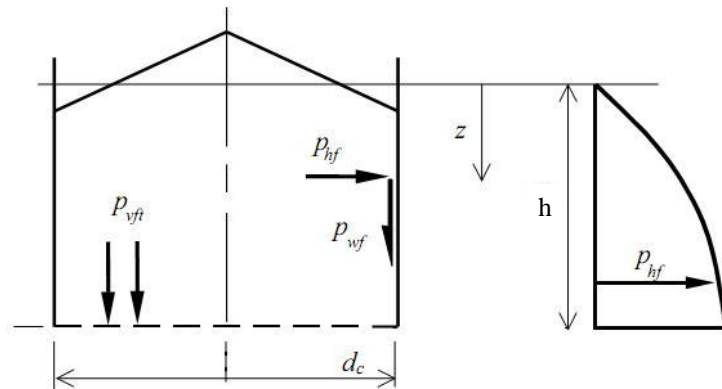


Figura 8: pressões simétricas atuantes nas paredes de um silo
(adaptado de EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 41)

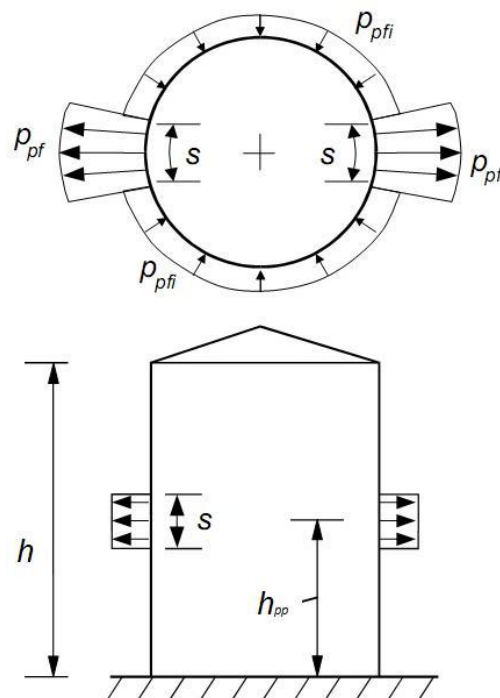


Figura 9: pressão local em silos de paredes espessas ($d_c/t < 200$) com $h/d_c > 1,0$
(adaptado de EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 42)

4.2.3.1 Silos esbeltos

As expressões previstas na Norma para a determinação das pressões devidas ao material armazenado durante o enchimento e esvaziamento de silos esbeltos serão apresentadas nos itens abaixo.

4.2.3.1.1 Pressões durante o enchimento

Em um silo esbelto, a pressão horizontal (p_{hf}), o atrito entre os grãos e a parede da estrutura (p_{wf}) e a pressão vertical (p_{vf}), a uma dada profundidade z , após o enchimento e durante o armazenamento, são determinadas através das expressões 2 a 4, respectivamente (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 41):

$$p_{hf}(z) = p_{ho} \cdot Y_J(z) \quad (\text{expressão 2})$$

$$p_{wf}(z) = \mu \cdot p_{ho} \cdot Y_J(z) \quad (\text{expressão 3})$$

$$p_{vf}(z) = \frac{p_{ho}}{K} \cdot Y_J(z) \quad (\text{expressão 4})$$

Sendo:

$$z_o = \left(\frac{1}{K \cdot \mu} \right) \cdot \frac{A}{U} \quad (\text{expressão 5})$$

$$p_{ho} = \gamma \cdot K \cdot z_o \quad (\text{expressão 6})$$

$$Y_J(z) = 1 - e^{-z/z_o} \quad (\text{expressão 7})$$

Onde:

γ é o peso específico do material armazenado;

μ é o coeficiente de atrito entre o material armazenado e a parede vertical do silo;

K é a razão entre a pressão horizontal e a pressão vertical;

z é a profundidade abaixo da superfície equivalente;

A é a área da seção transversal do silo;

U é o perímetro interno da seção transversal do silo.

O valor característico resultante da força vertical sobre a parede por unidade de comprimento do perímetro da parede (n_{zSKf}), a uma dada profundidade z , é determinado pela expressão 8 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 42):

$$n_{zSKf}(z) = \int_0^z p_{wf}(z) dz = \mu \cdot p_{ho} [z - z_o \cdot Y_J(z)] \quad (\text{expressão 8})$$

Devido a possíveis assimetrias acidentais durante o enchimento, associadas a excentricidades e imperfeições deste processo, deverá ser considerada uma pressão local atuando conforme apresentado na figura 9, onde a altura de atuação (h_{pp}) será onde as solicitações horizontais resultantes forem máximas. A magnitude da componente que atua para fora da estrutura (p_{pf}) pode ser determinada pela expressão 9, enquanto que a componente que atua para dentro do silo (p_{pfi}) é determinada pela expressão 10 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 43):

$$p_{pf}(z) = C_{pf} \cdot p_{hf}(z) \quad (\text{expressão 9})$$

$$p_{pfi}(z) = p_{pf}(z) / 7 \quad (\text{expressão 10})$$

Sendo:

$$C_{pf} = \max\{0, 21 \cdot C_{op} [1 + 2E^2] (1 - e^{-1,5[(h/d_c)-1]})\}; 0\} \quad (\text{expressão 11})$$

$$E = 2 \cdot e_f / d_c \quad (\text{expressão 12})$$

Onde:

e_f é a excentricidade máxima durante o enchimento;

p_{hf} é o valor local da pressão de enchimento na altura em que a pressão local é aplicada;

C_{op} é o fator de referência do sólido para a pressão local.

A dimensão da zona de atuação da pressão local (s) é determinada pela expressão abaixo e a altura h_{pp} é determinada de forma a causar a situação mais crítica durante o carregamento:

$$s = \pi \cdot d_c / 16 \cong 0,2 \cdot d_c \quad (\text{expressão 13})$$

4.2.3.1.2 Pressões durante o esvaziamento

As pressões durante o esvaziamento são obtidas através da majoração das pressões de enchimento por um coeficiente que represente os possíveis incrementos das pressões durante o esvaziamento da estrutura. Para silos esbeltos, as pressões simétricas de esvaziamento (p_{he} e p_{we}) devem ser determinadas pelas expressões 14 e 15, respectivamente (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 45):

$$p_{he} = C_h \cdot p_{hf} \quad (\text{expressão 14})$$

$$p_{we} = C_w \cdot p_{wf} \quad (\text{expressão 15})$$

Onde:

$C_h = 1,15$ é o fator de descarga para pressões horizontais;

$C_w = 1,10$ é o fator de descarga para o atrito nas paredes laterais.

Desta forma, o valor característico resultante da força vertical sobre a parede por unidade de comprimento do perímetro da parede (n_{zSKe}), a uma dada profundidade z , deve ser determinado pela expressão 16 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 46):

$$n_{zSKe}(z) = \int_0^z p_{we}(z) dz = C_w \mu \cdot p_{ho} [z - z_o \cdot Y_J(z)] \quad (\text{expressão 16})$$

A pressão local atuante na estrutura mantém o mesmo comportamento, apenas alterando sua intensidade. Durante o esvaziamento, a magnitude da componente que atua para fora da estrutura (p_{pe}) é determinada pela expressão 17, enquanto que a componente que atua para

dentro do silo (p_{pei}) é determinada pela expressão 18 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 47):

$$p_{pe}(z) = C_{pe} \cdot p_{he}(z) \quad (\text{expressão 17})$$

$$p_{pei}(z) = p_{pe}(z) / 7 \quad (\text{expressão 18})$$

Sendo:

$$\text{Para } h/d_c > 1,2 \rightarrow C_{pe} = 0,42 \cdot C_{op} \cdot [1 + 2 \cdot E^2] (1 - e^{\{-1,5[(h/d_c)-1]\}}) \quad (\text{expressão 19})$$

$$\text{Para } h/d_c \leq 1,2 \rightarrow C_{pe} = \max\{0,272 \cdot C_{op} \cdot [(h/d_c - 1) + E], 0\} \quad (\text{expressão 20})$$

$$E = 2 \cdot e / d_c \quad (\text{expressão 21})$$

$$e = \max(e_f, e_o) \quad (\text{expressão 22})$$

Onde:

e_f é a excentricidade máxima durante o enchimento;

e_o é a excentricidade do centro da abertura de esvaziamento;

p_{he} é o valor local da pressão de enchimento na altura em que a pressão local é aplicada;

C_{op} é o fator de referência do sólido para a pressão local.

4.2.3.2 Silos intermediários e silos baixos

Nos próximos itens serão apresentadas as expressões previstas na Norma para a determinação das pressões devidas ao material armazenado durante o enchimento e esvaziamento de silos intermediários e silos baixos.

4.2.3.2.1 Pressões durante o enchimento

Em um silo intermediário e em silos baixos, a pressão horizontal (p_{hf}), o atrito entre os grãos e a parede da estrutura (p_{wf}) e a pressão vertical (p_{vf}), a uma dada profundidade z , após o enchimento e durante o armazenamento, são determinadas através das seguintes expressões (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 56-57):

$$p_{hf} = p_{ho} \cdot Y_R \quad (\text{expressão 23})$$

$$p_{wf} = \mu \cdot p_{hf} \quad (\text{expressão 24})$$

$$p_{vf} = \gamma \cdot z_v \quad (\text{expressão 25})$$

Sendo:

$$p_{ho} = \gamma \cdot K \cdot z_o = \gamma \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{A}{U} \quad (\text{expressão 26})$$

$$Y_R = \left(1 - \left\{ \left(\frac{z - h_o}{z_o - h_o} \right) + 1 \right\}^n \right) \quad (\text{expressão 27})$$

$$z_o = \frac{1}{K \cdot \mu} \cdot \frac{A}{U} \quad (\text{expressão 28})$$

$$n = -(1 + \tan \varphi_r) (1 - h_o / z_o) \quad (\text{expressão 29})$$

$$h_o = \frac{r}{3} \cdot \tan \varphi_r \quad (\text{expressão 30})$$

$$z_v(z) = h_o - \frac{1}{(n+1)} \left(z_o - h_o - \frac{(z + z_o - 2h_o)^{n+1}}{(z_o - h_o)^n} \right) \quad (\text{expressão 31})$$

Onde:

γ é o peso específico do material armazenado;

μ é o coeficiente de atrito entre o material armazenado e a parede vertical do silo;

K é a razão entre a pressão horizontal e a pressão vertical;

z é a profundidade abaixo da superfície equivalente;

A é a área da seção transversal do silo;

U é o perímetro interno da seção transversal do silo;

h_o é o valor de z no mais alto ponto de contato material-parede;

φ_r é o ângulo de repouso do material armazenado.

O valor característico resultante da força vertical sobre a parede por unidade de comprimento do perímetro da parede (n_{zSKf}), a uma dada profundidade z , é determinado pela seguinte expressão (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 57):

$$n_{zSKf}(z) = \int_0^z p_{wf}(z) dz = \mu \cdot p_{ho} [z - z_V(z)] \quad (\text{expressão 32})$$

A pressão local em silos intermediários ou baixos (p_{pf} e p_{pfi}) deverá ser determinada da mesma forma que em silos esbeltos quando estes apresentarem $1,0 < \frac{h}{d_c} < 2,0$, caso contrário esta não precisará ser considerada na análise estrutural.

4.2.3.2.2 Pressões durante o esvaziamento

O cálculo de pressões durante o esvaziamento é recomendado apenas para o caso da estrutura apresentar $1,0 < \frac{h}{d_c} < 2,0$. Desta maneira, as expressões que determinam a majoração das pressões de enchimento da estrutura serão adotadas apenas para silos intermediários. Nestes casos, as pressões simétricas de esvaziamento (p_{he} e p_{we}) devem ser determinadas pelas expressões 33 e 34 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 58):

$$p_{he} = C_h \cdot p_{hf} \quad (\text{expressão 33})$$

$$p_{we} = C_w \cdot p_{wf} \quad (\text{expressão 34})$$

Sendo:

$$C_h = 1,0 + 0,15 \cdot C_s \quad (\text{expressão 35})$$

$$C_w = 1,0 + 0,1.C_s \quad (\text{expressão 36})$$

$$C_s = h/d_c - 1,0 \quad (\text{expressão 37})$$

Onde:

C_h é o fator de descarga para pressões horizontais;

C_w é o fator de descarga para o atrito nas paredes laterais.

C_s é um fator de ajuste de acordo com a esbelteza da estrutura.

Desta forma, o valor característico resultante da força vertical sobre a parede por unidade de comprimento do perímetro da parede (n_{zSKe}), a uma dada profundidade z , deve ser determinado pela expressão 38 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 59):

$$n_{zSKe}(z) = \int_0^z p_{we}(z) dz = C_w \cdot \mu \cdot p_{ho} [z - z_V(z)] \quad (\text{expressão 38})$$

A pressão local em silos intermediários ou baixos (p_{pe} e p_{pei}), da mesma forma que durante o processo de enchimento do silo, deverá ser determinada da mesma forma que em silos esbeltos quando estes apresentarem $1,0 < \frac{h}{d_c} < 2,0$, caso contrário esta poderá ser desconsiderada dos cálculos.

4.3 AÇÕES DEVIDAS AO VENTO

As estruturas dos silos são calculadas principalmente para resistirem aos carregamentos das pressões dos materiais armazenados. A ação variável do vento deve ser considerada principalmente na análise de estabilidade local e global da estrutura quando esta se encontra vazia, já que quando carregada, possui elevada massa e dificilmente sofrerá danos pela ação do vento (ANDRADE JUNIOR, 2002, p. 141).

Para determinação destes carregamentos serão utilizadas as considerações previstas na NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988), norma que estabelece os fatores a serem levados em conta na determinação das pressões devidas às ações do vento. Inicialmente, deve-se determinar a velocidade característica do vento para posterior determinação da pressão dinâmica na estrutura segundo as expressões 39 e 40, respectivamente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 4):

$$V_k = V_o \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (\text{expressão 39})$$

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (\text{expressão 40})$$

Onde:

V_k é a velocidade característica do vento (m/s);

V_o é a velocidade básica do vento, determinada pela velocidade de uma rajada de 3 segundos, excedida uma vez em 50 anos, a 10m acima do terreno, em campo aberto e plano (m/s);

S_1 é o fator que considera as variações de relevo do terreno;

S_2 é o fator que considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação em análise;

S_3 é o fator que considera o grau de segurança e vida útil requeridos para a estrutura – para silos a norma considera este valor igual a 0,95;

q é a pressão dinâmica na estrutura (N/m²).

Após obtenção destes valores, deve-se determinar o perfil de pressões externas no contorno da estrutura, no caso um silo circular, tomando-se por base a posição de incidência do vento conforme a figura 10.

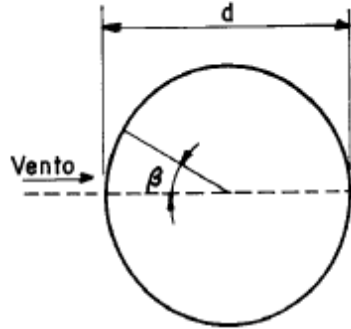


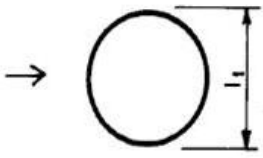
Figura 10: posição de incidência do vento
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 19)

Conforme a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 19), os coeficientes de pressão externos C_{pe} para edificações cilíndricas de seção circular são estes apresentados no quadro 1. Deve-se ressaltar que o uso deste quadro está condicionado às situações em que $Re > 420000$, sendo $Re = 70000V_k D$.

β	Coeficiente de pressão externa C_{pe}			
	Superfície rugosa ou com saliências		Superfície Lisa	
	$h/d=10$	$h/d \leq 2,5$	$h/d=10$	$h/d \leq 2,5$
0°	+1,0	+1,0	+1,0	+1,0
10°	+0,9	+0,9	+0,9	+0,9
20°	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7
30°	+0,4	+0,4	+0,35	+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

Quadro 1: distribuição das pressões externas em edificações cilíndricas de seção circular (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 19)

Para determinação da força de arrasto em uma estrutura, primeiramente deve-se obter o coeficiente de arrasto (C_a) que depende, dentre outras coisas, da forma da seção transversal desta. O quadro 2 apresenta os valores de coeficiente de arrasto para cilindros de seção circular previstos pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988).

Planta	Re x 10 ⁻⁵	h/l ₁							
		1/2	1	2	5	10	20	∞	
	liso (metal, concreto, alvenaria rebocada)	≤ 3,5	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
		≥ 4,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
	com rugosidade ou saliências = 0,02 l ₁	Todos valores	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,2
	com rugosidade ou saliências = 0,08 l ₁	Todos valores	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4

Quadro 2: Coeficientes de arrasto (C_a) para cilindros de seção circular (adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 22)

Obtidos todos estes parâmetros, pode-se, finalmente, determinar o valor da força de arrasto atuante sobre a estrutura através da expressão 41 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 19):

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e \quad (\text{expressão 41})$$

Onde:

F_a é a força de arrasto (N);

C_a é o coeficiente de arrasto;

q é a pressão dinâmica na estrutura (N/m²);

A_e é a área frontal efetiva (m²).

5 TEORIA DE DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS EM ALVENARIA

Para o dimensionamento de um silo em alvenaria estrutural, o elemento de alvenaria deve resistir a esforços de compressão axial – provenientes do peso próprio da estrutura e do atrito lateral dos grãos com a parede – associados a carregamentos laterais, provenientes do empuxo dos grãos contra as paredes e às pressões devidas a ação do vento. Neste capítulo será apresentada a base teórica de dimensionamento de elementos em alvenaria estrutural que foi adotada neste trabalho, baseada na NBR 15812-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010).

5.1 RESISTÊNCIAS DE CÁLCULO

Na verificação no Estado Limite Último, os critérios de segurança exigem que a condição abaixo seja respeitada.

$$R_d \geq S_d \quad (\text{condição 1})$$

Onde:

$R_d = R_k / \gamma_m$ é resistência de cálculo;

R_k é resistência característica;

γ_m é o coeficiente de ponderação da resistência;

$S_d = F_k \cdot \gamma_f$ é a solicitação de cálculo;

F_k é o valor característico da solicitação;

γ_f é o coeficiente de ponderação da ação.

Os valores dos coeficientes de ponderação das resistências para verificação no ELU, conforme a NBR 15812-1/2010, estão indicados no quadro 3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 10):

Combinações	Alvenaria	Graute	Aço
Normais	2,0	2,0	1,2
Especiais ou de construção	1,5	1,5	1,2
Excepcionais	1,5	1,5	1,0

Quadro 3: coeficientes de ponderação das resistências
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 10)

Nos itens a seguir, serão apresentados os valores de resistência à compressão simples, tração na flexão e cisalhamento da alvenaria segundo a Norma Brasileira.

5.1.1 Resistência à compressão simples

Segundo a NBR 15812-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p.10), a resistência característica à compressão simples da alvenaria (f_k) pode ser determinada através do ensaio de paredes (de acordo com a NBR 8949⁷) ou ser estimada como 70% da resistência característica de compressão simples de prisma (f_{pk}) ou 85% da de pequena parede (f_{ppk}), valores determinados de acordo com a NBR 15812-2⁸.

5.1.2 Resistência à tração na flexão

A determinação da resistência à tração na flexão depende da direção do esforço e da resistência média à compressão da argamassa de assentamento, conforme apresentado no quadro 4.

⁷ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8949**: Paredes de alvenaria estrutura – Ensaio à compressão simples. Rio de Janeiro, 1985.

⁸ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15812-2**: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos – Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2010.

Direção da Tração	Resistência média de compressão da argamassa (MPa)		
	1,5 a 3,4	3,5 a 7,0	acima de 7,0
Normal à fiada	0,10	0,20	0,25
Paralela à fiada	0,20	0,40	0,50

Quadro 4: valores característicos da resistência à tração na flexão
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 11)

5.1.3 Resistência ao cisalhamento

De acordo com a Norma, as resistências características ao cisalhamento não devem ser maiores do que os valores apresentados no quadro 5.

Local	Resistência média de compressão da argamassa (MPa)		
	1,5 a 3,4	3,5 a 7,0	acima de 7,0
Juntas horizontais	$0,10 + 0,5 \sigma \leq 1,0$	$0,15 + 0,5 \sigma \leq 1,4$	$0,35 + 0,5 \sigma \leq 1,7$
Interfaces de paredes com amarração direta	0,35	0,35	0,35

Quadro 5: valores característicos da resistência ao cisalhamento
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 11)

Quando existirem armaduras de flexão perpendiculares ao plano do cisalhamento e envoltas por graute, a resistência característica ao cisalhamento (f_{vk}) pode ser obtida pela seguinte expressão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 11):

$$f_{vk} = 0,35 + 17,5\rho \leq 0,7MPa \quad (\text{expressão 42})$$

Onde:

$\rho = \frac{A_s}{b.d}$ é a taxa geométrica de armadura;

A_s é a área de armadura principal de flexão;

b é a largura útil da seção transversal;

d é a altura útil da seção transversal.

5.2 DISPOSIÇÕES ESPECÍFICAS PARA PAREDES EM ALVENARIA

Nos próximos itens serão apresentadas disposições que a Norma prevê para o dimensionamento de paredes em alvenaria estrutural.

5.2.1 Altura efetiva

A altura efetiva (h_e) de uma parede deve ser considerada igual (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 19):

- a) à altura da parede, se houver travamento que restrinjam os deslocamentos horizontais das suas extremidades;
- b) ao dobro da altura, se uma extremidade for livre e se houver travamento que restrinja conjuntamente o deslocamento horizontal e a rotação na outra extremidade.

5.2.2 Espessura efetiva

A espessura efetiva (t_e) de uma parede sem enrijecedores será a sua espessura real, não se considerando os revestimentos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 19).

5.2.3 Esbeltez

O índice de esbeltez (λ) é a razão entre a altura efetiva (h_e) e a espessura efetiva (t_e) da parede ou pilar (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 21):

$$\lambda = h_e / t_e \quad (\text{expressão 43})$$

Os valores máximos permitidos pela Norma estão apresentados no quadro 6.

Elementos não-armados	24
Elementos armados	30

Quadro 6: valores máximos do índice de esbeltez
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 22)

5.3 DIMENSIONAMENTO

No dimensionamento de um elemento de alvenaria no seu estado limite último, são admitidas as seguintes hipóteses (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 23-24):

- a) as seções transversais se mantêm planas após a deformação;
- b) as armaduras aderentes têm a mesma deformação que a alvenaria em seu entorno;
- c) a resistência à tração da alvenaria é nula;
- d) as máximas tensões de compressão deverão ser menores ou iguais à resistência à compressão da alvenaria;
- e) a distribuição das tensões de compressão nos elementos de alvenaria submetidos à flexão pode ser representada por um diagrama retangular;
- f) para flexão ou flexo-compressão o máximo encurtamento da alvenaria se limita a 0,35%;
- g) o máximo alongamento do aço se limita em 1%.

5.3.1 Dimensionamento da alvenaria à compressão simples

Em paredes de alvenaria estrutural o esforço resistente será obtido através da expressão 44, onde a contribuição de eventuais armaduras será sempre desconsiderada (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 24):

$$N_{rd} = f_d \cdot A \cdot R \quad (\text{expressão 44})$$

Onde:

N_{rd} é a força normal resistente de cálculo;

f_d é a resistência à compressão de cálculo da alvenaria;

A é a área da seção resistente;

$R = \left[1 - \left(\frac{\lambda}{40} \right)^3 \right]$ é o coeficiente redutor devido à esbeltez da parede.

5.3.2 Dimensionamento da alvenaria ao cisalhamento

A tensão convencional de cisalhamento de cálculo (τ_{vd}), em peças de alvenaria armada, é dada pela expressão 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 29):

$$\tau_{vd} = \frac{V_d}{b \cdot d} \quad (\text{expressão 45})$$

Onde:

V_d é a força cortante de cálculo;

b é a largura útil da seção transversal;

d é a altura útil da seção transversal.

A tensão de cálculo não pode superar a resistência de cálculo obtida a partir dos valores característicos da resistência ao cisalhamento (f_{vk}) especificados anteriormente. Quando este valor superar a resistência, o elemento deverá possuir armadura de cisalhamento (A_{sw}),

posicionada paralelamente à direção de atuação da força cortante, e determinada pela expressão 46 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 30):

$$A_{sw} = \frac{(V_d - V_a) \cdot s}{0,5 \cdot f_{yd} \cdot d} \quad (\text{expressão 46})$$

Onde:

V_d é o esforço cortante de cálculo;

$V_a = f_{vd} \cdot b \cdot d$ é a parcela do esforço cortante absorvido pela alvenaria;

s é o espaçamento da armadura de cisalhamento;

f_{yd} é a resistência de cálculo de escoamento da armadura;

d é a altura útil da seção transversal.

5.3.3 Dimensionamento da alvenaria à flexo-compressão

O dimensionamento de elementos que possuem esbeltez menor ou no máximo igual a 12 à flexo-compressão é dado através das aproximações abaixo, apropriadas para a flexão reta de elementos de seção retangular. Quando a solitação normal não exceder a resistência de cálculo apresentada na expressão 47, será necessária apenas a utilização de armadura mínima na seção. Esta expressão só poderá ser aplicada se a excentricidade (e_x) não exceder a $0,5h$ (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 31).

$$N_{Rd} = f_d \cdot b \cdot (h - 2 \cdot e_x) \quad (\text{expressão 47})$$

Onde

b é a largura da seção;

e_x é a excentricidade resultante no plano de flexão;

f_d é a resistência à compressão de cálculo da alvenaria;

h é a altura da seção no plano de flexão.

Quando a força normal de cálculo exceder o limite anterior, a resistência da seção do elemento de alvenaria submetido à flexo-compressão pode ser estimada pelas expressões 48 e 49, conforme a figura 11 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 31):

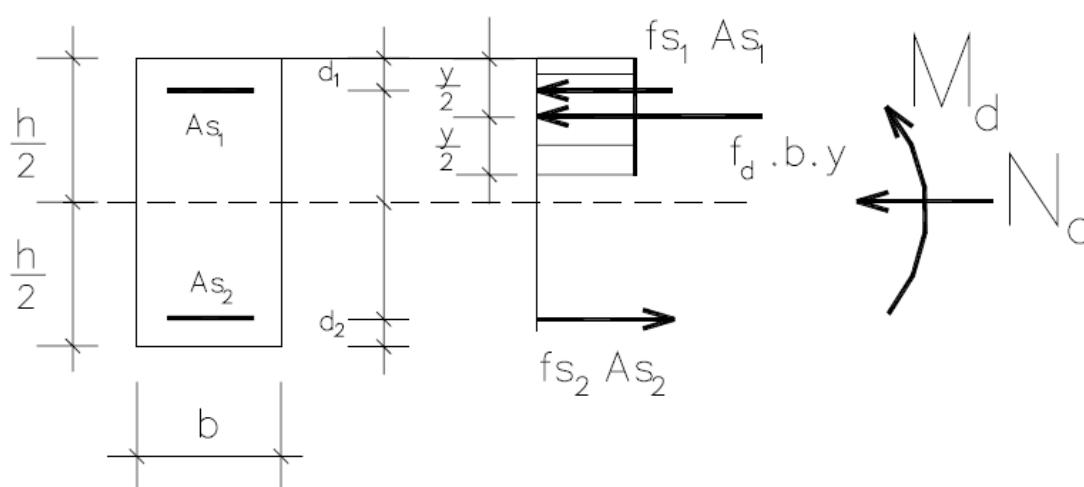


Figura 11: flexo-compressão em seção retangular
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 32)

$$N_{Rd} = f_d \cdot b \cdot y + f_{s1} \cdot A_{s1} - f_{s2} \cdot A_{s2} \quad (\text{expressão 48})$$

$$M_{Rd} = 0,5 f_d \cdot b \cdot y \cdot (h - y) + f_{s1} \cdot A_{s1} \cdot (0,5 h - d_1) + f_{s2} \cdot A_{s2} \cdot (0,5 h - d_2) \quad (\text{expressão 49})$$

Onde:

A_{s1} é a área de armadura comprimida na face de maior compressão;

A_{s2} é a área de armadura na outra face;

b é a largura da seção;

d_1 é a distância do centróide da armadura A_{s1} à borda mais comprimida;

d_2 é a distância do centróide da armadura A_{s2} à outra borda;

y é a profundidade da região de compressão uniforme ($y = 0,8.x$);

f_d é a resistência à compressão de cálculo da alvenaria;

f_{s1} é a tensão na armadura na face mais comprimida $0,5.f_{yd}$;

f_{s2} é a tensão na armadura na outra face, podendo ser $\pm 0,5.f_{yd}$, se estiver tracionada ou comprimida, respectivamente;

h é a altura da seção no plano de flexão.

A área de armadura principal calculada para vigas e paredes de alvenaria armada, não poderá ser menor do que 0,10% da área da seção transversal, enquanto que a área mínima de aço da armadura secundária deverá ser 0,05% da seção transversal correspondente. Por outro lado, as armaduras alojadas em um mesmo espaço grauteado não podem ter área superior a 8% da correspondente área da seção do graute envolvente, considerando-se eventuais regiões de trespasse (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 34).

6 MODELO ESTRUTURAL

Neste capítulo são discutidos os elementos do modelo estrutural idealizado para a realização deste trabalho. Nos próximos itens são apresentados o material escolhido a ser armazenado na estrutura, a definição das dimensões dos silos e as ações atuantes na estrutura. Os valores mostrados neste capítulo servirão de dados de entrada para a simulação pelo método dos elementos finitos das estruturas estudadas.

6.1 MATERIAL A SER ARMAZENADO

A definição do material a ser armazenado na estrutura é de extrema importância no dimensionamento deste tipo de estrutura, visto que as pressões devidas ao material são as solicitações preponderantes durante toda a vida útil do silo e estas dependem diretamente das propriedades do material. Neste trabalho, o material escolhido para armazenamento foi o grão de soja, sendo suas características obtidas do Anexo E do EN 1991-4 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 99), conforme apresentado no quadro 7.

Peso específico γ (kN/m ³)	Ângulo de repouso ϕ_r (graus)	Ângulo de atrito interno		Razão de pressão lateral		Coeficiente de atrito		Fator de referência para pressão local C_{op}
		ϕ_i (graus)	$\alpha\phi$	K	α_k	μ	$\alpha\mu$	
8,00	29,00	25,00	1,16	0,63	1,11	0,48	1,16	0,50

Quadro 7: características do material armazenado
(adaptado de EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 99)

Conforme previsto nesta mesma Norma, a definição dos esforços atuantes durante o enchimento e esvaziamento de um silo deve levar em consideração três diferentes situações (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 25):

- a) máxima pressão normal na parede vertical do silo;
- b) máximo atrito vertical entre o grão e a parede vertical do silo;

c) máxima pressão vertical no fundo do silo.

Sabendo-se que as propriedades de um material granular (μ , K e φ_i) apresentam uma certa variabilidade, para se obter os valores que resultem nas condições extremas de carregamento deve-se aplicar os respectivos fatores de correção (α_μ , α_k e α_φ) a estas propriedades. Além disto, para se determinar as máximas solicitações, a Norma recomenda a utilização das seguintes combinações (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 26):

a) máxima pressão normal: $\mu' = \mu / \alpha_\mu$, $K' = \alpha_k \cdot K$ e $\varphi_i' = \varphi_i / \alpha_\varphi$;

b) máximo atrito vertical: $\mu' = \alpha_\mu \cdot \mu$, $K' = \alpha_k \cdot K$ e $\varphi_i' = \varphi_i / \alpha_\varphi$;

c) máxima pressão vertical: $\mu' = \mu / \alpha_\mu$, $K' = K / \alpha_k$ e $\varphi_i' = \alpha_\varphi \cdot \varphi_i$.

6.2 DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DOS SILOS ESTUDADOS

Neste trabalho, a capacidade de armazenamento nas estruturas foi fixada em 12000 sacas de 50 kg de soja, totalizando um volume de armazenamento da ordem de 735 m³. Para a determinação das dimensões dos silos, partiu-se da capacidade de armazenamento pré-determinada de forma a se obter três relações de forma: um silo esbelto ($h / d_c \geq 2,0$), um silo intermediário ($1,0 < h / d_c < 2,0$) e um silo baixo ($h / d_c \leq 1,0$), conforme apresentado no quadro 8.

	Armazenamento (Sacas)	Volume (m ³)	h (m)	dc (m)	h/dc	Perímetro (m)	Área (m ²)
Silo Esbelto	12000,000	735,450	18,000	7,213	2,495	22,660	40,858
Silo de Esbeltez Intermediária	12000,000	735,450	13,000	8,487	1,532	26,663	56,573
Silo Baixo	12000,000	735,450	8,000	10,819	0,739	33,989	91,931

Quadro 8: dimensões dos silos estudados

6.3 DETERMINAÇÃO DAS CARGAS ATUANTES

A partir da definição da geometria dos silos em estudo, bem como do material a ser armazenado, pode-se determinar as cargas atuantes na estrutura conforme equações apresentadas no capítulo 4.

6.3.1 Cargas permanentes

O peso específico aparente da alvenaria de blocos cerâmicos adotado neste trabalho foi de 18 kN/m³. O peso próprio por unidade de comprimento, atuante devido às paredes de alvenaria, dependerá ainda da espessura definida pelo dimensionamento do silo e da altura de cada estrutura analisada.

O valor do peso próprio da cobertura, considerado como uma carga adicional, foi adotado como 0,35 kN/m², valor utilizado por Scalabrin (2008, p. 42) baseado em valores utilizados usualmente por empresas fabricantes de silos para coberturas de estrutura metálica com telhas cerâmicas.

6.3.2 Pressões devidas ao material armazenado

A partir das equações apresentadas anteriormente no item 4.2, referentes à determinação das pressões devidas ao material armazenado em um silo, foram obtidos os valores para estas ações de acordo com a esbeltez da estrutura. Estes foram reunidos, tabelados e graficados a fim de descrever a distribuição destas ações ao longo da altura dos diferentes silos. É importante ressaltar que as pressões assim calculadas para os silos em estudo se comportaram de maneira satisfatória, dentro das estimativas previstas pela EN 1991-4:2006.

6.3.2.1 Silo esbelto

Os valores das pressões devidas aos materiais armazenados em um silo esbelto podem ser observadas no quadro 9. Neste quadro, como já se esperava, pode-se observar claramente o aumento das pressões até que se atinja os valores máximos na base da estrutura.

h(m)	Enchimento				Esvaziamento			
	phf (kN/m ²)	Nzskf (kN/m)	pvf (kN/m ²)	ppf (kN/m ²)	phe (kN/m ²)	Nzske (kN/m)	pve (kN/m ²)	ppe (kN/m ²)
18,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17,00	5,169	1,451	7,501	0,485	5,944	1,596	7,501	1,116
16,00	9,571	5,422	14,086	0,898	11,007	5,964	14,086	2,066
15,00	13,321	11,424	19,867	1,250	15,319	12,566	19,867	2,876
14,00	16,514	19,061	24,942	1,550	18,991	20,967	24,942	3,565
13,00	19,235	28,017	29,397	1,805	22,120	30,819	29,397	4,152
12,00	21,551	38,035	33,308	2,023	24,784	41,839	33,308	4,652
11,00	23,525	48,909	36,741	2,208	27,054	53,800	36,741	5,078
10,00	25,206	60,473	39,755	2,366	28,987	66,520	39,755	5,441
9,00	26,637	72,593	42,402	2,500	30,633	79,852	42,402	5,750
8,00	27,858	85,160	44,725	2,615	32,037	93,676	44,725	6,014
7,00	28,895	98,089	46,764	2,712	33,229	107,898	46,764	6,238
6,00	29,780	111,308	48,554	2,795	34,247	122,439	48,554	6,429
5,00	30,534	124,761	50,126	2,866	35,114	137,237	50,126	6,591
4,00	31,175	138,404	51,505	2,926	35,851	152,244	51,505	6,730
3,00	31,722	152,198	52,717	2,977	36,480	167,418	52,717	6,848
2,00	32,188	166,116	53,780	3,021	37,016	182,728	53,780	6,948
1,00	32,584	180,131	54,714	3,058	37,472	198,144	54,714	7,034
0,00	32,922	194,227	55,533	3,090	37,860	213,650	55,533	7,107

Quadro 9: pressões devidas ao material armazenado no silo esbelto

A variação da pressão horizontal pela altura do silo pode ser verificada na figura 12, enquanto que a variação do atrito lateral pode ser observada na figura 13. A diferença apresentada entre a pressão horizontal e atrito lateral no enchimento (p_{hf} e n_{zskf}) em relação aos valores referentes ao esvaziamento (p_{he} e n_{zske}) é devida aos coeficientes de majoração previstos pela Norma adotada.

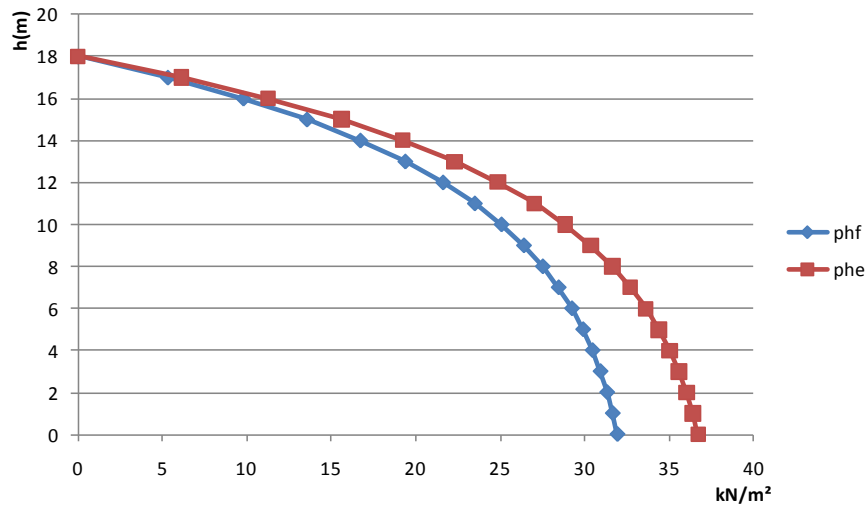


Figura 12: pressão horizontal no silo esbelto ao longo da altura h

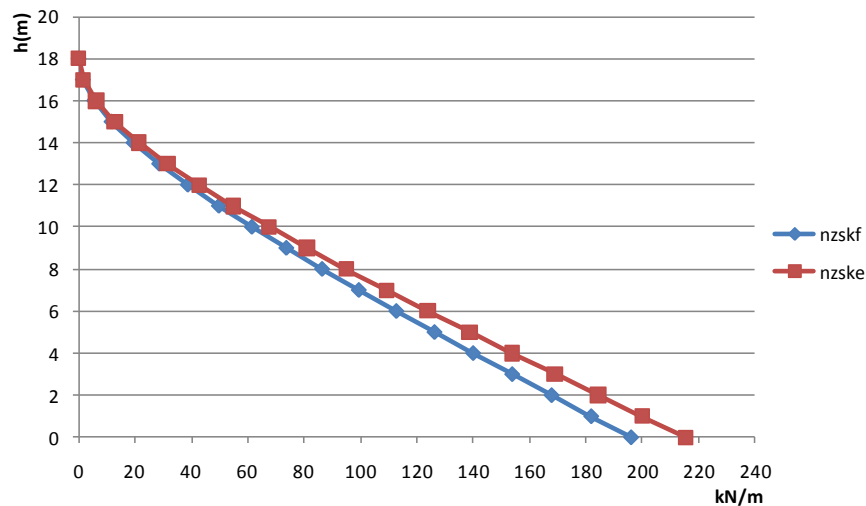


Figura 13: atrito lateral no silo esbelto ao longo da altura h

6.3.2.2 Silo intermediário

Os valores das pressões devidas aos materiais armazenados em um silo intermediário podem ser observados no quadro 10. A intensidade das pressões ao longo da altura apresenta um comportamento semelhante ao caso do silo esbelto, apresentando seus máximos valores na base da estrutura de armazenamento.

h(m)	Enchimento				Esvaziamento			
	phf (kN/m ²)	Nzskf (kN/m)	pvf (kN/m ²)	ppf (kN/m ²)	phe (kN/m ²)	Nzske (kN/m)	pve (kN/m ²)	ppe (kN/m ²)
13,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12,00	1,806	0,109	7,969	0,104	1,950	0,115	7,969	0,225
11,00	8,637	2,983	15,090	0,498	9,326	3,142	15,090	1,076
10,00	13,650	8,732	21,217	0,788	14,739	9,196	21,217	1,701
9,00	17,462	16,466	26,565	1,008	18,855	17,342	26,565	2,176
8,00	20,444	25,642	31,289	1,180	22,075	27,006	31,289	2,548
7,00	22,831	35,906	35,504	1,317	24,652	37,815	35,504	2,845
6,00	24,779	47,018	39,296	1,430	26,755	49,518	39,296	3,088
5,00	26,394	58,807	42,734	1,523	28,499	61,934	42,734	3,289
4,00	27,751	71,146	45,870	1,601	29,965	74,929	45,870	3,458
3,00	28,905	83,941	48,746	1,668	31,211	88,405	48,746	3,602
2,00	29,896	97,118	51,398	1,725	32,281	102,282	51,398	3,725
1,00	30,756	110,620	53,854	1,775	33,209	116,502	53,854	3,833
0,00	31,508	124,402	56,137	1,818	34,021	131,017	56,137	3,926

Quadro 10: pressões devidas ao material armazenado no silo intermediário

Da mesma forma que no caso anterior, as ações durante o esvaziamento são majoradas, apresentando valores maiores do que durante o enchimento da estrutura. A variação da pressão horizontal ao longo da altura do silo pode ser verificada na figura 14, enquanto que a variação do atrito lateral pode ser observada na figura 15.

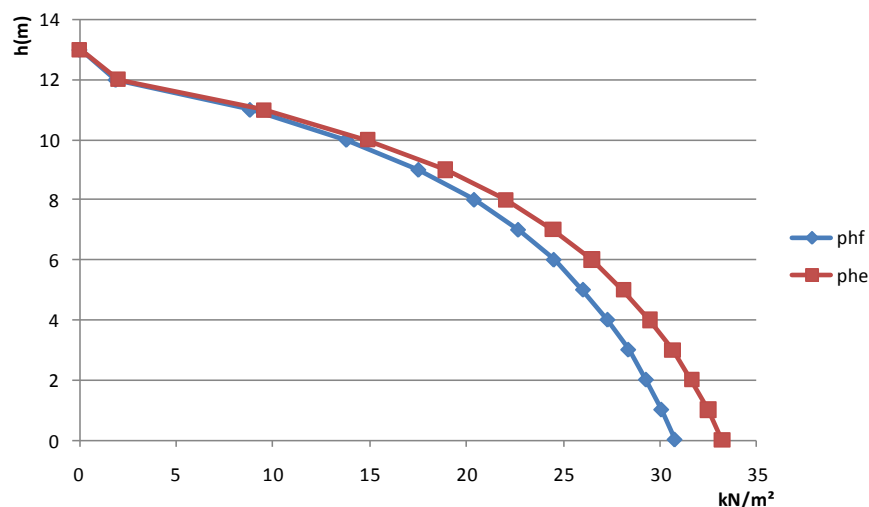


Figura 14: pressão horizontal no silo intermediário ao longo da altura h

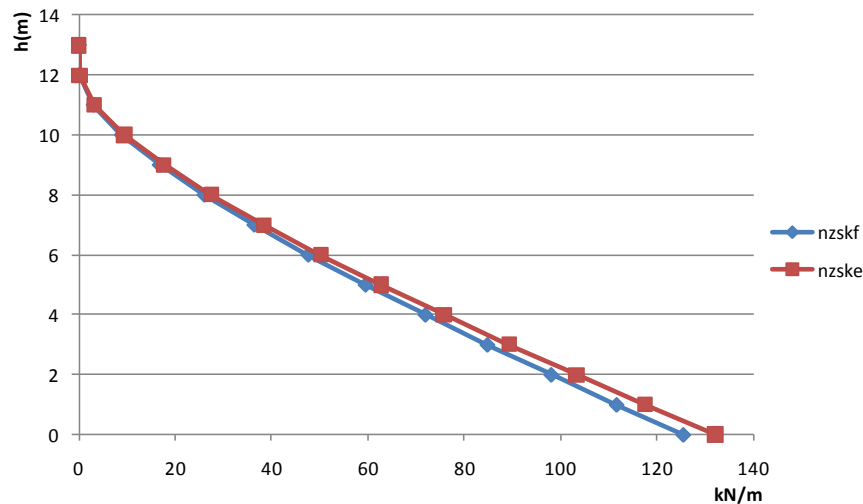


Figura 15: atrito lateral no silo intermediário ao longo da altura h

6.3.2.3 Silo baixo

Os valores das pressões devidas aos materiais armazenados em um silo esbelto podem ser observados no quadro 11.

h(m)	Enchimento				Esvaziamento			
	phf (kN/m ²)	Nzskf (kN/m)	pvf (kN/m ²)	ppf (kN/m ²)	phe (kN/m ²)	Nzske (kN/m)	pve (kN/m ²)	ppe (kN/m ²)
8,00	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000	-
7,00	0,004	0,000	8,000	-	0,004	0,000	8,000	-
6,00	7,603	2,145	15,498	-	7,603	2,145	15,498	-
5,00	13,483	7,706	22,125	-	13,483	7,706	22,125	-
4,00	18,148	15,755	28,040	-	18,148	15,755	28,040	-
3,00	21,925	25,689	33,365	-	21,925	25,689	33,365	-
2,00	25,036	37,092	38,193	-	25,036	37,092	38,193	-
1,00	27,637	49,669	42,599	-	27,637	49,669	42,599	-
0,00	29,838	63,203	46,641	-	29,838	63,203	46,641	-

Quadro 11: pressões devidas ao material armazenado no silo baixo

Visto que a estrutura apresenta $h/d_c \leq 1,0$, os efeitos devido à esbeltez da estrutura podem ser desconsiderados de forma que a intensidade das pressões durante o enchimento e esvaziamento do silo são exatamente iguais, além de não se fazer necessária a consideração da pressão local. Sendo assim, a variação da pressão horizontal pela altura do silo pode ser verificada na figura 16, enquanto que a do atrito lateral pode ser observada na figura 17.

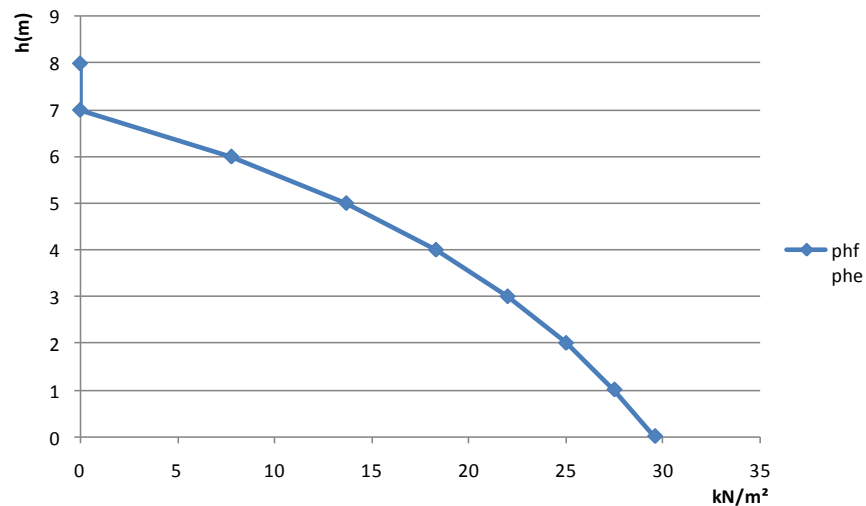


Figura 16: pressão horizontal no silo baixo ao longo da altura h

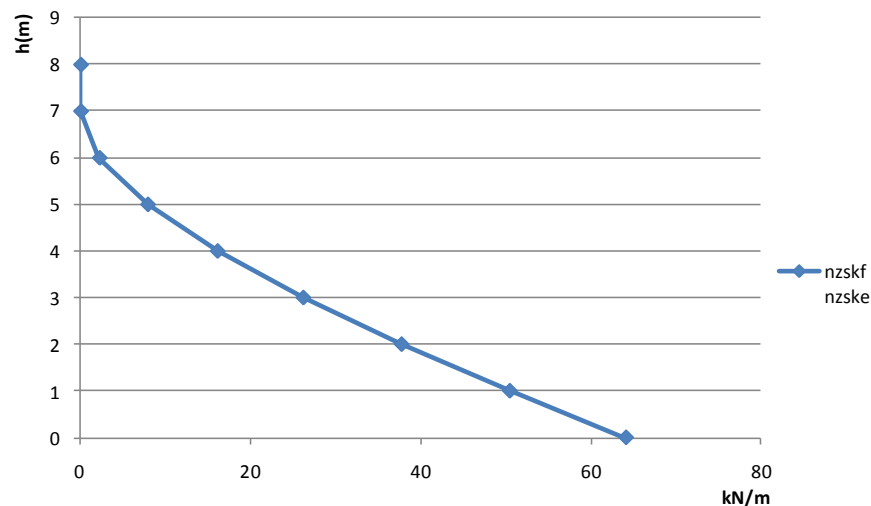


Figura 17: atrito lateral no silo baixo ao longo da altura h

6.3.3 Pressões devidas ao vento

As pressões devidas à ação do vento foram determinadas baseadas nas recomendações da NBR 6123/88: Forças devidas ao vento nas edificações. Para a obtenção das pressões, foram feitas as seguintes considerações:

- velocidade básica do vento: $V_o=45$ m/s;

- b) fator topográfico (terreno plano): $S_1=1,0$;
- c) terreno admitido como categoria III e a edificação como classe A;
- d) fator estatístico (baixo teor de ocupação): $S_3=0,95$.

Para o cálculo das pressões externas (C_{pe}), com distribuição conforme figura 18, foi adotada a média dos valores obtidos para cada metro de parede, sendo então aplicada a mesma pressão em toda a extensão da parede.

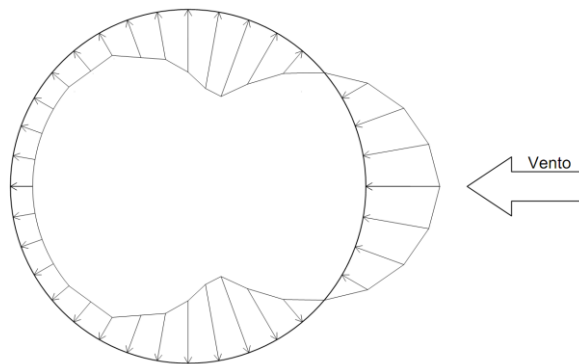


Figura 18: distribuição das pressões externas devidas às ações do vento

No caso da força de arrasto, a pressão foi aplicada na parede respeitando a sua variação ao longo da altura da estrutura, conforme apresentado na figura 19.

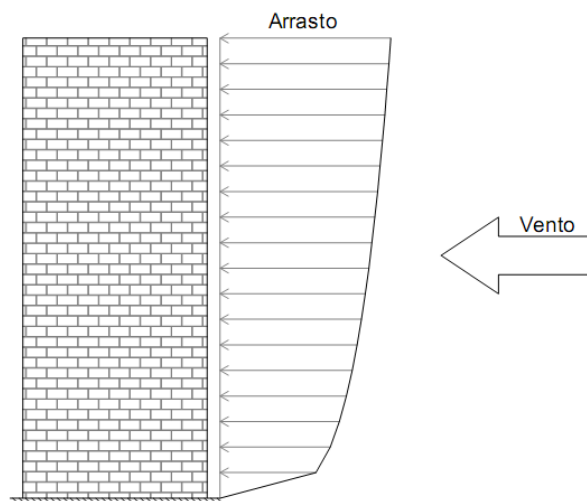


Figura 19: distribuição das pressões de arrasto devidas às ações do vento

Nos quadros 12 a 14, estão apresentados os valores das pressões devidas ao vento para cada relação de forma estudada.

h(m)	q (kN/m ²)	Ca	Arrasto (kN/m ²)	Cpe (kN/m ²)
18,00	1,113	0,80	0,890	1,113
17,00	1,101	0,80	0,881	1,101
16,00	1,087	0,80	0,870	1,087
15,00	1,074	0,80	0,859	1,074
14,00	1,059	0,80	0,847	1,059
13,00	1,043	0,80	0,834	1,043
12,00	1,027	0,80	0,822	1,027
11,00	1,009	0,80	0,807	1,009
10,00	0,990	0,80	0,792	0,990
9,00	0,969	0,80	0,775	0,969
8,00	0,947	0,80	0,757	0,947
7,00	0,922	0,80	0,737	0,922
6,00	0,894	0,80	0,715	0,894
5,00	0,862	0,80	0,689	0,862
4,00	0,824	0,80	0,659	0,824
3,00	0,778	0,80	0,622	0,778
2,00	0,718	0,80	0,574	0,718
1,00	0,625	0,80	0,500	0,625
			Média	0,947

Quadro 12: pressões devidas ao vento no silo esbelto

h(m)	q (kN/m ²)	Ca	Arrasto (kN/m ²)	Cpe (kN/m ²)
13,00	1,043	0,70	0,730	1,043
12,00	1,027	0,70	0,719	1,027
11,00	1,009	0,70	0,706	1,009
10,00	0,990	0,70	0,693	0,990
9,00	0,969	0,70	0,679	0,969
8,00	0,947	0,70	0,663	0,947
7,00	0,922	0,70	0,645	0,922
6,00	0,894	0,70	0,626	0,894
5,00	0,862	0,70	0,603	0,862
4,00	0,824	0,70	0,577	0,824
3,00	0,778	0,70	0,545	0,778
2,00	0,718	0,70	0,502	0,718
1,00	0,625	0,70	0,437	0,625
			Média	0,893

Quadro 13: pressões devidas ao vento no silo intermediário

h(m)	q (kN/m ²)	Ca	Arrasto (kN/m ²)	Cpe (kN/m ²)
8,00	0,947	0,70	0,663	0,947
7,00	0,922	0,70	0,645	0,922
6,00	0,894	0,70	0,626	0,894
5,00	0,862	0,70	0,603	0,862
4,00	0,824	0,70	0,577	0,824
3,00	0,778	0,70	0,545	0,778
2,00	0,718	0,70	0,502	0,718
1,00	0,625	0,70	0,437	0,625
			Média	0,821

Quadro 14: pressões devidas ao vento no silo baixo

6.4 COMBINAÇÕES DE CARGA

Para cobrir as incertezas não só na determinação das solicitações, como também do comportamento real da estrutura, os materiais e/ou esforços são afetados por coeficientes de segurança que dependem do critério de dimensionamento adotado. Atualmente, na questão de estruturas em alvenaria no Brasil, está ocorrendo uma transição do critério de tensões admissíveis, onde se assume que os materiais atuem nos estádios I e II, para o critério dos estados limites de serviço e último, onde se faz uso de um coeficiente global composto por coeficientes parciais, que corrigem tanto os esforços como as resistências dos materiais.

Como é muito pouco provável que todas as solicitações aconteçam com toda a sua intensidade ao mesmo tempo, as possíveis solicitações que possam vir a atuar na estrutura são consideradas na forma de combinações. Nestas combinações, certos esforços são considerados principais, sendo então majorados, enquanto os demais são reduzidos.

A partir das considerações previstas na NBR 15812-1/2010 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 15) em relação à segurança, foram definidas duas combinações de cargas: durante o esvaziamento da estrutura e quando está encontra-se vazia sobre a ação do vento.

$$0,9 \times PP + 1,4 \times Grãos$$

(combinação 1)

$$0,9x PP + 1,4x Vento$$

(combinação 2)

Devido ao fato que a alvenaria apresenta boa resistência à compressão e fragilidade a tensões de tração, aliado ao fato de que as ações provenientes dos materiais armazenados e ao vento são esforços horizontais, logo geram momentos e esforços de tração, o peso próprio da estrutura sempre foi minorado visto que este sempre age de forma favorável à estabilidade da estrutura.

Na combinação 1, os carregamentos provenientes das ações do vento não foram combinados com as ações provenientes dos materiais armazenados. Esta consideração foi adotada pelo fato de que como as estruturas são relativamente baixas, as solicitações geradas pelo vento tendem a se mostrar muito inferiores quando comparadas às geradas apenas pela ação dos grãos além de que eliminariam a simetria das solicitações impostas pelo material armazenado.

7 ANÁLISE ESTRUTURAL

Neste capítulo serão apresentados detalhes da modelagem em elementos finitos realizada para a determinação das solicitações resultantes das ações definidas no capítulo anterior. Estas serão apresentadas para cada relação de esbeltez estudada: silo esbelto, silo intermediário e silo baixo.

7.1 MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

Para a análise foi utilizado o programa de cálculo estrutural TNO Diana 9.4, baseado no Método dos Elementos Finitos, considerando o modelo apresentado na figura 20. Após completar as diferentes etapas para a construção de um modelo consistente: definição da geometria devidamente restringida, escolha dos elementos apropriados, definição das características dos materiais e definição dos casos de carregamento, foi possível extrair as solicitações impostas pelos carregamentos na estrutura.

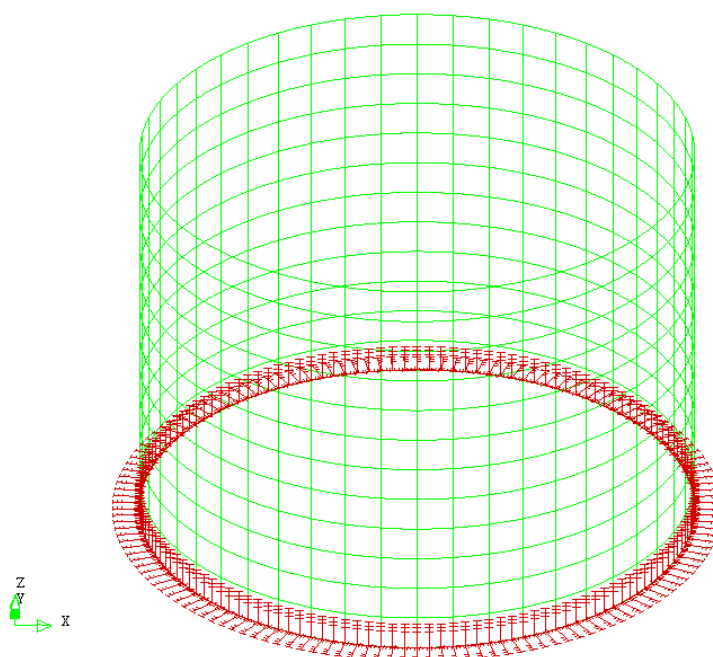


Figura 20: modelo em elementos finitos do silo baixo

7.1.1 Elemento adotado

Os resultados de uma análise por elementos finitos são muito condicionados à capacidade dos elementos escolhidos em representar o comportamento real da estrutura. Neste sentido, os modelos foram criados utilizando elementos de casca curva (*curved shell* na nomenclatura do DIANA) quadrangular de 12 nós (figura 21) para a definição da parede vertical do silo em alvenaria, já que este é apropriado para estados planos de tensões ou deformações e/ou carregamentos fora do plano. As dimensões dos elementos variaram de acordo com as dimensões do silo a ser modelado, sendo considerada uma espessura constante de 300 mm nos três modelos.

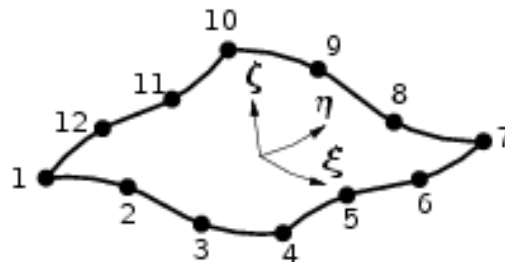


Figura 21: elemento de casca curva adotado – CQ60S (TNO DIANA, 2009)

Estes elementos simularam satisfatoriamente as propriedades de membrana existentes neste tipo de estrutura e resultaram em solicitações, segundo os eixos locais do elemento, conforme mostra a figura 22.

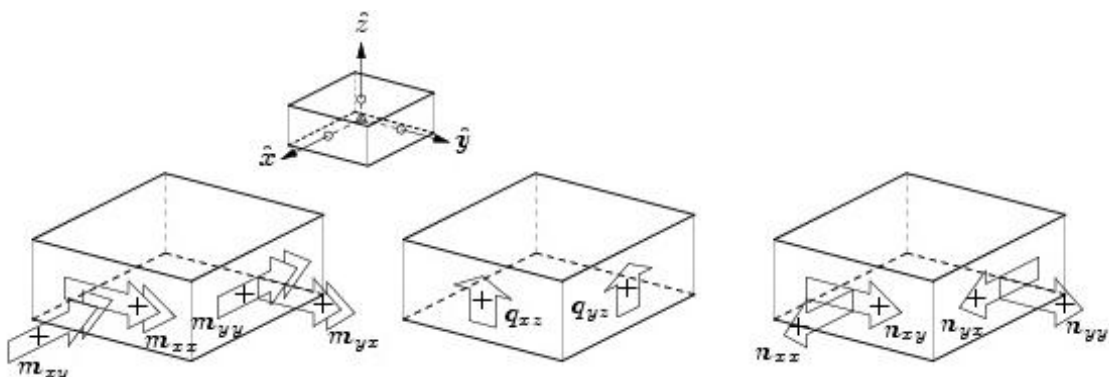


Figura 22: solicitações resultantes no eixo local do elemento (TNO DIANA, 2009)

Visto que no *software* estes resultados são expressos segundo os eixos locais do elemento, conforme apresentado na figura acima, a representação destas solicitações de acordo com os eixos globais da estrutura resultaria na distribuição destas conforme mostrado na figura 23.

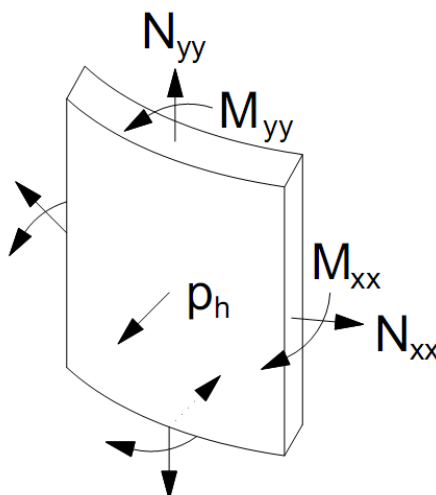


Figura 23: solicitações resultantes do elemento

7.1.2 Considerações acerca do modelo

Durante a modelagem em elementos finitos, foram feitas algumas considerações fundamentais para a determinação do comportamento da estrutura. Considerou-se o silo engastado por toda a extensão da parede em sua base e livre na sua extremidade superior. A adoção destas restrições é justificada pelo fato de que a cobertura foi considerada simplesmente apoiada na estrutura não conferindo rigidez relevante à parede do silo e pela não consideração da interação entre a laje de fundo, considerada extremamente rígida, e a parede de alvenaria. A alvenaria das paredes foi modelada considerando-a um material homogêneo isotrópico, visto que seria realizada uma análise estrutural estática dos silos, com módulo de elasticidade de 15 GPa e coeficiente de Poisson de 0,2.

As solicitações da parede foram extraídas considerando-se uma faixa vertical de elementos. Para o caso em que são considerados o peso próprio da estrutura mais as ações devidas aos materiais armazenados, devido à simetria dos carregamentos, uma faixa representa as solicitações em toda a circunferência da parede. Na combinação em que agem o peso próprio

da estrutura e as pressões devidas ao vento, foram levadas em conta, para análise, três faixas de elementos: uma situada a barlavento, outra a sotavento e uma faixa situada aproximadamente perpendicular ao ângulo de incidência do vento. Nos itens abaixo serão apresentados as solicitações resultantes de cada tipo de combinação para as diferentes relações de forma consideradas.

7.2 COMBINAÇÃO 1: 0,9 PP + 1,4 Grãos

Nos itens abaixo serão apresentados os resultados obtidos para a combinação de carga que leva em conta o peso próprio da estrutura e as solicitações provenientes do material armazenado para cada relação de forma estudada, bem como suas deformadas.

7.2.1 Silo esbelto

A deformada resultante desta combinação é apresentada na figura 24, enquanto que as solicitações resultantes para o caso do silo esbelto estão resumidas no quadro 15.

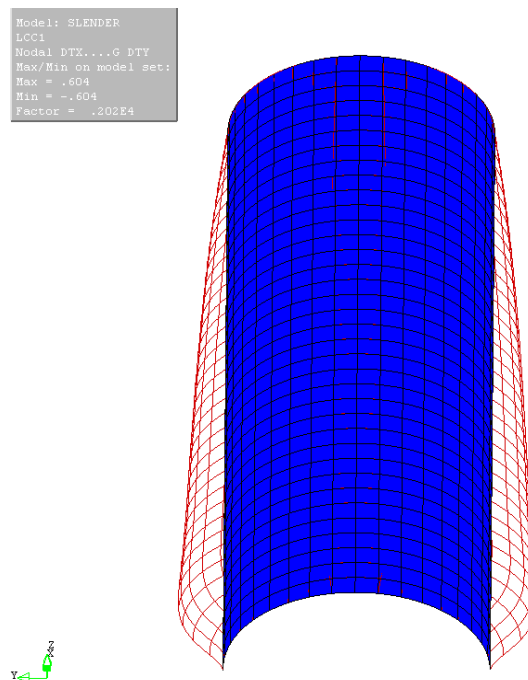


Figura 24: deformada resultante da combinação 1 no silo esbelto (TNO Diana)

A deformada resultante da estrutura apresentou um valor máximo de 0,604 milímetros, deformação não significativa e perfeitamente aceitável para este tipo de estrutura.

h(m)	N _{xx} (kN/m)	N _{yy} (kN/m)	Cortante (kN/m)	M _{xx} (kN.m/m)	M _{yy} (kN.m/m)
18,00	0,72	0,98	0,04	0,03	0,00
17,00	29,30	-5,01	0,00	-0,03	0,06
16,00	55,10	-14,00	0,07	-0,09	0,07
15,00	77,10	-26,60	0,09	-0,14	0,05
14,00	95,70	-41,90	0,09	-0,19	0,03
13,00	112,00	-59,50	0,09	-0,23	0,01
12,00	125,00	-78,90	0,08	-0,26	-0,01
10,00	146,00	-122,00	0,09	-0,33	-0,03
8,00	162,00	-169,00	0,08	-0,37	-0,05
6,00	173,00	-218,00	0,10	-0,37	-0,06
4,00	181,00	-269,00	0,24	-0,27	-0,31
3,50	186,00	-281,00	-0,13	-0,17	-0,33
3,00	193,00	-294,00	-1,20	0,08	-0,03
2,50	200,00	-306,00	-3,54	0,57	1,06
2,00	200,00	-319,00	-4,70	1,33	3,47
1,50	175,00	-333,50	-2,38	1,78	5,34
1,00	108,50	-349,00	6,46	1,47	4,78
0,50	3,96	-365,00	26,50	-0,38	-3,12
0,00	-76,40	-375,00	55,20	-4,82	-24,00

Quadro 15: solicitações resultantes da combinação 1 no silo esbelto

7.2.2 Silo intermediário

A deformada resultante desta combinação é apresentada na figura 25, enquanto que as solicitações resultantes para o caso do silo intermediário estão resumidas no quadro 16.

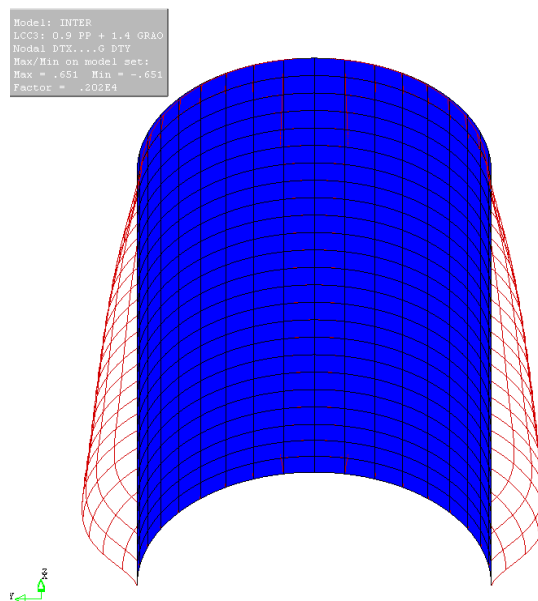


Figura 25: deformada resultante da combinação 1 no silo intermediário (TNO Diana)

A deformada resultante da estrutura apresentou um valor máximo de 0,651 milímetros, deformação não significativa e perfeitamente aceitável para este tipo de estrutura.

h(m)	Nxx (kN/m)	Nyy (kN/m)	Cortante (kN/m)	Mxx (kN.m/m)	Myy (kN.m/m)
13,00	-7,54	-1,15	0,03	0,07	0,01
12,00	19,25	-6,06	0,10	-0,06	-0,32
11,00	53,20	-13,30	-0,45	-0,06	0,02
10,00	86,10	-24,70	0,00	-0,09	0,20
9,00	111,58	-39,28	0,31	-0,15	0,15
8,00	131,17	-56,66	0,23	-0,21	0,07
7,00	146,67	-75,91	0,06	-0,24	0,03
6,00	158,67	-96,43	-0,18	-0,26	-0,01
5,00	168,67	-118,33	-0,15	-0,27	-0,12
4,00	179,95	-140,26	0,31	-0,23	-0,26
3,50	187,17	-151,28	0,23	-0,14	-0,17
3,00	195,33	-163,11	-0,84	0,07	0,33
2,50	201,53	-174,63	-3,00	0,48	1,57
2,00	196,69	-186,75	-3,56	1,01	3,57
1,50	169,00	-200,00	-1,25	1,31	4,96
1,00	106,50	-214,00	6,89	1,00	3,90
0,50	16,95	-227,00	24,05	-0,62	-3,58
0,00	-48,20	-236,00	47,30	-4,39	-21,90

Quadro 16: solicitações resultantes da combinação 1 no silo intermediário

7.2.3 Silo baixo

A deformada resultante desta combinação é apresentada na figura 26, enquanto que as solicitações resultantes para o caso do silo baixo estão resumidas no quadro 17.

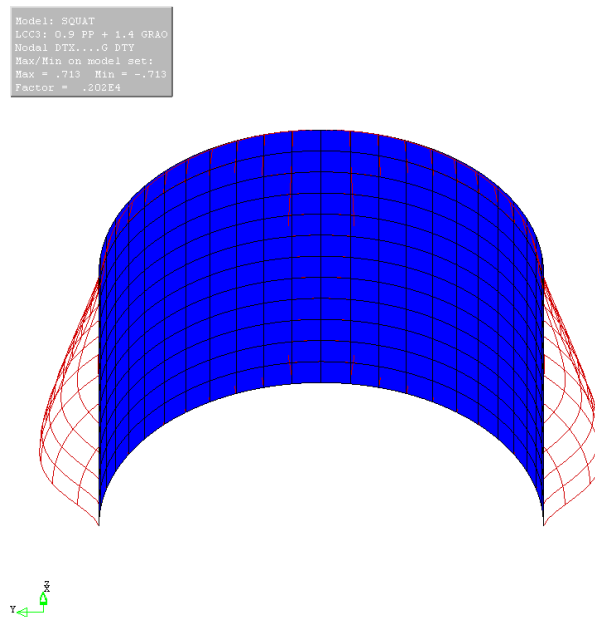


Figura 26: deformada resultante da combinação 1 no silo baixo (TNO Diana)

A deformada resultante da estrutura apresentou um valor máximo de 0,713 mm, deformação não significativa e perfeitamente aceitável para este tipo de estrutura.

h(m)	N _{xx} (kN/m)	N _{yy} (kN/m)	Cortante (kN/m)	M _{xx} (kN.m/m)	M _{yy} (kN.m/m)
8,00	-16,00	-1,46	0,02	0,03	0,02
7,50	-1,72	-3,86	0,82	-0,05	-0,26
7,00	13,95	-6,25	0,30	-0,14	-0,58
6,50	32,83	-9,04	-0,45	-0,14	-0,50
6,00	54,65	-12,60	-0,50	-0,12	-0,21
5,50	77,45	-17,30	-0,31	-0,11	0,00
5,00	99,90	-23,00	-0,07	-0,12	0,09
4,50	120,65	-29,74	0,07	-0,14	0,11
4,00	142,00	-37,30	-0,24	-0,16	0,19
3,50	160,09	-45,90	-0,99	-0,13	0,49
3,00	176,00	-55,05	-1,78	-0,01	1,16
2,50	184,48	-64,81	-2,47	0,20	2,27
2,00	179,00	-75,15	-2,57	0,47	3,63
1,50	151,04	-86,01	-0,11	0,66	4,38
1,00	97,42	-96,49	7,16	0,42	2,81
0,50	25,99	-106,87	21,43	-0,87	-3,94
0,00	-24,70	-116,00	41,10	-3,86	-19,30

Quadro 17: solicitações resultantes da combinação 1 no silo baixo

7.2.4 Comparação entre as relações de forma

Neste item serão apresentados gráficos comparativos entre as solicitações resultantes para cada relação de forma do silo para a situação em que atuam o peso próprio da estrutura e o material armazenado.

Na figura 27, visualizam-se as solicitações horizontais (N_{xx}) resultantes das pressões devidas ao material armazenado para cada relação de forma.

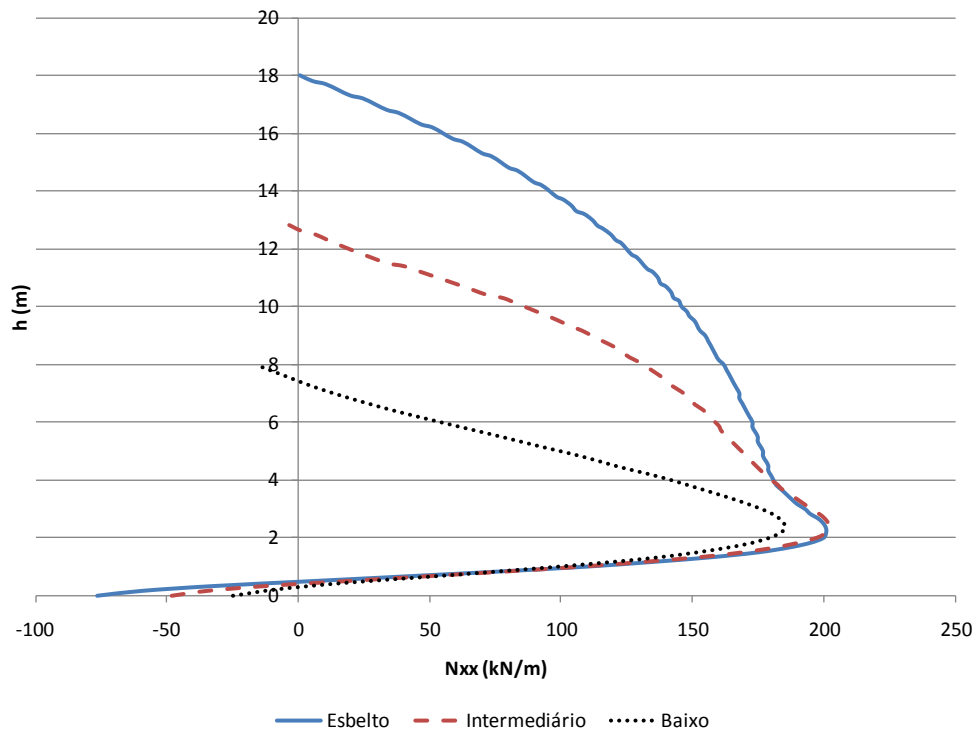


Figura 27: esforço lateral (N_{xx})

Pode-se observar que os esforços laterais máximos não apresentam variações significativas, porém a diferença de altura e a diferente distribuição de esforços na parede exigem do projetista a adoção de medidas que garantam à estrutura um bom comportamento frente a estas solicitações.

Na figura 28, estão apresentadas as solicitações verticais (N_{yy}) resultantes do atrito lateral entre o material armazenado e a parede do silo, bem como do peso próprio dos elementos em alvenaria.

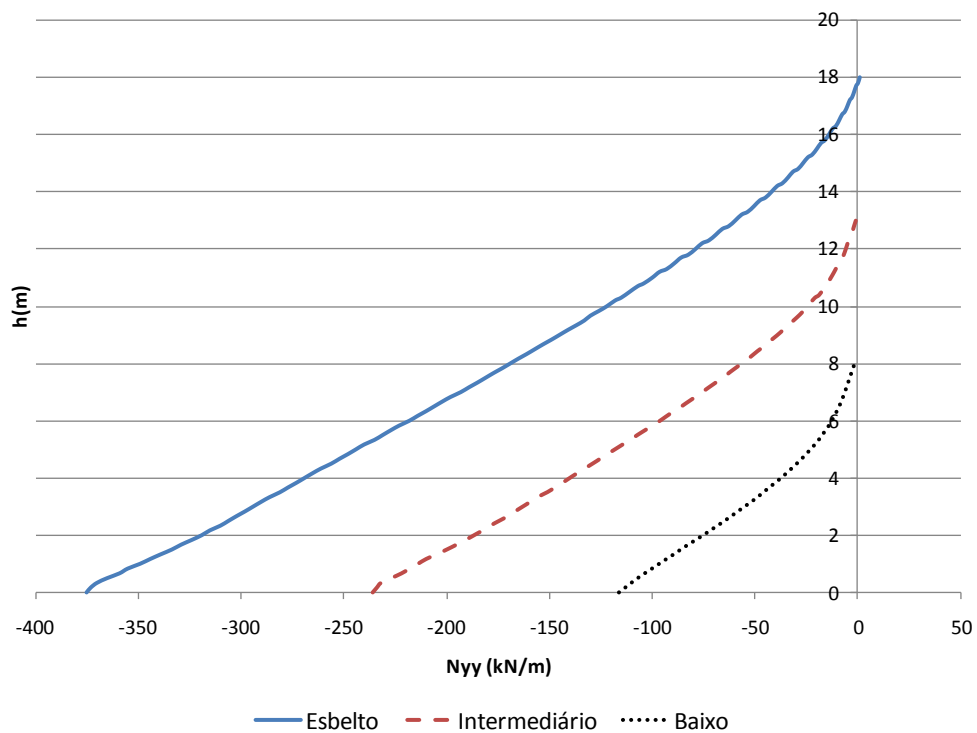


Figura 28: esforço vertical (Nyy)

Analisando a figura 28, pode-se afirmar que as diferenças de valores apresentadas representam o comportamento esperado visto que tanto o atrito lateral como o peso próprio da parede dependem diretamente da altura da estrutura, resultando em valores maiores para o caso do silo esbelto que apresenta a parede mais alta.

Nas figuras 29 e 30, estão apresentados os momentos horizontais (M_{xx}) e verticais (M_{yy}) resultantes da análise estrutural das três diferentes relações de forma.

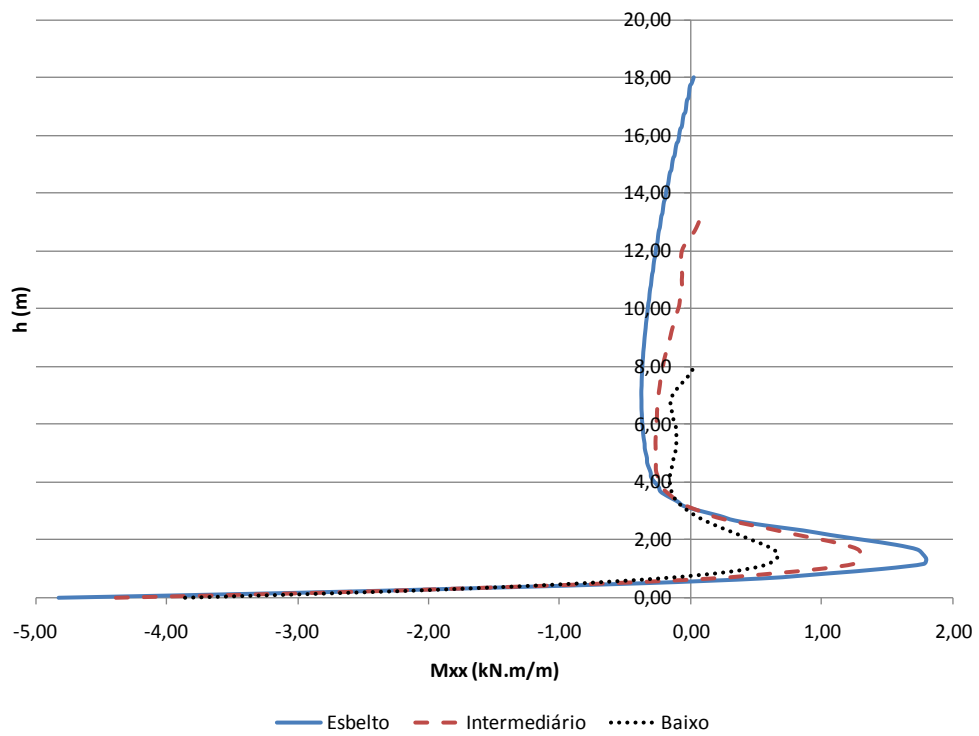


Figura 29: momento horizontal (M_{xx})

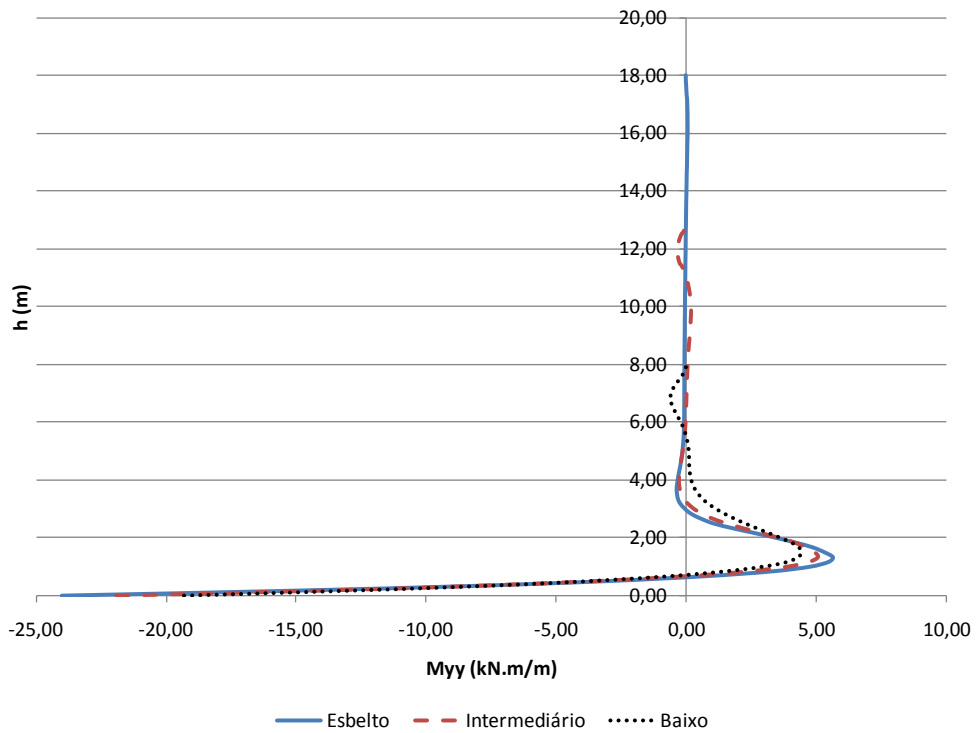


Figura 30: momento vertical (M_{yy})

A distribuição dos momentos horizontais e verticais apresenta um comportamento semelhante quando comparamos os valores obtidos entre as três relações de forma, verificando-se uma redução dos momentos do silo esbelto ao silo baixo, redução mais significativa quando analisamos os momentos horizontais. Analisando os gráficos, nota-se que o processo de esvaziamento do silo apresenta um pico negativo no engaste da estrutura e um pico positivo de menor intensidade na faixa entre 1,50 e 1,80 metros de altura, sendo que, no restante do comprimento da parede, os momentos são muito pequenos.

É importante ressaltar que a ordem de grandeza apresentada nos momentos apenas é considerada significativa para o caso dos momentos verticais, mais especificamente o momento vertical gerado na base da estrutura. A partir dos dois metros de altura, a redução é substancial, podendo estes valores ser desprezados para efeitos de dimensionamento.

7.3 COMBINAÇÃO 2: 0,9 PP + 1,4 Vento

No caso da combinação 2, que leva em conta as pressões resultantes das ações do vento na estrutura, o nível das solicitações é diretamente proporcional à altura da estrutura, sendo assim serão apresentadas apenas as impostas ao silo esbelto, conforme quadro 18.

h(m)	Nxx (kN/m)			Mxx (kN.m/m)			Myy (kN.m/m)		
	Barlavento	Sotavento	Perpendicular	Barlavento	Sotavento	Perpendicular	Barlavento	Sotavento	Perpendicular
18,00	-12,30	-1,92	6,17	-6,83	-5,35	6,34	0,05	0,04	-0,05
17,00	1,81	8,41	-6,32	-6,71	-5,22	6,20	-0,95	-0,71	0,86
16,00	-0,01	6,84	-4,57	-6,41	-4,93	5,92	-1,31	-0,97	1,18
15,00	-1,58	5,50	-3,09	-6,05	-4,57	5,58	-1,26	-0,92	1,14
14,00	-2,08	4,99	-2,55	-5,68	-4,21	5,23	-1,17	-0,84	1,06
13,00	-2,38	4,63	-2,19	-5,30	-3,84	4,87	-1,10	-0,77	0,99
12,00	-2,70	4,24	-1,80	-4,92	-3,47	4,51	-1,02	-0,70	0,92
10,00	-3,41	3,43	-0,95	-4,14	-2,71	3,76	-0,85	-0,56	0,78
8,00	-4,19	2,63	-0,03	-3,31	-1,96	2,99	-0,66	-0,40	0,61
6,00	-5,06	1,90	0,97	-2,42	-1,26	2,18	-0,43	-0,23	0,42
4,00	-6,21	1,52	2,26	-1,51	-0,67	1,36	-0,15	-0,08	0,19
3,50	-6,59	1,71	2,82	-1,29	-0,54	1,16	-0,09	-0,04	0,14
3,00	-6,87	2,05	3,46	-1,08	-0,43	0,97	-0,05	0,03	0,11
2,50	-6,68	2,27	3,86	-0,88	-0,32	0,79	-0,04	0,14	0,14
2,00	-5,32	1,67	3,12	-0,68	-0,20	0,63	-0,02	0,32	0,21
1,50	-1,88	-0,97	-0,18	-0,46	-0,09	0,46	0,09	0,51	0,26
1,00	4,05	-6,98	-7,65	-0,17	-0,01	0,24	0,56	0,51	0,02
0,50	10,20	-15,80	-18,45	0,24	-0,06	-0,12	1,80	-0,07	-1,05
0,00	7,79	-22,20	-24,80	0,86	-0,37	-0,78	4,25	-1,82	-3,90

Quadro 18: solicitações resultantes da combinação 2 no silo esbelto

Entretanto, quando levamos em conta os resultados da combinação 1, pode-se afirmar que, no caso de um silo em alvenaria de blocos cerâmicos, as solicitações provenientes das ações do vento não serão preponderantes para o dimensionamento da estrutura, que será realizado apenas levando-se em conta as ações provenientes dos materiais armazenados.

Da mesma maneira, ao se somar as ações do vento à combinação 1, comprova-se, através das figuras 31 a 33, que ao não se considerar estes efeitos de maneira a simplificar a extração das solicitações do modelo, os valores não apresentam variação significativa a ponto de se rever esta decisão.

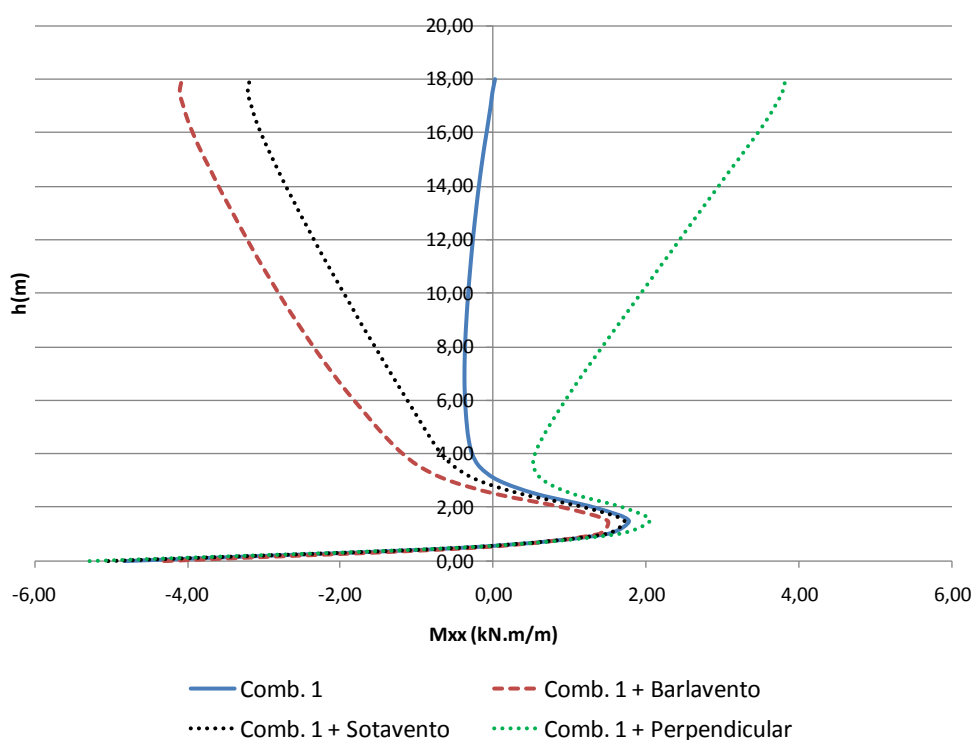


Figura 31: combinação 1 + vento (M_{xx})

À primeira vista, quando observamos o gráfico referente ao momento horizontal (M_{xx}), percebe-se a influência do vento sobre esta solicitação principalmente nas proximidades do topo do silo, região que, quando consideradas apenas as ações dos materiais armazenados, não apresentava momentos horizontais significativos. Entretanto, quando analisamos a intensidade destes momentos, nota-se que estes ainda continuam irrelevantes de forma a não justificar a necessidade da adição das ações do vento à combinação 1.

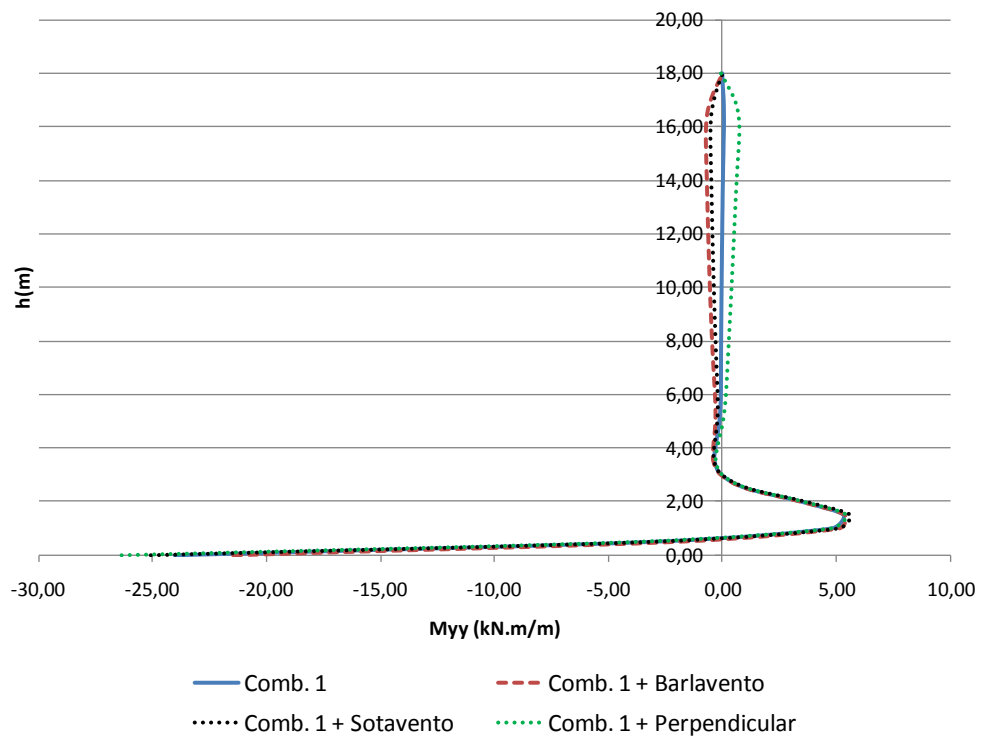


Figura 32: combinação 1 + vento (Myy)

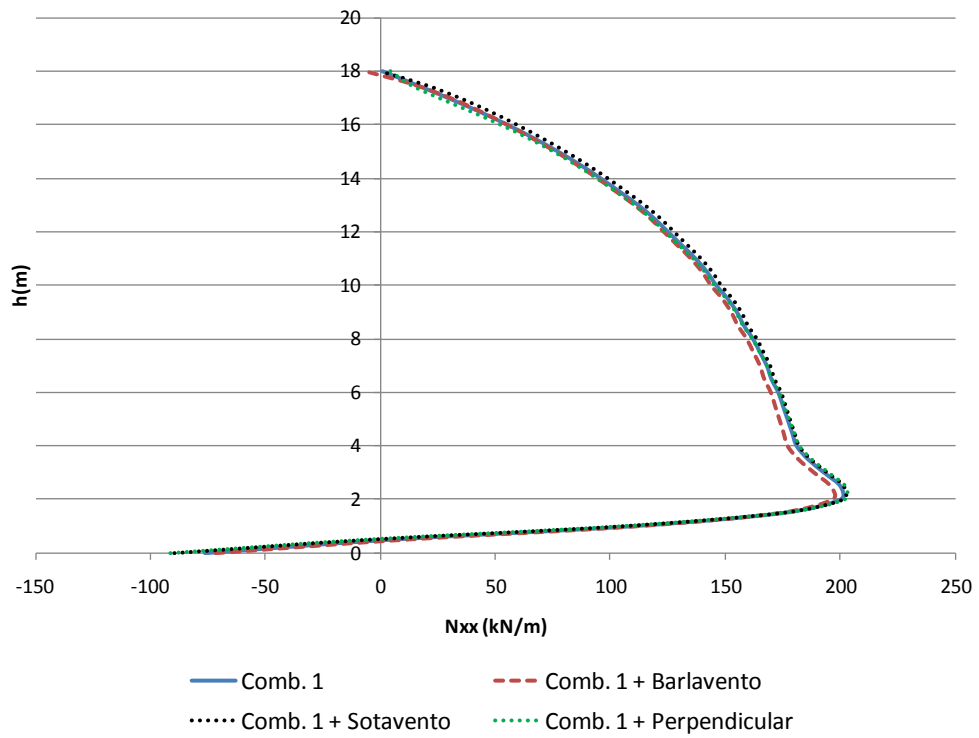


Figura 33: combinação 1 + vento (Nxx)

8 DIMENSIONAMENTO DAS PAREDES

O dimensionamento das paredes de alvenaria será realizado de acordo com as recomendações da NBR 15812-1/2010, conforme apresentado no capítulo 5.

8.1 DIMENSIONAMENTO DOS TRAVAMENTOS HORIZONTAIS

Devido à grande esbeltez das paredes dos silos, faz-se necessária a adoção de elementos cuja função é travar a estrutura reduzindo sua altura efetiva. É importante ressaltar que a Norma brasileira não prevê a determinação do índice de esbeltez para o caso de paredes circulares como ocorre em silos, apenas contemplando a situação de paredes planas. Conseqüentemente acaba-se dimensionando uma parede com o uso de um índice de esbeltez maior do que se teria ao considerar a estrutura inteira.

Como a resistência a esforços laterais de uma parede de alvenaria é muito baixa, deverão ser executadas cintas, compostas por blocos canaletado grauteado e armados em todo o perímetro do silo, que garantirão a resistência aos esforços horizontais, essencialmente esforços de tração, resultantes do empuxo do material armazenado. Visto que a Norma brasileira orienta o projetista a desconsiderar qualquer resistência à tração dos elementos de alvenaria, toda a tração resultante nestes elementos deverá ser absorvida pela armadura presente nestas cintas.

A determinação dos esforços laterais atuantes em cada elemento enrijecedor foi feita considerando-se, no diagrama dos esforços horizontais, a área de influência correspondente a cada um destes elementos. A distribuição das cintas e respectivas áreas de influência são mostradas na figura 34.

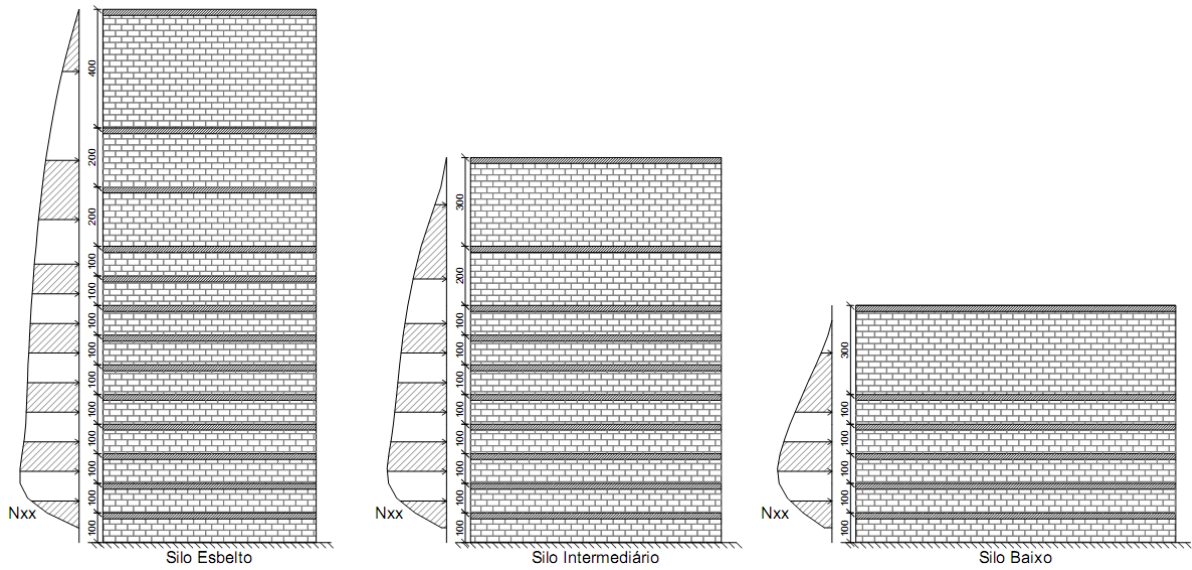


Figura 34: distribuição das cintas nos silos

A distribuição das cintas foi realizada de forma que se obtivessem áreas de aço semelhantes para cada uma delas, facilitando o trabalho do construtor. A armadura necessária para cada um destes elementos, conforme apresentadas nos quadros 19 a 21, foi determinada através da expressão 51:

$$\text{Área de aço} = \frac{N_x}{f_s} \quad (\text{expressão 51})$$

Onde:

N_x é a tensão normal resultante na cinta;

$f_s = 0,5f_{yd} = 21,74 \text{ kN/cm}^2$ é a tensão na armadura.

h (m)	Tração (kN)	Área de aço (cm ²)
18,00	57,50	2,65
14,00	256,35	11,79
12,00	249,54	11,48
10,00	215,85	9,93
9,00	154,57	7,11
8,00	161,57	7,43
7,00	167,57	7,71
6,00	172,57	7,94
5,00	176,71	8,13
4,00	181,57	8,35
3,00	192,86	8,87
2,00	200,29	9,21
1,00	200,00	9,20

Quadro 19: dimensionamento das cintas para o silo esbelto

h (m)	Tração (kN)	Área de aço (cm ²)
13,00	20,83	0,96
10,00	193,26	8,89
8,00	189,11	8,70
7,00	146,34	6,73
6,00	158,52	7,29
5,00	168,87	7,77
4,00	180,58	8,31
3,00	195,38	8,99
2,00	198,73	9,14
1,00	196,69	9,05

Quadro 20: dimensionamento das cintas para o silo intermediário

h (m)	Tração (kN)	Área de aço (cm ²)
8,00	15,70	0,72
5,00	115,80	5,33
4,00	140,96	6,48
3,00	174,51	8,03
2,00	181,35	8,34
1,00	179,00	8,23

Quadro 21: dimensionamento das cintas para o silo baixo

8.2 DIMENSIONAMENTO DAS PAREDES

Nos próximos itens serão apresentados os passos executados para o dimensionamento das paredes de alvenaria de acordo com a NBR 15812-1/2010.

8.2.1 Esquema da seção a ser dimensionada

Para a realização do dimensionamento, serão considerados trechos de 1m de parede com altura igual à distância entre duas cintas de enrijecimento, conforme apresentado na figura 35.

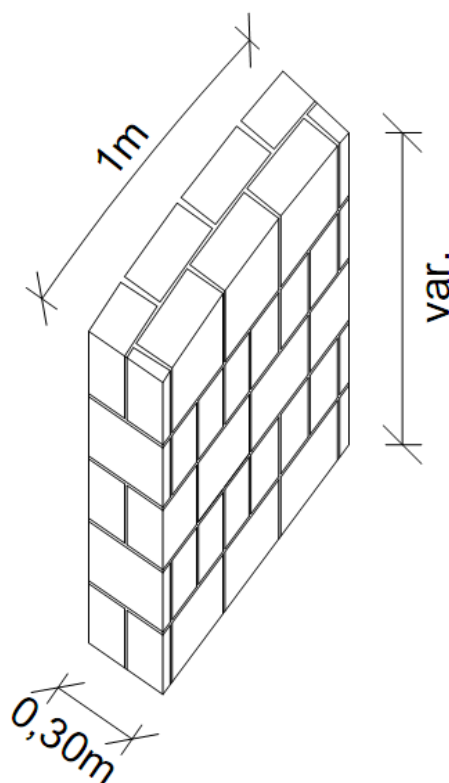


Figura 35: seção de parede para dimensionamento

8.2.2 Determinação das seções críticas

A combinação das ações provenientes do atrito lateral do grão com a parede, do empuxo lateral deste mesmo material armazenado e do peso próprio da estrutura, configuram uma

típica situação de flexo-compressão nas paredes de um silo. Da mesma maneira, devido aos esforços laterais atuantes, a resistência aos esforços cisalhantes deverá ser verificada.

Para o caso de um silo para armazenamento de grãos, os valores máximos dos esforços, tanto para o caso da flexo-compressão, como para o cisalhamento, ocorrem na base da estrutura, conforme valores apresentados anteriormente nos quadros de solicitações.

8.2.3 Dimensionamento das seções

Neste item será apresentado o dimensionamento das paredes de alvenaria para cada relação de forma. Serão apresentados abaixo apenas os resultados obtidos, referindo ao Apêndice A deste trabalho para memória de cálculo detalhada.

Para os três casos estudados, o resultado do dimensionamento apresentou a necessidade da aplicação da taxa mínima de armadura na seção, de forma que não poderá ser realizado nenhum tipo de escalonamento de armaduras. Da mesma maneira, optou-se por não utilizarem-se blocos de menor resistência conforme a parede fosse menos solicitada verticalmente, visto que o objetivo deste dimensionamento é apresentar as diferenças mais significativas entre cada relação de forma.

Para garantir a segurança e as melhores condições de uso durante a vida útil da estrutura, o dimensionamento deve garantir que os valores resistentes superem as solicitações de cálculo. Desta forma, o dimensionamento de uma parede requer:

- a) verificação da esbeltez do elemento;
- b) cálculo do coeficiente de redução por esbeltez;
- c) cálculo da tensão de cálculo dos tipos de solicitação a que a seção está sendo imposta, neste caso, cisalhamento e flexo-compressão;
- d) aplicação da equação de resistência a verificar em função da solicitação a resistir e do elemento estrutural;
- e) definição da resistência característica necessária.

As solicitações utilizadas para o dimensionamento das paredes dos silos para as três relações de forma adotadas estão resumidas no quadro 22.

	Silo Esbelto	Silo Intermediário	Silo Baixo
N_d	375,0 kN	236,0 kN	116,0 kN
M_d	2400,0 kN.cm	2190,0 kN.cm	1930,0 kN.cm
V_d	55,2 kN	47,3 kN	41,1 kN

Quadro 22: solicitações utilizadas para o dimensionamento

No quadro 23, é apresentado um comparativo entre os resultados obtidos no dimensionamento das paredes, tanto à flexo-compressão como ao cisalhamento, para as três relações de forma estudadas.

	Silo Esbelto	Silo Intermediário	Silo Baixo
Resistência à compressão (f_d)	2,18 MPa	2,06 MPa	1,13
Taxa de armadura longitudinal	0,10%	0,10%	0,10%
Área de aço por metro de parede	3 cm ² /m	3 cm ² /m	3 cm ² /m

Quadro 23: quadro resumo do dimensionamento

Apesar da aparente influência da relação de forma na determinação da resistência à compressão da parede de alvenaria, não se pode afirmar com certeza se esta variação é resultante da variação da esbeltez do silo ou simplesmente da altura deste. Esta afirmação pode ser justificada pelo fato de, nos três casos estudados, os momentos verticais (M_{yy}) apresentaram valores semelhantes enquanto a solicitação vertical (N_{yy}), que sofre grande influência da altura da estrutura, apresentou uma variação considerável.

Quanto à área de aço necessária por metro de parede, como já era esperado após os baixos momentos resultantes dos carregamentos, manteve-se igual à taxa mínima de 0,1% da área da seção transversal para os três casos estudados.

9 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos na análise estrutural, pode-se comprovar que a combinação preponderante e que determinará o dimensionamento da estrutura é aquela que considera os efeitos do material armazenado somado ao peso próprio da estrutura. Além de que foi possível comprovar a expectativa de que o vento não produziria solicitações relevantes atuando sobre a estrutura vazia, comportamento que se repete quando o silo está carregado.

Quando foram comparadas as solicitações resultantes da análise para cada relação de forma, percebeu-se que o comportamento estrutural do silo não varia significativamente conforme variamos sua esbeltez, quando analisamos a solicitação horizontal (N_{xx}), e os momentos horizontais (M_{xx}) e verticais (M_{yy}). Entretanto para o caso da solicitação vertical (N_{yy}), houve um incremento considerável quando partimos do silo mais baixo ao mais alto. Neste caso, com as informações obtidas, não é possível afirmar com certeza se este comportamento é decorrente da alteração da relação de forma ou do aumento da altura do silo.

Partindo das solicitações obtidas, foi realizado o dimensionamento das paredes de alvenaria para cada silo estudado. A constatação de que a taxa de armadura se manteve a mínima exigida pela Norma pode ser justificada pelo fato de os momentos atuantes serem relativamente pequenos, sendo a compressão vertical o fator preponderante no dimensionamento dos elementos de alvenaria. Logo, o silo esbelto exigiu elementos bem mais resistentes do que os elementos dimensionados para o silo baixo.

Admitindo que as três relações de forma apresentam uma solução estrutural satisfatória, a questão construtiva adquire relevância na escolha de qual relação de forma é mais adequada. De fato, ao contrário das paredes retas, onde os aspectos de modulação não afetam sensivelmente a espessura de junta, no caso de um silo, esta varia transversalmente em função do raio e ainda é mais difícil elevar uma parede circular com elementos prismáticos.

No momento em que o silo baixo apresenta a necessidade de elementos em alvenaria menos resistentes, bem como maior diâmetro e, conseqüentemente, menores problemas construtivos e melhor funcionamento do sistema alvenaria estrutural, pode-se considerar mais adequada esta relação de forma para o caso específico estudado.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE JUNIOR, L. J. **A ação do vento em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro**. 2002. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- _____. **NBR 15812-1**: alvenaria estrutural: blocos cerâmicos – Parte 1: projetos. Rio de Janeiro, 2010.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Companhia Nacional de Abastecimento. **Evolução da capacidade estática dos armazéns**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/armazenagem/serie_historica.xls>. Acesso em: 13 abr. 2010.
- CURTIN, W. G.; SHAW, G.; BECK, J. K.; BRAY, W. A.; EASTERBROOK, D. **Structural masonry designers' manual**. 3rd ed.. Oxford: Blackwell Science, 2006.
- TNO DIANA. **User's Manual release 9.4**. Delft, The Netherlands, 2009.
- FONTES, R. **Análise de casca de alvenaria cerâmica armada: tipo parabolóide hiperbólico**. 2005. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1991-4**: Eurocode 1 – Actions on Structures – Part 4: Silos and Tanks. Brussels, 2006.
- FREITAS, E. G. A. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano**. 2001. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- NASCIMENTO, F. C. **A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: o parâmetro K**. 2008. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- PALMA, G. **Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d \geq 1,5$)**. 2005. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- SAFARIAN, S. S.; HARRIS, E. C. **Design and construction of silos and bunkers**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1985.
- SCALABRIN, L. A. **Dimensionamento de silos metálicos para armazenagem de grãos**. 2008. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

APÊNDICE A – Memória de cálculo do dimensionamento das paredes

Dimensionamento das seções de acordo com a NBR 15812-1/2010

Silo Esbelto

$M_d = 2400 \text{ kN.cm}$ – momento fletor de cálculo

$N_d = 375 \text{ kN}$ – força normal de cálculo

$V_d = 55,2 \text{ kN}$ – força cortante de cálculo

$h = 30 \text{ cm}$ – altura da seção no plano de flexão

$b = 100 \text{ cm}$ – largura da seção

$\gamma_m = 2$ – coeficiente de ponderação da resistência

$h_{ef} = 100 \text{ cm}$ – altura efetiva

$t_{ef} = 30 \text{ cm}$ – espessura efetiva

Flexo-Compressão

$e_x = M_d / N_d = 6,4 \text{ cm} < 0,5h$ – excentricidade resultante no plano de flexão

$N_{rd} = f_d \cdot b \cdot (h - 2 \cdot e_x)$ – se N_d não exceder N_{rd} apenas é necessário o uso de armadura mínima

Adotando-se $N_{rd} = N_d$

$f_d = 0,218 \text{ kN/cm}^2 = 2,18 \text{ MPa}$ – resistência à compressão característica da parede

$\rho = 0,1\%$ (taxa de armadura mínima)

Área de armadura total = $\rho \cdot b \cdot h = 3 \text{ cm}^2/\text{m}$

Compressão simples

$\lambda = h_{ef} / t_{ef} = 3,33$ – índice de esbeltez

$R = 1 - (\lambda/40)^3 = 0,9994$ – coeficiente redutor devido à esbeltez da parede

$N_{rd} = f_d \cdot A \cdot R = 653,62 \text{ kN} > N_d$

Cisalhamento

$f_{vk} = (0,35 + 17,5\rho) \text{ MPa} = 0,3675 \text{ MPa}$ – resistência característica ao cisalhamento

$f_{vd} = f_{vk} / \gamma_m = 0,184 \text{ MPa}$ – resistência de cálculo ao cisalhamento

$\tau_{vd} = V_d / (b \cdot h) = 0,184 \text{ MPa}$ – tensão de cisalhamento de cálculo

$f_{vd} \geq \tau_{vd}$

Silo Intermediário

$M_d = 2190 \text{ kN.cm}$ – momento fletor de cálculo

$N_d = 236 \text{ kN}$ – força normal de cálculo

$V_d = 47,3 \text{ kN}$ – força cortante de cálculo

$h = 30 \text{ cm}$ – altura da seção no plano de flexão

$b = 100 \text{ cm}$ – largura da seção

$\gamma_m = 2$ – coeficiente de ponderação da resistência

$h_{ef} = 100 \text{ cm}$ – altura efetiva

$t_{ef} = 30 \text{ cm}$ – espessura efetiva

Flexo-Compressão

$e_x = M_d / N_d = 9,28 \text{ cm} < 0,5h$ – excentricidade resultante no plano de flexão

$N_{rd} = f_d \cdot b \cdot (h - 2 \cdot e_x)$ – se N_d não exceder N_{rd} apenas é necessário o uso de armadura mínima

Adotando-se $N_{rd} = N_d$

$f_d = 0,206 \text{ kN/cm}^2 = 2,06 \text{ MPa}$ – resistência à compressão característica da parede

$\rho = 0,1\%$ (taxa de armadura mínima)

Área de armadura total = $\rho \cdot b \cdot h = 3 \text{ cm}^2/\text{m}$

Compressão simples

$\lambda = h_{ef} / t_{ef} = 3,33$ – índice de esbeltez

$R = 1 - (\lambda/40)^3 = 0,9994$ – coeficiente redutor devido à esbeltez da parede

$N_{rd} = f_d \cdot A \cdot R = 617,64 \text{ kN} > N_d$

Cisalhamento

$f_{vk} = (0,35 + 17,5\rho) \text{ MPa} = 0,3675 \text{ MPa}$ – resistência característica ao cisalhamento

$f_{vd} = f_{vk} / \gamma_m = 0,184 \text{ MPa}$ – resistência de cálculo ao cisalhamento

$\tau_{vd} = V_d / (b \cdot h) = 0,157 \text{ MPa}$ – tensão de cisalhamento de cálculo

$f_{vd} \geq \tau_{vd}$

Silo Baixo

$M_d = 1930 \text{ kN.cm}$ – momento fletor de cálculo

$N_d = 116 \text{ kN}$ – força normal de cálculo

$V_d = 41,1 \text{ kN}$ – força cortante de cálculo

$h = 30 \text{ cm}$ – altura da seção no plano de flexão

$b = 100 \text{ cm}$ – largura da seção

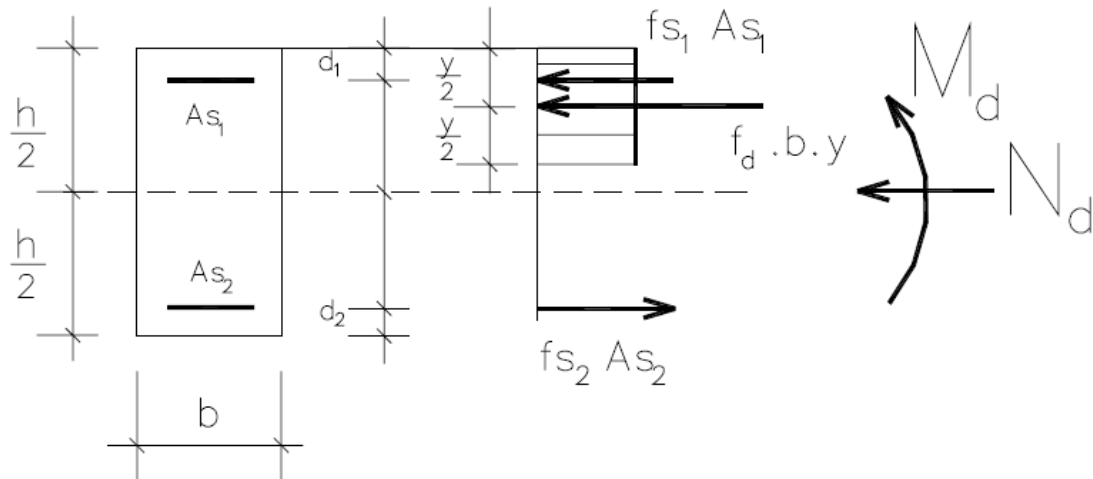
$\gamma_m = 2$ – coeficiente de ponderação da resistência

$h_{ef} = 100 \text{ cm}$ – altura efetiva

$t_{ef} = 30 \text{ cm}$ – espessura efetiva

Flexo-Compressão

$e_x = M_d / N_d = 16,64 \text{ cm} > 0,5h$ – excentricidade resultante no plano de flexão



$$N_{rd} = f_d \cdot b \cdot y + f_{s1} \cdot A_{s1} - f_{s2} \cdot A_{s2}$$

$$M_{rd} = 0,5 \cdot f_d \cdot b \cdot y \cdot (h - y) + f_{s1} \cdot A_{s1} \cdot (0,5h - d_1) + f_{s2} \cdot A_{s2} \cdot (0,5h - d_2)$$

Adotando

$$d_1 = d_2 = 4 \text{ cm}$$

$$y = 0,8x = 12 \text{ cm}$$

$$A_{s1} = A_{s2} = 1,5 \text{ cm}^2$$

$$f_{s1} = f_{s2} = 0,5 f_{yd} = 21,74 \text{ kN/cm}^2$$

Para $f_d = 0,113 \text{ kN/cm}^2 = 1,13 \text{ MPa}$ – resistência à compressão característica da parede

$$N_{rd} = 135,6 \text{ kN} > N_d$$

$$M_{rd} = 1938 \text{ kN.cm} > M_d$$

$$\text{Área de armadura total} = A_{s1} + A_{s2} = 3 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$\rho = 0,1\%$ (taxa de armadura mínima)

Compressão simples

$\lambda = h_{ef} / t_{ef} = 3,33$ – índice de esbeltez

$R = 1 - (\lambda/40)^3 = 0,9994$ – coeficiente redutor devido à esbeltez da parede

$N_{rd} = f_d \cdot A \cdot R = 338,80 \text{ kN} > N_d$

Cisalhamento

$f_{vk} = (0,35 + 17,5\rho) \text{ MPa} = 0,3675 \text{ MPa}$ – resistência característica ao cisalhamento

$f_{vd} = f_{vk} / \gamma_m = 0,184 \text{ MPa}$ – resistência de cálculo ao cisalhamento

$\tau_{vd} = V_d / (b \cdot h) = 0,137 \text{ MPa}$ – tensão de cisalhamento de cálculo

$f_{vd} \geq \tau_{vd}$