



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



ANÁLISE DE PRESSÕES EM PAREDES LISAS DE SILOS CILÍNDRICOS VERTICAIS

Ariadne Soares Meira

Campina Grande, PB.

2019

ANÁLISE DE PRESSÕES EM PAREDES LISAS DE SILOS CILINDRICOS VERTICAIS

Ariadne Soares Meira

Orientador: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção da titulação como Doutor (a) em Engenharia Agrícola, na área de Construções Rurais e Ambiente.

Campina Grande, PB.

2019

M514a Meira, Ariadne Soares.
Análise de pressões em paredes lisas de silos cilíndricos verticais /
Ariadne Soares Meira. – Campina Grande, 2019.
97 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal
de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.
"Orientação: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento".
Referências.

1. Silos. 2. Construções Rurais e Ambiência. 3. Silo Vertical –
Pressões. 4. Grãos – Tempo de Consolidação. I. Nascimento, José
Wallace Barbosa do. II. Título.

CDU 631.24(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE

ARIADNE SOARES MEIRA

“ANÁLISE DE PRESSÕES EM PAREDES LISAS DE SILOS CILÍNDRICOS
VERTICAIS”

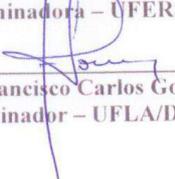
APROVADO(A): 30 de agosto de 2019

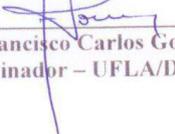
BANCA EXAMINADORA


Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento
Orientador – UAEA/CTRN/UFPA


Dra. Cássia Medonça dos Anjos
Examinadora – UNIFACISA/PB


Dra. Marcilene Vieira da Nóbrega
Examinadora – UFERSA


Dr. Francisco Carlos Gomes
Examinador – UFLA/DEA


Dr. José Pinheiro Lopes Neto
Examinador – UAEA/CTRN/UFPA

Á minha mãe Alda Lucia, minha
tia/mãe Aldenize e a minha avó Alice;
Ao meu avô Adauto (*in memorian*); À
minhas irmãs Wadaflan e Avery e
sobrinhas Yoshabell e Alícia; Aos
meus tios Adalberto, Adauto e
Agnaldo e a Guilherme, razão da
minha vida.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Á Deus, que me sustentou, me dando paciência, sabedoria e discernimento;

Ao meu orientador José Wallace que acreditou no meu potencial para desenvolver um trabalho de tal significância acadêmica;

Á Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela bolsa de estudos concedida;

Ao Laboratório de Beneficiamento de Sementes na pessoa do professor Dr. Mozaniel Gomes da Silva, pela disponibilização do espaço físico e elementos necessários para execução dos ensaios;

Ao Laboratório de Construções Rurais e Ambiente, pela execução dos ensaios de propriedades físicas e de fluxo dos produtos, assim como toda a bagagem intelectual empregada a mim;

Á minha família, que me suportou nos piores e melhores momentos dessa caminhada. Em especial ao meu avô Aduino (*in memoriam*) o qual tenho certeza, se orgulharia muito do meu esforço;

Ao meu querido filho Guilherme, que mesmo sem saber, me motivou a chegar até aqui;

Aos meus amigos (as) de curso, os quais me auxiliaram em tantas dificuldades e que não me deixaram abater quando tudo parecia dar errado;

Aos funcionários do Laboratório de Construções Rurais e Ambiente, Joselito, Edil, Thiago Lira e Magno (Bel), pelo auxílio durante a jornada;

Aos professores da Unidade Acadêmica que sempre serviram de incentivo e inspiração;

E aos que direta e indiretamente colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

Meira, Ariadne Soares. Análise de pressões em paredes lisas de silos cilíndricos verticais. 2019. 98f. Tese (Doutorado em Construções Rurais e Ambiente) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

RESUMO: O estudo das pressões que o produto armazenado exerce nas paredes do silo é um fator determinante no conhecimento das causas das falhas, rupturas e tombamentos de silos verticais. Sendo assim, teve-se com o presente trabalho o objetivo de determinar, empírica e experimentalmente, as pressões ao longo das paredes do silo vertical metálico exercidas pelo produto armazenado e a influência da relação H/D na representação destas pressões. Para a determinação das pressões horizontais e de atrito, foram utilizados dispositivos compostos por pares de células de carga, fixados a seções quadradas do silo de parede lisa que tinha por dimensões 2,5 m de altura de corpo e 0,64 m de diâmetro interno e tremonha com 0,51 m de altura e inclinação de aproximadamente 60° com a horizontal, confeccionados em aço liso com 1 mm de espessura. Os dispositivos com as células de carga foram fixados a seção da parede e a uma haste vertical em aço, permitindo assim a aquisição da força exercida pelos grãos para o cálculo das pressões laterais ao longo da estrutura da parede. Os ensaios de carregamento e descarregamento do milho foram em quintuplicata, sendo adotados três tempos de consolidação sendo estes de 6, 12 e 24 horas, além dos ensaios instantâneos. As pressões determinadas experimentalmente foram comparadas aos valores encontrados a partir das equações contidas nas normas AS 3774 (1990) e BS EN 1991/4 (2006). Utilizaram-se ainda quatro relações H/D para o cálculo das pressões onde cada altura foi determinada pela proporção da relação em 1, 2, 3 e 4. Por resultados, foi evidenciado que os dados experimentais de pressão horizontal durante o carregamento foram até 70% inferiores aos normatizados, tendo em vista que as normas majoram os valores devido a utilização de coeficientes de segurança e, embora realizado os cálculos com a subtração deste coeficiente, as pressões de carregamento experimentais continuaram inferiores às normatizadas. Já as pressões de atrito experimentais durante o descarregamento do milho foram aproximadamente 400% quando comparadas ao carregamento, porém, também inferiores aos valores normatizados. Na relação H/D, quanto menor foi esta relação menores foram as pressões horizontais experimentais, assim como mais distantes dos valores normatizados estes valores experimentais se apresentaram.

PALAVRAS-CHAVE: Silo vertical. Pressões. Grãos. Tempo de consolidação.

Meira, Ariadne Soares. Analysis of pressures in smoothwall of vertical cylindrical silos. 2019. 98f. Tese (Doutorado em Construções Rurais e Ambiente) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

ABSTRACT: The study of the pressures that the stored product exerts on the silo walls is a determinant factor in the knowledge of the causes of failures, ruptures and vertical silo tipping. Thus, the objective of this work was to determine, empirically and experimentally, the pressures along the walls of the vertical metal silo exercised by the stored product and the influence of the H/D ratio in the representation of these pressures. For the determination of horizontal pressures and friction, devices consisting of pairs of load cells were used, fixed to square sections of the flat wall silo that had dimensions 2.5 m body height and 0.64 m of internal diameter and hopper with 0.51 m of height and inclination of approximately 60 ° with the horizontal, made of flat steel with 1 mm thickness. The devices with the load cells were fixed the section of the wall and a vertical rod in steel, thus allowing the acquisition of the strength exercised links grains for the calculation of the lateral pressures along the structure of the wall. The corn loading and unloading assays were in quintuplicata, and three consolidation times were adopted, being those of 6, 12 and 24 hours, in addition to the instantaneous assays. The pressures determined experimentally were compared to the values found from the equations contained in the standards AS 3774 (1990) and BS EN 1991/4 (2006). Four H/D ratios were also used to calculate the pressures where each height was determined by the ratio of 1, 2, 3 and 4. By results, it was evidenced that the experimental data of horizontal pressure during loading were up to 70% lower than the normalized, considering that the norms increase the values due to the use of safety coefficients and, although the calculations were performed with the subtraction of this coefficient, the experimental loading pressures remained inferior to the normalized ones. The experimental friction pressures during the unloading of maize were approximately 40% when compared to the loading, but also inferior to the normalized values. In the H/D ratio, the smaller this ratio was the horizontal experimental pressures, as well as more distant from the normalized values these experimental values were presented.

KEYWORDS: Vertical Silo. Pressures. Grain. Consolidation time.

Lista de Figuras

Figura 1 - Círculos de Mohr	26
Figura 2 - Padrão de Fluxo - 1) Fluxo em Massa; 2) Fluxo em Funil	30
Figura 3 - (a) Arco Coesivo e (b) Arco Mecânico.....	31
Figura 4 - Representação da distribuição das pressões no corpo do silo e na tremonha	35
Figura 5 - Distribuição das pressões no silo armazenador	36
Figura 6 - Pressões na tremonha - BS EN 1991/4 (2006)	40
Figura 7 - Representação das pressões durante o carregamento e descarregamento.....	42
Figura 8 - Ábaco para determinação do fator K da tremonha	45
Figura 9 – a) Vista dos cortes para inserção das células de carga no corpo do silo protótipo; b) Distâncias entre cortes.....	49
Figura 10 - Relações H/D estudadas.....	50
Figura 11 - Instrumentação do silo	51
Figura 12 - Células de carga – (a) Vista frontal; (b) Vista superior	52
Figura 13 - Disposição das hastes de fixação das células.....	53
Figura 14 – Elevador de canecas	54
Figura 15 - Aparelho de cisalhamento utilizando os anéis de Jenike(1964)	55

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classificação dos silos segundo as normas BS EN 1991/4 (2006) e AS 3774 (1990).....	24
Tabela 2 - Propriedades de Fluxo normatizadas.....	27
Tabela 3 - Valores das propriedades de fluxo para cálculo de pressões.....	28
Tabela 4 – Determinação do fator K segundo a norma AS 3774 (1990) para determinação das pressões em silos.....	45
Tabela 5 - Cargas do pré <i>shear</i> e <i>shear</i>	56
Tabela 6 - Propriedades de fluxo de grão de milho em função do tempo	57
Tabela 7 - Pressões horizontais de carregamento e descarregamento e desvio padrão..	65
Tabela 8 - Comparação numérica entre valores experimentais e normatizados (Carregamento sem coeficiente de segurança)	89
Tabela 9 - Comparação numérica entre valores experimentais e normatizados (Descarregamento sem coeficiente de segurança).....	92

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Pressões por tempo de consolidação (Carregamento - H/D igual a 4).....	58
Gráfico 2 - Pressões por tempo de consolidação (Descarregamento - H/D igual a 4) ...	59
Gráfico 3 - Pressões por tempo de consolidação (Carregamento - H/D igual a 3).....	60
Gráfico 4 - Pressões por tempo de consolidação (Descarregamento - H/D igual a 3) ...	60
Gráfico 5 - Pressões por tempo de consolidação (Carregamento – H/D igual a 2).....	61
Gráfico 6 - Pressões por tempo de consolidação (Descarregamento – H/D igual a 2)...	62
Gráfico 7 - Pressões por tempo de consolidação (Carregamento – H/D igual a 1).....	63
Gráfico 8 - Pressões por tempo de consolidação (Descarregamento – H/D igual a 1)...	63
Gráfico 9 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento - Instantâneo - H/D igual a 4).....	66
Gráfico 10 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento -6horas - H/D igual a 4).....	67
Gráfico 11 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento – 12horas - H/D igual a 4).....	68
Gráfico 12 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento – 24horas - H/D igual a 4).....	68
Gráfico 13 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento - Instantâneo - H/D igual a 3).....	69
Gráfico 14 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento – 6horas - H/D igual a 3).....	70
Gráfico 15 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento – 12horas - H/D igual a 3).....	70
Gráfico 16 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento – 24horas - H/D igual a 3).....	71
Gráfico 17 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento - Instantâneo - H/D igual a 2).....	71
Gráfico 18 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento - 6horas - H/D igual a 2).....	72
Gráfico 19 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento - 12horas - H/D igual a 2).....	72

Gráfico 20 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento - 24horas - H/D igual a 2).....	73
Gráfico 21 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento - Instantâneo - H/D igual a 1).....	73
Gráfico 22 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento - 6horas - H/D igual a 1).....	74
Gráfico 23 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento - 12horas - H/D igual a 1).....	74
Gráfico 24 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento - 24horas - H/D igual a 1).....	75
Gráfico 25 - Pressões de atrito com silo relação H/D igual a 4 (Carregamento)	77
Gráfico 26 - Pressões de atrito com silo relação H/D igual a 4 (Descarregamento)	77
Gráfico 27 - Pressões de atrito com silo relação H/D igual a 3 (Carregamento)	78
Gráfico 28 - Pressões de atrito com silo relação H/D igual a 3 (Descarregamento)	79
Gráfico 29 - Pressões de atrito com silo relação H/D igual a 2 (Carregamento)	79
Gráfico 30 - Pressões de atrito com silo relação H/D igual a 2 (Descarregamento)	80
Gráfico 31 - Pressões de atrito com silo relação H/D igual a 1 (Carregamento)	80
Gráfico 32 - Pressões de atrito com silo relação H/D igual a 1 (Descarregamento)	81
Gráfico 33 - Pressões horizontais de carregamento sem coeficiente de segurança (Instantâneo).....	90
Gráfico 34 - Pressões horizontais de carregamento sem coeficiente de segurança (6 Horas).	90
Gráfico 35 - Pressões horizontais de carregamento sem coeficiente de segurança (12 Horas).	91
Gráfico 36 - Pressões horizontais de carregamento sem coeficiente de segurança (24 Horas).	91
Gráfico 37 - Pressões horizontais de descarregamento sem coeficiente de segurança (Instantâneo).....	93
Gráfico 38 - Pressões horizontais de descarregamento sem coeficiente de segurança (6 Horas).	93
Gráfico 39 - Pressões horizontais de descarregamento sem coeficiente de segurança (12 Horas).	94

Gráfico 40 - Pressões horizontais de descarregamento sem coeficiente de segurança (24 Horas).	94
Gráfico 41 - Pressões de atrito no carregamento sem coeficiente de segurança (H/D = 4).....	95
Gráfico 42 - Pressões de atrito no descarregamento sem coeficiente de segurança (H/D = 4).....	95
Gráfico 43 - Pressões de atrito no carregamento sem coeficiente de segurança (H/D = 3).....	96
Gráfico 44 - Pressões de atrito no descarregamento sem coeficiente de segurança (H/D = 3).....	96
Gráfico 45 - Pressões de atrito no carregamento sem coeficiente de segurança (H/D = 2).....	97
Gráfico 46 - Pressões de atrito no descarregamento sem coeficiente de segurança (H/D = 2).....	97
Gráfico 47 - Pressões de atrito no carregamento sem coeficiente de segurança (H/D = 1).....	98
Gráfico 48 - Pressões de atrito no descarregamento sem coeficiente de segurança (H/D = 1).....	98

Lista de Símbolos

ϕ_i - ângulo de atrito interno ($^\circ$);

ϕ_e - efetivo ângulo de atrito interno ($^\circ$);

ϕ_w - ângulo de atrito com a parede ($^\circ$);

γ - peso específico consolidado (Kg/m^3);

μ' - coeficiente de atrito do produto com a parede;

μ - coeficiente do ângulo de atrito interno do produto;

D – Diâmetro efetivo do silo;

d - diâmetro das partículas (mm);

H – altura do silo;

Y - altura do topo da massa armazenada a zona de profundidade estipulada;

H/D – relação entre a altura do corpo do silo e o diâmetro efetivo deste;

K – relação entre as pressões horizontais e verticais atuantes no interior do silo;

P_{vf} – Pressão Vertical de carregamento;

P_{hf} – Pressão Horizontal de carregamento;

P_{wf} – Pressão de Atrito no carregamento;

P_{we} – Pressão de Atrito no descarregamento;

P_{he} – Pressão Horizontal de descarregamento;

P_{vft} - Pressão Vertical na tremonha;

P_{wft} - Pressão de Atrito na tremonha;

A – área do silo;

U – perímetro do silo;

g – gravidade.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Objetivos.....	19
1.1.1. Objetivo Geral.....	19
1.1.2. Objetivos Específicos.....	19
1.2. Estudos realizados na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1. Definição e Classificação	24
2.2. Propriedades Físicas e de Fluxo	25
2.3. Fluxo.....	29
2.4. Obstruções de fluxo.....	31
2.5. Pressões em silos verticais.....	32
2.5.1 Teoria de Janssen	34
2.5.2. Pressões no carregamento	36
2.5.3. Pressões na zona de transição	38
2.5.4. Pressões na tremonha.....	39
2.5.5. Pressões no descarregamento.....	41
2.5.6. Fator K	43
3. MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1. Local e Período dos Ensaios.....	47
3.2. Produto estudado	47
3.3. Análise Estatística	47
3.4. Silo protótipo	48
3.5. Procedimentos dos ensaios	50
3.5.1. Instrumentação do silo protótipo	50
3.5.2 Calibração das células de carga	51
3.5.3 Fixação das células de carga	51

3.6. Execução dos ensaios	53
3.7. Determinação das Propriedades Físicas e de Fluxo	55
3.8. Determinação das pressões no silo	56
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
4.1 Propriedades de fluxo	57
4.2 Pressões	58
4.3 Comparação por tempo de armazenamento	64
4.4 Comparação experimental <i>versus</i> normas estrangeiras	66
4.5 Pressões de Atrito	76
5. CONCLUSÕES.....	82
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
APÊNDICE A	88

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Conab (2019), a safra 2019 serão colhidos até o final do corrente ano cerca de 95 milhões de toneladas de grãos de milho, tendo em vista que em torno de 85% do milho produzido é comercializado no mercado interno, e sendo o Brasil o terceiro maior produtor deste grão no mundo, só perdendo para os Estados Unidos e a China.

Diante do exposto, o silo é uma estrutura viável para estocagem dos grãos produzidos e útil para distribuição dos grãos no mercado interno por preservar todas as características físicas e biológicas dos grãos. Contudo, na elaboração de projetos e construção de novos silos, fatores como a magnitude e distribuição das pressões durante a carga e a descarga ainda apresentam algumas incógnitas, uma vez que se trata de um fenômeno complexo em que as pressões dependem, entre outras coisas, da maneira como o produto armazenado flui, da concentricidade ou excentricidade do carregamento e descarregamento deste e das características dos produtos armazenados.

O objetivo principal de um projeto de silos é garantir que o produto armazenado descarregue em fluxo contínuo, assegurando ainda a estabilidade estrutural do silo que depende diretamente das pressões laterais que são exercidas pelo produto armazenado.

Assim, na elaboração do projeto de silos, o estudo das propriedades de fluxo dos produtos a serem armazenados partem dos princípios estudados em mecânica do contínuo, sabendo-se que esta estuda a física dos sólidos que se deformam quando submetidos a uma força. Assim, compara-se o comportamento do contínuo aos grãos.

As propriedades físicas (teor de umidade e granulometria) e as propriedades de fluxo (ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito do produto com a parede, densidade em função da consolidação, função fluxo e fator fluxo), as quais influenciam diretamente o tipo de fluxo e as pressões que os produtos armazenados exercem sobre as paredes do silo. A geometria, a rugosidade da parede do corpo do silo e da tremonha, também são fatores influenciadores do tipo de fluxo e das ações do produto armazenado nas paredes do silo.

Na determinação das pressões internas ao silo, um parâmetro de grande importância é o fator K , que relaciona as pressões horizontais e verticais pressupondo a estabilidade estrutural. Este fator faz-se necessário na elaboração do projeto de silos

quando o atrito do produto armazenável com a parede desempenha um papel significativo na distribuição de tensões de sólidos granulares.

As recomendações das normas estrangeiras para a predição de pressões e fluxo de produtos armazenados, de um modo geral, são baseadas nas seguintes fontes: experimentais, nas quais as pressões e o fluxo são medidos e observados em silos reais ou em protótipos de silos, e em modelos teóricos ou simulados.

As normas AS (1990) e BS EN 1991/4 (2006) para cálculo de pressões em silos, estabelecem alguns parâmetros e características para os silos, tais como relação H/D e fator K , assim como a distribuição a partir da recomendação de equações empíricas, que utilizam algumas propriedades de fluxo das quais o ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito pertencem.

Embora diversos trabalhos estejam sendo realizados com o intuito de obter as pressões laterais que o produto exerce sobre a parede do silo armazenador, atualmente a adoção de modelos numéricos está sendo mais frequentes por se dizer que caracterizam melhor a distribuição das pressões, porém, ainda sendo de extrema necessidade a experimentação.

Assim, a hipótese do presente estudo é estabelecida sobre a associação direta com a relação H/D e a distribuição das pressões ao longo da parede do silo vertical, havendo acréscimo das pressões com o acréscimo do tempo de armazenamento do produto no interior do silo.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Analisar experimentalmente a distribuição das pressões ao longo do corpo e na tremonha do silo protótipo, comparando-as com as calculadas pelas normas AS 3774 (1996) e BS EN 1991/4 (2006), correlacionando a distribuição destas com o fator H/D.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Determinar as propriedades físicas e de fluxo dos grãos de milho em função do tempo;
- Determinar experimentalmente a distribuição de pressões no corpo do silo e na tremonha com descarregamento após 1, 6, 12 e 24 horas após o carregamento;
- Avaliar a influência na relação H/D na distribuição das pressões em três zonas ao longo do silo, seguindo a classificação de esbeltez descritas nas normas AS 3774 (1990) e BS EN 1991/4 (2006);
- Comparar as pressões experimentais com as pressões determinadas através de equações propostas nas normas AS 3774 (1990) e BS EN 1991/4 (2006).

1.2. Estudos realizados na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

O Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, dentro da área de Construções Rurais e Ambiente, possui uma linha de pesquisa a fim de comprovar as teorias existentes e contribuir com novas tecnologias na área de silos verticais. Nos últimos vinte anos, Dissertações e Teses que contemplam o tema foram apresentadas ao programa, tais como:

Barreto (1997) tendo por título de sua dissertação “*Determinação das propriedades físicas do colorau e dos grãos de urucum (Bixa orellana L.) para elaboração de projetos de pressões e fluxo em silos*”, utilizou seis materiais de composição de parede e dois produtos a serem armazenados com um tempo de consolidação de 12, 48 e 72 horas, concluindo que o teor de umidade dos produtos é diretamente proporcional ao decréscimo dos ângulos de atrito interno e efetivo ângulo de atrito e do ângulo de atrito do produto com a parede.

Bandeira (1997) confecciona um silo prismático em modelo reduzido confeccionado em acrílico, com conformação de parede em zigue zague e tremonha concêntrica, utiliza farelo de trigo e dois tipos de ração avícola para condução dos ensaios. Analisa que o teor de gordura influencia diretamente a vazão de descarga e que a relação H/D não exerce efeito sobre a vazão neste tipo de silo e recomenda em sua dissertação intitulada “*Análise de fluxo de ração e farelo de trigo em silos prismáticos industriais*”.

Com a dissertação intitulada “*Silo vertical de madeira para armazenamento de grãos de guaraná no estado do Amazonas*”, Alves (2000) trabalhou com silo em madeira, de seção quadrada a fim de determinar as pressões exercidas sobre este através da norma Din 1055 (1987) e pela Teoria de Janssen. Determinando as deflexões das paredes do silo, constata que um silo construído nos moldes propostos é bastante favorável por apresentar condições adequadas de fluxo para grãos de guaraná, tem instalação simples e prática e ter grande resistência desde seja instalado em local abrigado de intemperes.

Diniz (2001) com dissertação intitulada “*Análise de pressões em silo vertical de alvenaria de tijolos*”, constrói um silo de 3m de altura por 3m de diâmetro, em alvenaria, e com plano fundo, alimentado por rosca transportadora e armazenando areia

seca, utilizando células de pressão na base e na parede do silo, compara os dados experimentais com os normatizados pela Din 1055 (1987), AS 3774 (1990) e ACI 313 (1977), e encontra compatibilidade entre ambos os resultados, recomendando silos como o em estudo para pequenos produtores haja visto o baixo custo e desempenho satisfatório.

No trabalho de dissertação por título “*Análise de vazão e fluxo de ração avícola em silos prismáticos com descarga excêntrica*”, Nóbrega (2003) trabalhou com dois tipos de ração avícola e conclui que o tempo de armazenamento, a seção de descarga e o teor de gordura do produto influenciaram diretamente na consolidação da ração e na formação de arco coesivo.

Freire (2004) trabalhando com três teores de umidade para o feijão macassar, e seis materiais de parede, em sua dissertação “*Propriedades de fluxo do feijão macassar (Vigna unguiculata (L.) Walp.) para o dimensionamento de silos*”, compara os dados experimentais com os vigentes nas normas Din 1055 (1987), AS 3774 (1990) e ACI 313 (1977) para a soja, atendendo para a inexistência de norma brasileira para tal determinação.

O trabalho de dissertação “*Análise estrutural de silos metálicos prismáticos*” de Lopes Neto (2005) utiliza um silo de seção retangular com paredes em zigue zague em aço e tremonha concêntrica, armazenando soja peletizada utiliza as teorias de Ravenet e Troitsky para determinação das tensões nas paredes do silo assim como as normas DIN 1055 (1987), ISO 11697 (1995), EUROCODE 1-4 (1995) e AS 3774 (1990). Enfatiza a ausência de alteração nas tensões durante os períodos de armazenamento dos produtos com as tensões dinâmicas se mostrando superiores as tensões estáticas durante todo o processo.

Batista (2009) utilizou areia, painço e farelo de milho em um silo cilíndrico confeccionado em acrílico com e sem revestimento de lixa para aumento do ângulo de atrito entre a parede e o produto armazenado em seu trabalho de dissertação “*Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulados em silos verticais*”. Evidencia que o aumento da rugosidade da parede não influencia na vazão de descarregamento e que o método Ralyeight para determinação da vazão é prontamente aceito para a situação em questão.

Medeiros (2012) em seu trabalho de dissertação “*Características de fluxo e vazão de descarga em silos verticais*” utilizando um silo metálico de parede rugosa em forma de semicírculo com fundo plano e tremonha cônica tendo a parte frontal fechada por

uma parede de vidro transparente. Armazenando milho e feijão em grão, milho triturado e farelo de soja, com descarregamento de 10 minutos, 48 e 120 horas e utiliza a equação de Beverloo (1961) para determinação da vazão mássica dos produtos, evidenciando a mudanças de vazão quando o produto é descarregado por tremonha cônica e vazão constante quando descarregamento por orifício no fundo plano.

Silva (2013) em sua dissertação intitulada “*Caracterização das propriedades de fluxo e mecânicas de grãos agrícolas*” utiliza produtos granulares como milho, painço e soja com teores de umidade de 10, 12 e 14% respectivamente, confecciona um equipamento específico chamado “Panela de Poisson” para determinação das propriedades mecânicas destes produtos, encontra uma relação diretamente proporcional entre o teor de umidade do produto e o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade e inversamente proporcional ao ângulo de dilatância do mesmo.

O trabalho “*Propriedades físicas, mecânicas e de fluxo de produtos agroindustriais*” de Costa (2013) utilizando produtos como arroz, feijão e milho triturado com teor de umidade de 10,12 e 14% respectivamente e farinha de mandioca e farinha de milho com teor de umidade de 10 e 12% respectivamente, utiliza-se da “Panela de Poisson “ para determinação das propriedades mecânicas destes materiais assume que o teor de umidade é diretamente proporcional ao peso específico e inversamente proporcional á coesão e que fator K independe do teor de umidade, sendo as propriedades mecânicas dos produtos são inversamente proporcionais ao acréscimo de cargas de compressão.

Meira (2015) em seu trabalho de dissertação intitulado “*Propriedades físicas e de fluxo de produtos pulverulentos*”, utilizando amido de arroz, amido de milho, fécula de batata e fécula de mandioca cisalhados nos aparelhos TSG e PFT, compara os valores experimentais obtidos com os valores obtidos pelas normas AS 3774 (1990) e Eurocode 1 (2006) e enfatiza que o aparelho PFT apresenta valores de propriedades de fluxo dentro do normatizado e acima dos valores obtidos no TSG.

Bandeira (2017) analisa o “*Efeito de inserts no fluxo e vazão mássica de ração avícola em silos verticais*” em sua dissertação onde utilizou, assumindo quatro conformações de *insert* em três alturas distintas para análise da vazão de ração avícola, onde conclui que o tipo de *insert* e sua localização influem diretamente na vazão e no padrão de fluxo do produto armazenado.

Mota (2017) em sua dissertação, avaliou o fluxo e a vazão de açúcares, farinha de mandioca e painço em silo com paredes acrílicas encontrando variações de vazão á

partir da equação de Beverloo para os açúcares distinguidos por sua granulometria e teor de umidade, intitulado o seu trabalho como “*Análise de fluxo e vazão de materiais pulverulentos e granulares em silo vertical*”.

Relacionando as pressões atuantes em um silo de verdadeira grandeza, Fank (2017) em sua tese intitulada “*Pressões em silos verticais cilíndricos metálicos: determinação experimental e cálculos teóricos por normas estrangeiras*”, no armazenamento de grãos de milho, encontra variação de esforços nos montantes do silo armazenador, evidenciando a excentricidade das cargas mesmo com o carregamento sendo concêntrico.

Por análise de pressões, dos Anjos (2018) ao simular a distribuição das pressões exercidas por grãos de milho nas paredes de um silo com fundo plano, em verdadeira grandeza, em sua tese intitulada “*Simulação numérica das pressões exercidas pelos grãos nas paredes dos silos verticais pelo método dos elementos finitos*”, afirma que a norma BS EN 1991:4 (2006), quando comparada aos dados experimentais e simulados majora os valores das pressões, sendo o modelo simulado idêntico aos experimental nos aspectos numéricos.

Silva (2019) em seu trabalho de tese que tem por título “*Efeito de inserts no padrão de fluxo e vazão mássica em silo vertical esbelto para farinha de milho flocada*” realiza análise de fluxo de farinha de milho com introdução de *inserts* em um silo cilíndrico seccionado longitudinalmente tendo a parte frontal fechada por uma parede de vidro transparente e, assim como Bandeira (2017) conclui que a altura e a conformação do *insert* imposto influenciam diretamente o padrão de fluxo e a formação de arco coesivo.

No mesmo silo utilizado por Bandeira (2017) e Silva (2019), Vasconcelos (2019) em sua dissertação realiza o “*Estudo experimental de pressões horizontais em silo com tremonha e inserts*”, e constata que a utilização de *inserts* no interior do silo além de minimizar a formação de arcos coesivos por diminuir as tensões na zona de transição, causa um “alívio” nas pressões de descarregamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Definição e Classificação

Os silos são estruturas amplamente utilizadas nos setores industrial e agrícola e embora existam muitos avanços nas pesquisas, muitas incertezas ainda permanecem com relação ao comportamento dos produtos armazenados e sobre os fenômenos produzidos durante o processo de descarga, quando as pressões nas paredes exercidas pelos produtos armazenados são as mais altas possíveis (GALLEGO, 2015).

Para estudo experimental, os protótipos são utilizados para avaliação dos processos de fluxo e pressão sabendo-se que, em silos esbeltos, a tremonha suporta a maior parte do peso do produto armazenado de modo que o carregamento é fundamental na avaliação da integridade estrutural, porém, as pressões nas paredes do silo sofrem mudanças desde o carregamento até o descarregamento (DING, 2013).

Segundo as normas BS EN 1991/4 (2006) e AS 3774 (1990), as cargas em paredes verticais de silo devem ser avaliadas de acordo com a esbeltez do silo determinado de acordo com as classes apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos silos segundo as normas BS EN 1991/4 (2006) e AS 3774 (1990).

Classificação do tipo de silo	Relação H/D	
	BS EN 1991/4	AS 3774
Silos esbeltos	$H/D \geq 2,0$	$H/D > 3,0$
Silos de esbeltez intermediária	$1,0 < H/D < 2,0$	$1,0 \leq H/D \leq 3,0$
Silos baixos	$0,4 < H/D \leq 1,0$	$H/D < 1,0$

Fonte: Adaptado de BS EN 1991/4 (2006) e AS 3774 (1990)

Ravenet (1977) esclarece que, no descarregamento em silos esbeltos, as sobrepressões são mais evidentes e prejudiciais a estrutura do que em silos de esbeltez intermediária ou baixos. Ainda analisando os efeitos da esbeltez nas ações internas, Madrona e Calil Jr. (2009) apontam que influencia diretamente o padrão de fluxo onde quanto mais esbelto, mais tendência ao fluxo excêntrico no descarregamento.

2.2. Propriedades Físicas e de Fluxo

As principais propriedades físicas utilizadas para se iniciar a caracterização dos produtos a serem analisados quanto ao cisalhamento dentro do silo são: granulometria e teor de umidade.

Para Garbazza (2011) a análise da granulometria de um produto é importante, pois mostra a relação entre o fluxo e o diâmetro médio das partículas deste produto, que podem condicionar a formação ou não de arco coesivo e/ou mecânico assim como a fluidez.

De acordo com a norma australiana AS 3774 (1990), os produtos sólidos granulares podem ser classificados conforme o diâmetro de suas partículas. Kock (2018) esclarece que geralmente produtos granulares não são coesivos e apresentam fluxo livre, indicando que a presença de pó, variação de teor de umidade do produto e tempo de armazenamento, são fatores determinantes para o aumento das pressões, sendo relevante a realização de ensaios granulométricos e de compressibilidade para definição do estado de coesão do produto.

Com relação ao teor de umidade dos produtos utilizados em testes de fluxo, Calil Júnior (1990) indica que a amostra deva apresentar o maior teor de umidade possível, dentro do limite estabelecido para o armazenamento. Para a determinação do atrito do produto com a parede para o cálculo das pressões, a amostra deve estar como o teor de umidade ideal para o armazenamento, podendo ainda serem utilizadas amostras com o teor de umidade mais alto em que o produto possa ser encontrado assim como o mais baixo.

A determinação das propriedades de fluxo é realizada por meio do aparelho de cisalhamento translacional que utiliza a célula de Jenike e são de fundamental importância para o cálculo de fluxo e de pressões em silos. As propriedades de fluxo necessárias a serem analisadas no projeto de silos para armazenamento são: Peso específico consolidado (γ); Ângulo de Atrito Interno (ϕ_i); Efetivo Ângulo de Atrito Interno (ϕ_e); Ângulo de Atrito do Produto com a Parede (ϕ_w - depende do tipo de material); Função Fluxo (FF - instantânea ou com o tempo) Fator Fluxo (ff) (JENIKE, 1964).

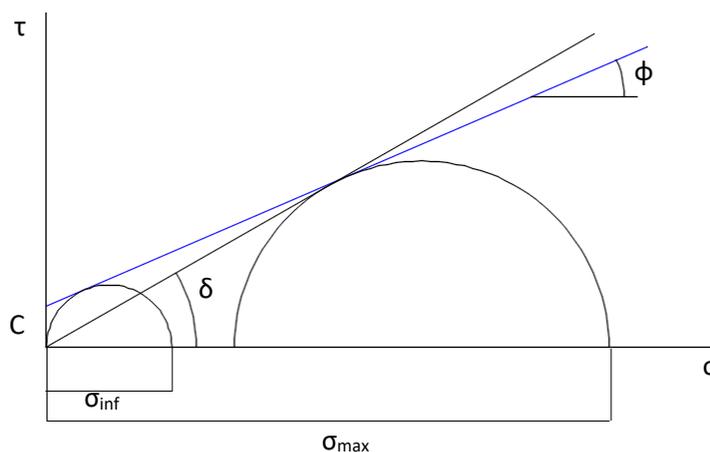
Tais propriedades, determinadas a partir da plotagem de círculos de Mohr (Figura 1), representam as tensões atuantes sobre a massa de grãos durante os processos de armazenamento e descarregamento dos produtos armazenados.

O aparelho denominado "Jenike Shear Cell" tem sido usado, desde então, por diversos pesquisadores, embora algumas limitações tenham sido mencionadas por Beninke (1989), tais como a baixa velocidade de cisalhamento e o limitado deslocamento.

Nascimento e Calil Junior (2009) destacam o fato de que o peso específico consolidado do produto é uma função das pressões no decorrer do fluxo, da umidade do produto, das sobrepressões que ocorrem no silo, do tempo de armazenamento, do modo de carregamento e da altura de queda do produto, porém, o produto a ser armazenado deverá estar em sua fase elástica, apresentando módulo de elasticidade grande o suficiente para retornar à posição inicial ou expandi-lo após a ação das pressões.

Por ângulo de atrito interno, Reis (2011) convergindo com a assertiva de Nascimento e Calil Junior (2009), destacam esta propriedade como sendo o atrito entre os grãos podendo ser influenciado pela rugosidade do produto armazenado, a forma e o tamanho das partículas além do nível de tensão aplicadas aos grãos, permitindo-se afirmar que o ângulo de atrito interno varia de acordo com o peso específico.

Figura 1 - Círculos de Mohr



De acordo com Calil Júnior e Cheung (2007), a determinação do ângulo do produto com a parede é importante tanto para o fluxo quanto para o cálculo das pressões e deve ser determinado para quaisquer que forem as condições, preferencialmente para as mais desfavoráveis a que o produto e a parede do silo possam estar submetidos.

As normas estrangeiras AS 3774 (1990) e BS EN 1991/4 (2006) vigentes recomendam valores para as propriedades de fluxo de alguns produtos usualmente armazenáveis conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades de Fluxo normatizadas

AS 3774 (1990)							
Produto	ϕ_e (°)		γ (kN/m³)		μ (tg ϕ_w)		
					D1	D2	D3
	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	(°)	(°)	(°)
Soja	25	32	7,0	8,0	0,26	0,32	0,36
Areia Grossa	30	40	14,0	17,0	0,46	0,53	0,70
Trigo	26	32	8,0	10,0	0,46	0,57	0,62
Milho	28	33	7,0	8,5	0,46	0,57	0,62

BS EN 1991/4 (2006)							
Produto	ϕ_e (°)		γ (kN/m³)		μ (tg ϕ_w)		
					D1	D2	D3
	Méd.		Inf.	Sup.	(°)	(°)	(°)
Soja	25		7,0	8,0	0,11	0,11	0,11
Areia Grossa	36		14,0	16,0	0,11	0,11	0,11
Trigo	30		7,5	8,0	0,11	0,11	0,11
Milho	31		7,0	8,0	0,17	0,17	0,17

Fonte: Adaptado de AS 3774 (1990) e BS EN 1991/4 (2006).

Ainda segundo as normas estrangeiras AS 3774 (1990) e BS EN 1991/4 (2006), as propriedades de fluxo utilizadas para a determinação das pressões devem seguir as seguintes características expressas na Tabela 3, no que diz respeito à utilização dos limites superiores e inferiores das propriedades.

Tabela 3 - Valores das propriedades de fluxo para cálculo de pressões

Aplicação das propriedades	Valor característico					
	AS 3774			BS EN 1991/4		
	Efetivo ângulo de atrito interno (φ_e)	Ângulo de atrito com a parede (φ_w)	Razão das pressões (K)	Efetivo ângulo de atrito interno (φ_e)	Coefficiente de Atrito da parede (μ)	Razão das pressões (K)
Pressão normal máxima na parede do silo	Inferior	Inferior	Superior	Inferior	Inferior	Superior
Máximo atrito na parede do silo	Inferior	Superior	Superior	Inferior	Superior	Superior
Carga vertical máxima na tremonha	Superior	Inferior	Inferior	Superior	Inferior	Inferior
Pressões máximas da tremonha	Superior	Inferior	-	-	-	-
Pressões máximas da tremonha no carregamento	-	-	-	Inferior	Inferior	Inferior
Pressões máximas da tremonha no descarregamento	-	-	-	Superior	Inferior	Superior

Fonte: Adaptado de AS 3774 (1990) e BS EN 1991/4 (2006).

Porém, o uso dos valores extremos das propriedades dos produtos armazenados propostos pelas normas é criticado por Ooi e Rotter (1990), que enfatizam a existência de variações aleatórias no carregamento e descarregamento e a inexistência de uniformidade das propriedades físicas do produto.

2.3. Fluxo

De acordo com Jenike e Johanson (1968), o fluxo acontece quando as pressões são suficientes para que ocorra o cisalhamento da massa sem destruir a isotropia do produto armazenado.

Nascimento e Calil Junior (2009) enfatizam que a escolha do tipo de fluxo que irá ocorrer no silo é bastante importante, tendo em vista que as pressões exercidas nas paredes dos silos sob condições de operações (carregamento e descarregamento) são diretamente relacionadas com o tipo de fluxo imposto.

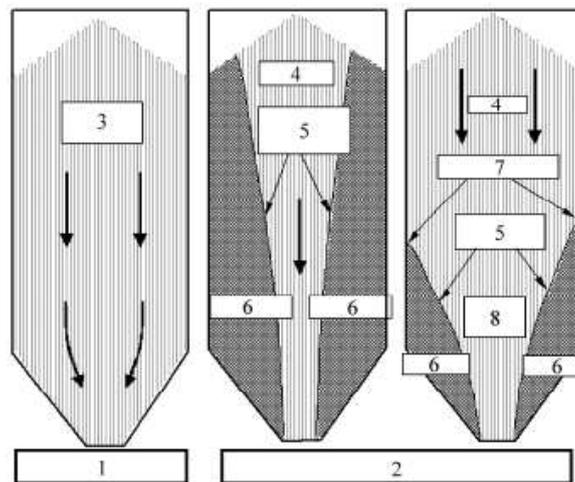
Fenômenos característicos podem ser gerados durante o fluxo no descarregamento que segundo Wojcik *et al.* (2017) podem ser: o aumento súbito e significativo das tensões de parede, diferentes padrões de fluxo, formação e propagação de zonas de cisalhamento no interior do silo e flutuação de pressões. Além disso, o padrão de fluxo é influenciado pela altura do silo, devido as pressões apresentarem valores distintos para cada nível e também, devido a uma razão diferente entre o diâmetro médio do grão e a relação altura/diâmetro (H/D).

Mesmo em condições simétricas de carregamento e descarregamento concêntricos, faz-se necessária a previsão do padrão de fluxo para que se reconheça o padrão de pressão que ocorrerá principalmente durante a descarga (DING, 2013).

No descarregamento de um silo, a coesão é a propriedade responsável pela coexistência de fluxo rápido na tremonha, próximo à saída, mais lento nas partes mais altas da massa, e regiões estáticas na parte inferior do silo. Em alguns casos, quando existe a formação de arqueamento, o que ocorre acima do orifício de descarga, o fluxo é parado ou tem-se um fluxo intermitente (STARON, 2014).

Jenike (1964) especifica que a descarga do produto armazenado por gravidade pode ocorrer conforme dois tipos principais de fluxo: por fluxo de massa e fluxo de funil (Figura 2). O tipo de fluxo que vai ocorrer depende principalmente das propriedades físicas e de fluxo do produto, assim como, da geometria e rugosidade da superfície da tremonha.

Figura 2 - Padrão de Fluxo - 1) Fluxo em Massa; 2) Fluxo em Funil



1 – Fluxo em massa; 2 – Fluxo em funil; 3 – Produto em movimento; 4 – Zona superior em movimento; 5 – Talude ou parede do tudo de fluxo; 6 – Produto estagnado; 7 – Zona superior do produto estagnado; 8 – Tubo ou funil.

Fonte: BS EN 1991/4 (2006)

Alguns produtos ao serem armazenados se arranjam contribuindo para a formação de arcos estáveis acima do orifício de descarga, o que conduz a interrupção do fluxo. Em alguns casos, a massa estagnada pode manter-se estável mesmo quando os canais de fluxo são esvaziados, onde apenas algumas partículas se movimentam por ação da gravidade (ZHENG & YU, 2015).

Sobre fluxo de funil, Ai *et al.* (2013) afirma que a distribuição das pressões sofre forte influência no ato da formação do canal de fluxo durante a descarga excêntrica, onde a parede do silo está sujeita a uma redução considerável na pressão durante o canal de fluxo, induzindo a flambagem na parede do lado oposto ao orifício de descarga em toda a altura do silo.

Os materiais granulares podem exibir uma combinação de sólidos e líquidos para o comportamento de fluxo, particularmente aqueles com forte interação interparticular tais como as pontes líquidas de Van der Waal, forças eletrostáticas e elementos minerais em sua composição, segundo Zheng e Yu (2015), o fluxo de produtos com teor de umidade acima do limite estipulado para armazenamento é geralmente mais difícil do que o fluxo de produtos com teor de umidade dentro do limite.

2.4. Obstruções de fluxo

Alguns produtos armazenados, quando consolidados, adquirem resistência suficiente para suportar o seu peso próprio, propiciando a formação de obstruções de fluxo. São basicamente dois os tipos de obstruções: arco e tubo. Nascimento e Calil Junior (2009) afirma que o fluxo do produto só poderá ser considerado satisfatório se não houver a formação dessas duas obstruções.

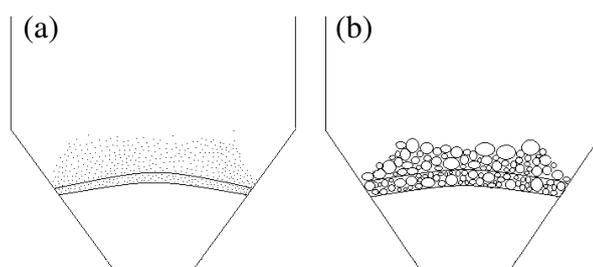
Quando é formado um arco coesivo na tremonha, uma força resultante decorrente do peso do produto armazenado é transferida para as paredes desta tremonha onde, ao romper-se o arco, toda força é direcionada ao corpo do silo (LOBATO *et al.*, 2016).

Segundo Lopes Neto *et al.* (2009), quando o produto é submetido a um estado de tensão de compressão durante determinado tempo, pode adquirir resistência e formar arcos coesivos. Batista (2009) enfatiza que quanto maior for o período pelo qual o produto sofrer esta compressão, maior será o nível de compactação de suas partículas uma vez que todas as camadas estarão submetidas à ação da gravidade.

Kejin *et al.* (2018) alertam para o fato de que, no caso de arcos mecânicos, pode apresentar dimensão de até 4 vezes o diâmetro do orifício de descarga e que a pressão acima do local da formação do arco é maior do que a pressão na zona abaixo desse arco.

O esforço de cisalhamento que atua na interface entre a parede e o produto armazenado conduz ao arqueamento e resulta em tensões verticais inferiores a quaisquer profundidades com uma quantidade considerável de cargas transferidas para as paredes (WIDISINGHE & SIVAKUGAN, 2013).

Figura 3 - (a) Arco Coesivo e (b) Arco Mecânico



Fonte: Adaptado de Lobato *et al.* (2016).

Jenike (1964) especifica que os limites de escoamento dependem do ângulo de inclinação das paredes do silo, do ângulo de atrito com as paredes e do ângulo de atrito

interno do material, tanto para silos com tremonha cônica quanto para silos de tremonha em cunha e Camargo (2011) complementa afirmando que se estas condições não forem atendidas, a formação de algum tipo obstrução é iminente.

2.5. Pressões em silos verticais

Na elaboração de projetos de silos, Calil Junior *et al.* (1997) consideram ações internas e externas a estrutura que influenciam diretamente a estabilidade do silo tais como:

- As ações permanentes que se caracterizam pelo peso da estrutura, o peso dos equipamentos instalados na cobertura e/ou suspensos na tremonha;
- As ações variáveis que sofrem influência das pressões de carregamento e descarregamento do produto armazenado, dilatação térmica do produto, vibrações, efeitos climáticos, vento entre outras propriedades;
- E as ações excepcionais causadas pelo impacto de veículos na estrutura de suporte ou do silo e pressões pela explosão de pós em suspensão no interior do silo.

Com relação as pressões que o produto armazenado exerce sobre a parede do silo, Janssen (1895) considerou a distribuição uniforme desta ao redor de toda a circunferência, sendo tal afirmativa amplamente adotada pelas normas de silo vigentes, sendo possível a simetria nas pressões em torno de todo o perímetro durante o carregamento e descarregamento do silo (GOODEY, 2017).

Wright (2017) alerta para o fato de que o tipo de carregamento afeta diretamente nas pressões exercidas por produtos granulares sobre as paredes do silo, havendo alterações nas pressões durante a transição do fluxo mássico podendo haver intermitências para o fluxo misto em algumas ocasiões.

Em contrapartida a afirmativa supracitada, Kobylla e Molenda (2014) afirmam que fatores como a não uniformidade da umidade do produto armazenado e o eixo central de deposição do produto durante o carregamento ou descarregamento, são grandes influenciadores da assimetria na distribuição das pressões ao longo da circunferência do silo.

Horabik e Molenda (2017) ao realizarem carregamento e descarregamento de grãos em um silo, classificado como baixo por sua relação H/D, afirmam que quanto mais concêntrico o carregamento, maiores são as pressões de atrito no descarregamento, permanecendo as pressões horizontais sem alterações drásticas.

Ooi e Rotter (1990) analisaram criticamente algumas hipóteses colocadas a respeito do cálculo de pressões que atuam em projetos de silos e destacaram como deficientes a consideração de que, embora existam, as variações de pressão em torno da circunferência não são importantes; que as variações na pressão de um carregamento para outro podem ser consideradas adotando-se a maior pressão medida; que as pressões durante a descarga acompanham um padrão similar ao das pressões de carregamento, porém majoradas por um coeficiente denominado fator de sobrepressão ou multiplicador de fluxo.

Para efeito de estudo normatizado, a AS 3774 (1990) enfatiza que as pressões normais no silo apresentam acréscimo principalmente quando existe um descarregamento rápido, o produto armazenado se expande por ganho de umidade, ou quando o carregamento é excêntrico.

Couto *et al.* (2013) estudando o comportamento das pressões exercidas pelo milho em um silo vertical, afirmam que o tempo de consolidação não apresenta influência significativa entre as pressões no descarregamento, sendo o principal fator da alteração das pressões a variação no peso específico consolidado durante o tempo de consolidação.

Embora diversos estudos tenham sido realizados acerca da determinação das pressões estáticas e dinâmicas atuantes no interior dos silos verticais, muitas hipóteses ainda estão sem resolução, sendo a aceita como melhor delas a desenvolvida por Janssen.

Calil Junior e Cheung (2007) abrem um parêntese sobre a teoria de Janssen quanto a ineficiência do cálculo das pressões durante o descarregamento apontando para a divergência entre diversos autores quanto se trata do assunto coeficiente de sobrepressão imposto nas normas estrangeiras para tal determinação.

Assim, a teoria de Janssen ainda é a mais utilizada e melhor empregada para determinação das pressões no carregamento de silos verticais, sendo as pressões no descarregamento uma variável ainda em estudo constante por diversos pesquisadores.

2.5.1 Teoria de Janssen

As pressões a serem determinadas ao longo do corpo do silo e na tremonha podem seguir a Teoria de Janssen (1895) que determina as pressões horizontais e verticais através do equilíbrio das forças verticais e horizontais que atuam sobre uma camada horizontal do material armazenado de altura infinitesimal.

Janssen (1895) ainda leva em consideração algumas suposições em sua teoria:

a) A pressão vertical em uma seção horizontal do produto armazenado é constante nesta seção;

b) Em silos cilíndricos, as pressões horizontais são simetricamente distribuídas ao nas paredes;

c) O atrito na parede depende exclusivamente da pressão horizontal e

d) Quando a razão entre as pressões horizontais e verticais K é determinada, tem valor constante em qualquer profundidade a ser considerada dentro do silo.

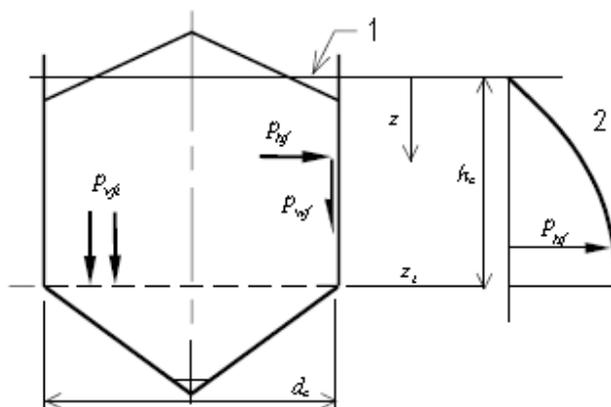
A equação de Janssen (1895) consiste no equilíbrio de uma camada elementar de produto de altura dz com peso específico γ sujeito às pressões verticais p_v e $p_v + dp_v$ e as devidas ao atrito produzido pela força horizontal ph sobre as paredes. Se A é a área da seção transversal do silo e U é o perímetro, então:

$$Ph(z) = \frac{\gamma}{\mu} * \frac{A}{U} * (1 - e^{-zk\mu\frac{U}{A}}) \quad \text{Eq. (1)}$$

Esta teoria continua sendo utilizada até hoje pela maioria das normas internacionais de silos para o cálculo da pressão estática ou inicial de carregamento em silos de seções cilíndricas e poligonais. Até mesmo para o cálculo das pressões dinâmicas, isto é, durante o fluxo, um dos métodos mais utilizados pelas normas, é aplicar coeficientes, chamados de sobrepressão, aos valores obtidos para a condição estática.

Wang *et al.* (2015) alertam para o fato de que na teoria de Janssen as pressões que o produto armazenado exerce na parede do silo se aproxima de um valor assintótico em direção ao fundo do mesmo, onde esta assíntota depende diretamente do coeficiente de atrito de parede.

Figura 4 - Representação da distribuição das pressões no corpo do silo e na tremonha



Fonte: BS EN 1991/4 (2006)

A equação de Janssen para o cálculo das pressões de carregamento em silos é mencionada em muitas das normas estrangeiras, porém, as pressões de carregamento não são as mesmas para o mesmo produto em ambas as norma, pois a equação de Janssen é função de quatro variáveis, sendo três dependentes do produto a ser armazenado, tais como densidade, coeficiente de atrito com a parede e a relação entre pressões horizontais e verticais ou fator K; e uma dependente da geometria do silo que é o raio hidráulico (NASCIMENTO & CALIL JUNIOR, 2009).

Janssen utiliza o fator K determinado por Rankine que leva em conta a condição ativa do produto armazenado com a Equação (3) onde no estado de ativo, estão em evidencia as maiores tensões, incluindo-se a tensão principal ou máxima.

$$k = \frac{1 - \sin \phi_i}{1 + \sin \phi_i} \quad \text{Eq. (2)}$$

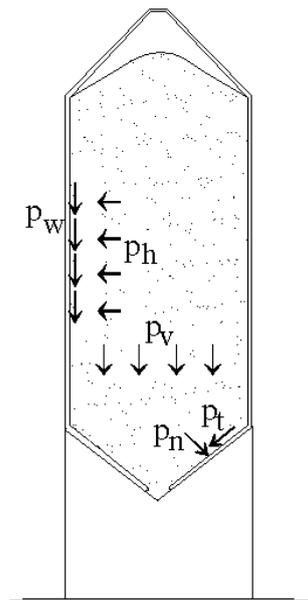
A partir desta, pode ser desenvolvida a equação para obtenção das pressões verticais que levam em consideração a relação entre as pressões horizontais e determina assim um fator K.

$$P_v = \frac{Ph}{k} \quad \text{Eq. (3)}$$

2.5.2. Pressões no carregamento

Na concepção de um projeto de silo armazenador, as principais ações a serem consideradas são provenientes dos produtos armazenados que exercem pressões nas paredes verticais e no fundo do silo. Na parede vertical atuam pressões perpendiculares, denominadas pressões horizontais e pressões de atrito do produto com a parede. No fundo do silo atuam pressões denominadas pressões verticais (PALMA e CALIL JÚNIOR, 2008).

Figura 5 - Distribuição das pressões no silo armazenador



Fonte: Adaptado de Palma e Calil Jr. (2008).

Conforme Coelho (2016), as pressões de carregamento apresentam distribuição simétrica aplicada em todos os pontos verticais do silo que estejam em contato com o produto armazenado, embora haja acréscimo nos valores decorrentes da profundidade. Também chamadas de pressões estáticas, as pressões no carregamento são distribuídas entre pressão horizontal à parede do silo, pressão vertical à parede e pressão de atrito no contato do produto com a parede.

A norma BS EN 1991/4 (2006) prediz equações para determinação das pressões no carregamento. Tais equações tem por base a Teoria de Janssen onde:

$$Phf(z) = Pho Yj(z) \quad \text{Eq. (4)}$$

$$Pwf(z) = \mu Pho Yj(z) \quad \text{Eq. (5)}$$

$$Pvf(z) = \frac{Pho}{K} Yj(z) \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

$$Pho(z) = \gamma K z o \quad \text{Eq. (7)}$$

$$z o = \frac{1}{K \mu} \frac{A}{U} \quad \text{Eq. (8)}$$

$$Yj(z) = 1 - e^{\left(-\frac{z}{z o}\right)} \quad \text{Eq. (9)}$$

A norma AS 3774 (1990) apresenta as seguintes equações para a determinação das pressões de carregamento ao longo do corpo do silo:

$$Phf = \gamma r c C z / \mu \quad \text{Eq. (10)}$$

$$Pvf = \gamma r c C z / K 1 \mu \quad \text{Eq. (11)}$$

$$K 1 = \frac{1 + \text{sen}^2 \emptyset i - 2 \sqrt{\text{sen}^2 \emptyset i - \mu^2 \text{cos}^2 \emptyset i}}{4 \mu^2 + \text{cos}^2 \emptyset i} \quad \text{Eq. (12)}$$

$$Pwf = \gamma r c C z \quad \text{Eq. (13)}$$

$$C z = 1 - e^{\left(-\frac{z}{z o}\right)} \quad \text{Eq. (14)}$$

Onde $rc = 0,25dc$ para seção de silo circular

Em seu trabalho com simulação, Wang *et al.* (2015) encontram valores de pressões experimentais próximos aos valores obtidos através da simulação e até 20% inferiores aos valores a partir da norma BS EN 1991/4, sendo possível assim afirmar que, para a situação imposta, a simulação representa perfeitamente as ações causadas pelo produto armazenado as paredes do silo.

2.5.3. Pressões na zona de transição

Palma e Calil Jr. (2008) em seu trabalho sobre pressões em silos esbeltos, afirma que as maiores pressões exercidas sobre o produto armazenado sobre as paredes do silo encontradas durante o processo de armazenamento estão localizadas na zona de transição entre o corpo do silo e a tremonha.

Fujimoto (2018) ao simular as ações da alumina no interior de um silo vertical, constata que as pressões na zona de transição durante o descarregamento são entre 40 e 60% maiores que as pressões encontradas na zona imediatamente acima desta.

Para tal determinação, a norma BS EN 1991/4 (2006) recomenda a Equação 15 para a determinação da pressão vertical atuante na zona de transição durante o descarregamento que leva em consideração o fator C_b de acordo com a Classe 1, 2 ou 3 do silo.

$$P_{vft} = C_b * P_{vf} \quad \text{Eq. (15)}$$

Onde C_b é igual a 1,0 quando o silo for de Classe 2 ou 3, e C_b igual a 1,3 quando o silo for de Classe 1.

A norma AS 3774 (1996), recomenda a equação Eq. 16 para determinação da pressão horizontal na zona de transição entre o corpo do silo e a tremonha que leva em consideração o parâmetro k inicial.

$$P_{hti} = Kh * P_{vf} \quad \text{Eq. (16)}$$

$$Kh = \frac{tg\alpha}{tg\alpha + \mu h} \quad \text{Eq. (17)}$$

A zona de transição, segundo Rotter (2001), é o ponto onde as pressões sofrem alterações direcionais para que haja a quebra da inércia no início do descarregamento, sendo as pressões nesse ponto até 200% superiores as máximas pressões encontradas no corpo do silo durante o carregamento e descarregamento.

2.5.4. Pressões na tremonha

Ding (2013) afirma que embora a geometria da tremonha possa parecer bastante simples, uma seção vertical de uma tremonha íngreme combinada a um produto com granulometria heterogênea, produz uma complexidade significativa tanto no padrão de fluxo quanto nas pressões exercidas na parede da tremonha.

Segundo Rotter (2001), a distribuição das pressões durante o descarregamento do silo, depende muito do estudo da geometria da tremonha para a situação prevista, sabendo-se que esta estrutura definirá o padrão de fluxo que o produto escoará.

Teoria impostas para a predição das pressões nas tremonhas como a Teoria de Reimbert & Reimbert (1956) e a Teoria de Baikov (1978), consideram a redistribuição das pressões verticais sobre o produto armazenado na tremonha tendo em vista a inclinação que esta tremonha se encontra.

Nas normas BS EN 1991/4 (2006) e AS 3774(1990), as pressões normais a tremonha são calculadas pela soma dos carregamentos, considerando o carregamento da tremonha e os carregamentos resultantes da sobrecarga vertical diretamente acima da transição. Em silos com fluxo de massa, uma pressão normal adicional é aplicada na zona transição do corpo do silo com a tremonha.

Segundo a norma BS EN 1991/4 (2006), na tremonha durante o carregamento, para obter as pressões normais e de atrito, devem ser utilizadas as seguintes equações:

$$P_n = P_{n3} + P_{n2} + (P_{n1} - P_{n2}) \frac{x}{ln} \quad \text{Eq. (18)}$$

$$P_{n1} = P_{vft} (C_b \text{sen}^2 \beta + \text{cos}^2 \beta) \quad \text{Eq. (19)}$$

$$P_{n2} = P_{vft} (C_b \text{sen}^2 \beta) \quad \text{Eq. (20)}$$

$$P_{n3} = 3,0 \frac{A}{U} \frac{\gamma K}{\sqrt{\mu h}} \text{cos}^2 \beta \quad \text{Eq. (21)}$$

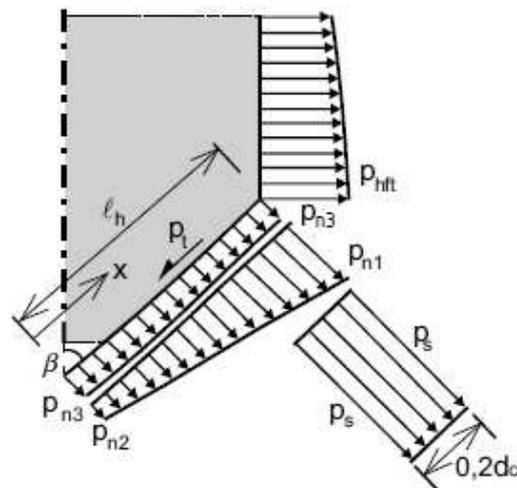
μh é o coeficiente de atrito na parede da tremonha

β é o ângulo que a tremonha faz com a vertical

C_b é igual a 1,6 quando existir a possibilidade de carregamento dinâmico.

$P_{vft} = P_{vf}$

Figura 6 - Pressões na tremonha - BS EN 1991/4 (2006)



Fonte: BS EN 1991/4 (2006)

Na norma AS 3774 (1990), as equações que determinam as pressões na tremonha, levam em consideração a concentricidade do fluxo e uma relação entre as pressões horizontais e verticais articular.

$$Phft = Kh(\gamma Zh + Pvf) \quad \text{Eq. (22)}$$

$$Pwft = \mu h Phft \quad \text{Eq. (23)}$$

$$Kh = \frac{tg\alpha}{tg\alpha + \mu h} \quad \text{Eq. (24)}$$

A teoria para determinação das pressões atuantes no silo vertical desenvolvida por Jenike e Johanson (1968) mostra que as pressões que o produto armazenado exerce sobre as paredes do silo tende a diminuir para zero no vértice da tremonha onde as pressões ao longo de um raio são proporcionais à distância do vértice da tremonha, sendo sugerido ainda por Jenike *et al.* (1973) que as pressões na tremonha sejam reduzidas em até 15% para que se desconsiderem os picos de pressão teóricos inevitáveis.

2.5.5. Pressões no descarregamento

O início da descarga gravitacional de sólidos granulares a partir de um silo de armazenamento é uma das operações mais arriscadas porque está associada a fortes efeitos dinâmicos: pulsações rápidas de pressão e mudança do estado ativo para o passivo (KOBYLKA, 2017).

As pressões que ocorrem durante a descarga não são perfeitamente entendidas, levando-se em conta que a pressão no início da descarga é muito próxima da pressão no final da descarga. Também pode ser notada uma discrepância existente entre a pressão calculada e a medida experimentalmente na extremidade superior da tremonha (DING, 2014).

Madrona e Calil Jr. (2009) evidenciam que, dada a complexidade de previsão dessas pressões não uniformes, seria ideal corrigir os resultados obtidos pela resolução das equações de Janssen (1895) por meio da adoção de coeficientes multiplicadores denominados coeficientes de sobrepressão, que simulam o descarregamento do silo.

Para Jenike e Johanson (1968), a ocorrência das sobrepressões pode ser explicada considerando-se três estados de carregamento distintos:

- a) Estado inicial: produto totalmente inerte;
- b) Estado de carregamento no descarregamento: após o início da descarga;
- c) Estado de transição: passagem do estado estático para o estado dinâmico.

Os autores enfatizam ainda que o tipo de fluxo é fundamental para se conhecer a magnitude e a distribuição das pressões nas paredes do silo.

Na norma BS EN 1991/4 (2006) são pré-estabelecidas equações que levam em consideração, para escolha do coeficiente de sobrepressão, a classe com a qual o silo é designado. O silo utilizado neste trabalho pertence à Classe de Avaliação de Ação 1, o coeficiente de sobrepressão utilizado é obtido através da resolução das seguintes equações, sendo possível assim a determinação da pressão no descarregamento.

$$P_{he}(z) = C_h P_{hf} \quad \text{Eq. (25)}$$

$$P_{we}(z) = C_w P_{wf} \quad \text{Eq. (26)}$$

Onde os coeficiente C_h e C_w para silos de Classe 1 são dados por:

$$Ch = 1,15 + 1,5\left(1 + 0,4 \frac{e}{dc}\right)C_{op} \quad \text{Eq. (27)}$$

$$Cw = 1,4\left(1 + 0,4 \frac{e}{dc}\right) \quad \text{Eq. (28)}$$

Já na norma AS 3774 (1990) as equações para determinação das pressões no descarregamento levam em consideração a concentricidade ou excentricidade do fluxo. Assim:

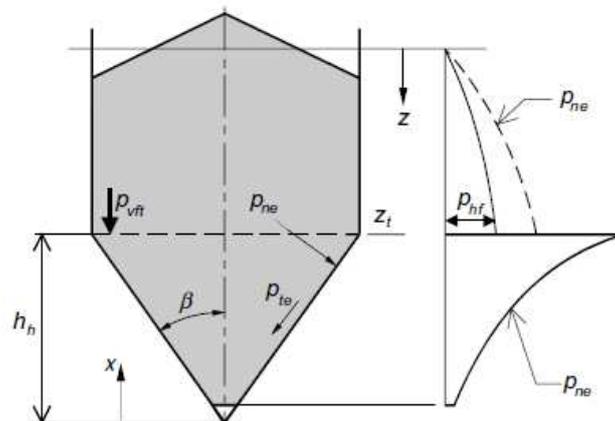
$$P_{he} = C_{nf} P_{hf} \quad \text{Eq. (29)}$$

$$C_{nf} = 1,2 C_c \quad \text{Eq. (30)}$$

$$P_{we} = C_{qf} P_{wf} \quad \text{Eq. (31)}$$

Onde C_{qf} é igual a 1,2 para fluxo concêntrico, assim como C_c é igual a 1,0 para o mesmo tipo de fluxo.

Figura 7 - Representação das pressões durante o carregamento e descarregamento



Fonte: BS EN 1991/4 (2006)

Embora tenha trabalhado simulando silos quadrados, Goodey *et al.* (2017) afirma que as pressões de carregamento podem ser determinadas através da teoria de Janssen, porém, durante o descarregamento, existem fenômenos que, até na simulação,

estão fora do padrão apresentado pelas normas estrangeiras, existindo variações e não uniformidade durante o processo.

Fank *et al.* (2015) encontram em seu estudo uma não uniformidade na distribuição de tensões em um ponto na massa do produto armazenado, constatando que, embora a distribuição interna seja praticamente uniforme, assim como o carregamento, a distribuição das pressões nas colunas de sustentação é desuniforme quando em função do fluxo.

Simulando o descarregamento de farelo de milho e grãos de soja, Madrona e Calil Jr. (2009) encontram valores experimentais inferiores aos valores normatizados na AS 3774 e BS EN 1991/4 e afirma que, a simulação com elementos finitos é aplicável e segura para determinação das pressões atuantes no interior do silo, sendo semelhantes aos valores experimentais.

Wang *et al.* (2015) ao compararem valores de pressões durante o descarregamento experimental, simulado e normatizado na BS EN 1991/4, encontram valores similares entre os experimentais e simulados, sendo os valores normatizados majorados pelo coeficiente de segurança imposto pela norma, porém, ainda dentro dos limites máximos adotados na mesma.

2.5.6. Fator K

O fator K (relação entre a pressão horizontal média e a vertical média) deve ser determinado a partir do peso específico consolidado e a um nível de tensão correspondente à posição no sólido armazenado no silo onde a tensão vertical máxima após o carregamento ocorrer BS EN 1991/4 (2006).

Rotter (2008) afirma que entre os processos de carregamento e descarregamento, a mudança do estado ativo para o passivo do produto armazenado ocasiona um fenômeno de sobrepressão que deve ser entendido pelo fator K que tem relação direta com o efeito dinâmico das pressões no interior do silo.

Segundo a Teoria de Jaky, interpretada por Lopes Neto *et al.* (2014), os estados ativo e passivo são percebidos quando há movimento da parede de dentro para fora pela ação do produto armazenado e a reação desta parede com ação de fora para dentro do silo. Já o terceiro estado é o repouso, onde as paredes do silo são rígidas o suficiente para não sofrerem flexão, não permitindo assim a deformação na periferia do produto.

O fator K, primordialmente, foi determinado experimentalmente por Janssen (1895) onde foi verificada a variação deste fator para cada produto a ser armazenado.

Posteriormente este fator foi aprimorado por Koenen (1895) obtendo o valor do fator como sendo:

$$K = \frac{1 - \operatorname{sen} \theta}{1 + \operatorname{sen} \theta} \quad \text{Eq. (32)}$$

Esta é uma das expressões mais aceitas para a determinação do valor de K, sendo determinada com base no coeficiente de empuxo ativo da teoria de Rankine (1857) para empuxos de terra. Esta expressão é válida para ângulos de atrito com a parede igual a zero.

Na norma estrangeira europeia BS EN 1991/4 (2006) deve-se considerar os procedimentos para determinação do fator K onde, uma tensão vertical σ_1 deve ser aplicada a amostra restrita contra a deformação horizontal. A tensão horizontal induzida σ_2 deve ser medida e o valor secante da razão de pressão lateral K_0 determinado.

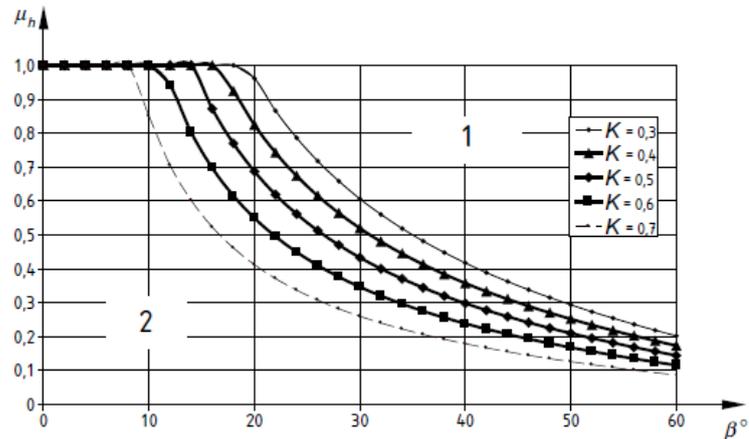
Sendo assim, o valor do fator K pode ser considerado como:

$$k = 1,1 * k_0 \quad \text{Eq. (33)}$$

Com: $K_0 = \sigma_2/\sigma_1$. Onde σ_2 = tensão horizontal; σ_1 = tensão vertical.

Um valor aproximado para Km pode ser obtido alternativamente a partir do valor médio do ângulo de atrito interno. O fator 1,1 na Equação (33) é usado para dar uma representação aproximada da diferença entre o valor de K e K_0 , onde K_0 é medido em condições de atrito da parede quase zero e o valor de K medido quando o atrito da parede está presente.

No cálculo das pressões que agem na tremonha, segundo a norma BS EN 1991/4(2006), o fator K pode ser determinado á partir das características da tremonha tais como o μ_h que é o coeficiente de atrito da tremonha e o ângulo que a tremonha faz com a horizontal.

Figura 8 - Ábaco para determinação do fator K da tremonha

Fonte: BS EN 1991/4 (2006)

Na norma estrangeira AS 3774 (1990) o fator K é expresso na Tabela 5 e relaciona o efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) do produto e o ângulo de atrito da parede (ϕ_w).

Tabela 4 – Determinação do fator K segundo a norma AS 3774 (1990) para determinação das pressões em silos.

Efetivo ângulo de atrito (ϕ_e)	Fator K									
	Ângulo de atrito da parede (ϕ_w)									
	0	10	15	20	25	30	35	40	45	
0	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0,840	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0,704	0,941	-	-	-	-	-	-	-	-
15	0,589	0,640	0,874	-	-	-	-	-	-	-
20	0,490	0,515	0,559	0,790	-	-	-	-	-	-
25	0,406	0,419	0,439	0,481	0,697	-	-	-	-	-
30	0,333	0,341	0,351	0,370	0,408	0,600	-	-	-	-
35	0,271	0,275	0,281	0,291	0,307	0,339	0,505	-	-	-
40	0,217	0,220	0,223	0,228	0,236	0,250	0,277	0,415	-	-
45	0,172	0,173	0,175	0,177	0,182	0,188	0,199	0,220	0,333	-

Fonte: Adaptado de AS 3774 (1990)

A norma australiana, AS3774 (1990), adota a fórmula de Walker para a determinação do valor de K, equação (17), limitando K como maior ou igual a 0,35.

A relação entre as pressões horizontais e verticais (K) é um importante parâmetro no cálculo das pressões em silos, pois define a porcentagem da distribuição das pressões em função da relação H/D do silo (NASCIMENTO & CALIL JUNIOR, 2009).

Lopes Neto *et al.* (2014), ao analisarem o parâmetro K para diferentes normas, determinam que, os valores experimentais se mantiveram dentro do estipulado pelas normas AS 3774(1996) e BS EN 1991:4 (2006) e acima do recomendado pela norma DIN (1987), tendo em vista a variação entre equações aplicáveis pelas normas para determinação de tal parâmetro.

Calderón *et al.* (2017) avaliando a influência da forma dos grãos durante o descarregamento de um silo vertical, obtêm resultados que demonstram que o parâmetro K pode ser correlacionado com o tamanho, circularidade e área específica dos grãos onde a proporção que o tamanho dos grãos aumenta o fator K diminui, por outro lado, à medida que a área de superfície específica aumenta K também aumenta.

Embora normatizado e segundo Lohnes (1993), não existe nenhum acordo completo sobre o que constitui um valor apropriado para o parâmetro K e que a hipótese de o produto armazenado estar em ruptura parece irracional para cargas estáticas e sugere para produtos que estão confinados, mas não em ruptura.

Para Ledo *et al.* (2018) o problema com a formulação do parâmetro K é assumir que o produto armazenado, embora esteja em deslizamento durante o processo de carregamento e descarregamento, apresente atrito com a parede constante ou nulo.

Goodey *et al* (2017) alertam para o fato de que as normas assumem que o fator K é constante ao longo da parede do silo, porém, as paredes de silos metálicos apresentam grau de flexibilidade que faz com que o regime de distribuição das pressões ao longo das paredes seja impreciso e variável.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos, fatores como localização do experimento, especificações do silo protótipo, instrumentação, metodologia empregada e análise dos dados obtidos estão expressos neste item.

3.1. Local e Período dos Ensaios

O experimento foi conduzido no Laboratório de Beneficiamento de Sementes, anexo ao Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas e no Laboratório de Construções Rurais e Ambiência na Universidade Federal de Campina Grande, Campus I – Campina Grande/PB. Os ensaios foram realizados entre os meses de Outubro de 2018 e Fevereiro de 2019.

3.2. Produto estudado

O presente trabalho utilizou grãos de milho adquiridos na Conab regional, com teor de umidade médio de 12,5%, e peso específico esteve entre 6,9 e 7,9 kN.m^{-3} , apresentando uniformidade granulométrica.

Segundo a classificação de produtos armazenáveis estipulada na norma AS 3774(1990), o milho em estudo é um produto granular grosso, que apresenta fluxo livre, média abrasividade sem corrosão, porém, é susceptível a explosões por liberar amido e poeira ao longo do período que permanecer armazenado.

3.3. Análise Estatística

Para análise estatística foi utilizado um esquema fatorial onde constaram dois fatores identificados por (F1) como sendo as quatro relações H/D utilizadas (4, 3, 2 e 1) e (F2) os três tempos de consolidação de 6, 12 e 24 horas e mais o processo instantâneo, com cinco repetições cada ensaio, totalizando 80 ensaios.

3.4. Silo protótipo

O silo em estudo foi pré confeccionado com o intuito de serem realizados diversos experimentos com produtos granulares e pulverulentos para determinação das pressões, vazão, fluxo entre outras propriedades.

O corpo do silo protótipo foi confeccionado em aço inox com 1 mm de espessura de parede, apresentando dimensões de 2,50 m de altura e 0,64 m de diâmetro e volume de 0,8042 m³.

A tremonha, também confeccionada em aço inox com 1 mm de espessura de parede, tem inclinação com a horizontal de aproximadamente 60°, com um volume aproximado de 0,0594 m³.

Assim, o conjunto corpo e tremonha do silo totalizou um volume armazenável de 0,8636 m³, no qual, para o milho com um peso específico médio é de 7,5 kN.m⁻³ tem-se aproximadamente 700 kg de grãos de milho armazenado.

O orifício de descarga do silo apresenta diâmetro igual a 0,10 m, concêntrico, com descarregamento por gravidade.

Na zona de transição entre o corpo do silo e a tremonha, a união é feita por meio de flange com espessura de chapa de 4mm e largura de 0,025m, fixados um ao outro por meio de parafusos com diâmetro de 7mm.

No corpo do silo foram realizados sete cortes em seções quadradas com dimensões de 0,098 x 0,098 m para melhores representatividade da distribuição das pressões ao longo do corpo do silo. Na tremonha também foram realizados cortes de duas destas seções, todas alinhadas verticalmente (Figura 9a) para fixação dos sensores de pressão ao longo do corpo do silo e na tremonha.

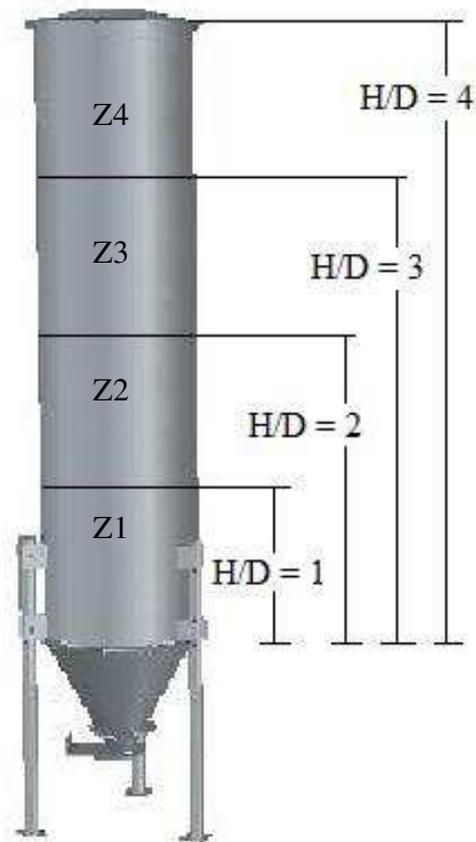
Nestas seções foram instalados dispositivos compostos por pares de células de carga, espaçados conforme Figura 9b de maneira que possam seguir a assíntota de distribuição das pressões, existindo uma relação inversamente proporcional entre a altura do silo e as pressões.

Figura 9 – a) Vista dos cortes para inserção das células de carga no corpo do silo protótipo; b) Distâncias entre cortes.



A seção de parede extraída foi reintegrada ao silo sendo fixada pelas células de carga a uma haste horizontal chamada de haste secundária e as hastes secundárias por sua vez, estiveram fixadas a uma haste central vertical.

O corpo do silo foi subdividido em seções que corresponderam as relações H/D estudadas, chamadas neste trabalho de zonas de pressão. Foram, no total, quatro zonas relativas ao parâmetro H/D distinguidas como Z1 a zona com 0,64m de distância da zona de transição caracterizando o silo com relação H/D igual a 1. A zona subsequente foi distinguida como Z2 apresentando distância até a zona de transição de 1,28m imprimindo ao silo a relação H/D igual a 2. Já a zona Z3 esteve a 1,92m de distância até a zona de transição entre o corpo do silo e a tremonha indicada pela relação H/D igual a 3 e quando o silo esteve totalmente cheio caracterizando a relação H/D igual a 4, a zona em questão foi indicada como Z4 (Figura 12).

Figura 10 - Relações H/D estudadas

3.5. Procedimentos dos ensaios

3.5.1. Instrumentação do silo protótipo

Para a instrumentação do silo foram utilizados dispositivos compostos por pares de células de carga modelo TAL223 em liga de alumínio, do fabricante HXASTLP *Hi Sensor*, com alimentação entre 5 e 12 Vdc, e sinal de saída de 1.0mV/V, conectadas ao sistema de aquisição de dados *Spider 8*, do fabricante HBM (Figura 11), configurados para operar em uma frequência de 5Hz coletando e armazenando cinco dados por segundo durante toda a execução dos ensaios. O *software* utilizado para análise dos dados foi o *Catman*, versão 4.5.

Figura 11 - Instrumentação do silo



3.5.2 Calibração das células de carga

Todas as células de carga utilizadas neste trabalho foram calibradas sendo fixadas individualmente por uma braçadeira “sargento” e acopladas ao *Datalogger*. Foi imposta a cada célula uma sequência crescente de cargas entre 0,5 e 10 kg e que a voltagem para cada carga foi registrada pelo sistema e configurado para a aquisição das cargas no carregamento e descarregamento do silo.

3.5.3 Fixação das células de carga

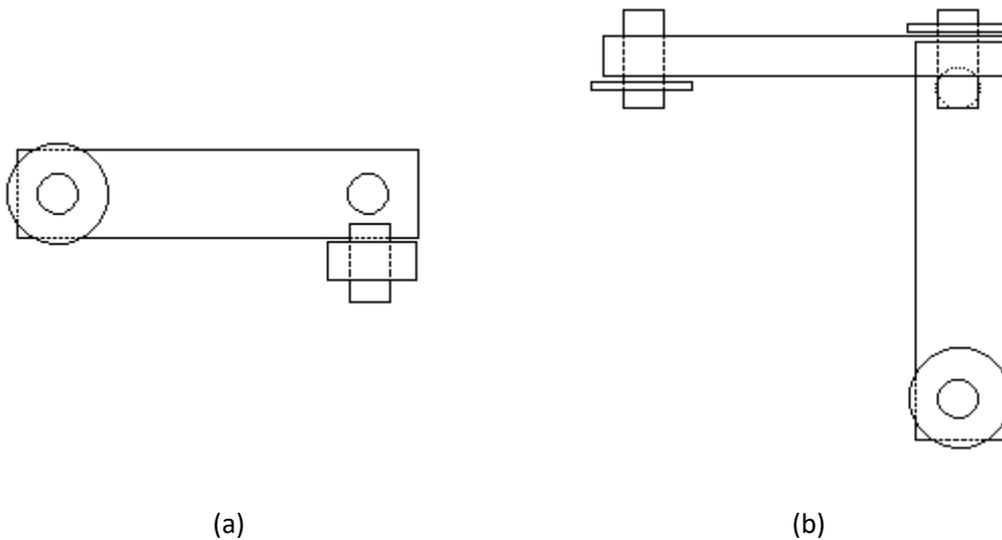
Neste trabalho, as células que captaram as forças horizontais do produto contra a parede interna do silo foram chamadas de CA e numeradas de 1 a 7. Já as células dispostas na tremonha do silo foram identificadas como TA e enumeradas em 1 e 2.

A disposição das células de carga para obtenção das forças exercidas pelo produto armazenado sobre as paredes do silo, seguiu a metodologia sugerida por Couto *et al.* (2012); Couto *et al.* (2013) e aprimorada por Wojcik *et al.* (2017).

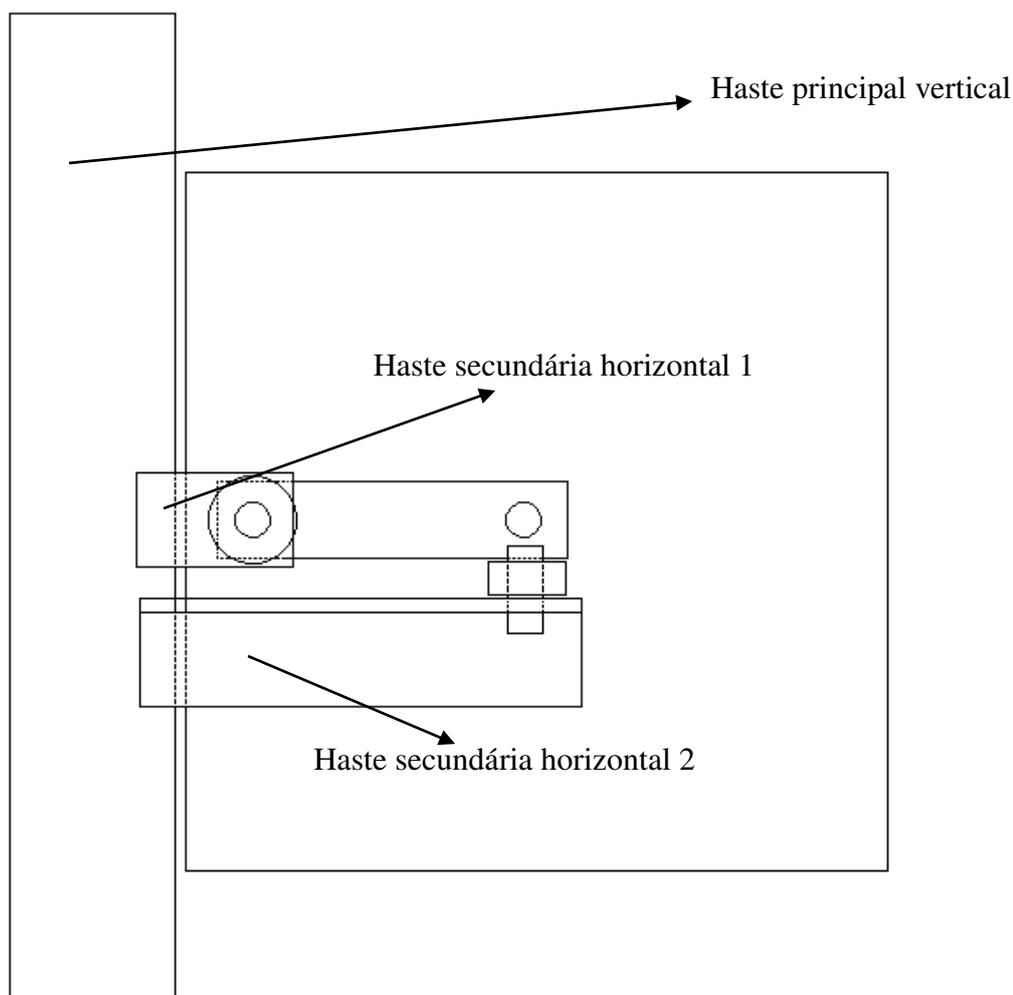
As células foram fixadas na seção quadrada retirada do silo, por meio de um parafuso de bitola 4mm, arruela e porca, como disposto na Figura 12. Esta mesma

célula foi fixada na outra extremidade a um suporte horizontal com furo passante soldado a uma haste vertical principal.

Figura 12 - Células de carga – (a) Vista frontal; (b) Vista superior



A célula CB para captação da força de atrito foi fixada ao suporte horizontal por parafuso e apoiadas sob as células CA sem distanciamento da seção quadrada do silo. As células registraram a força que o produto armazenado exerceu sobre a seção da parede durante o carregamento, tempo de armazenamento e descarregamento, sendo a partir destes dados de força, obtidas as pressões experimentais.

Figura 13 - Disposição das hastes de fixação das células

A haste principal foi parafusada aos flanges superior e inferior do corpo do silo com parafusos de 4mm para maior estabilidade. Tal haste foi confeccionada em aço, em seção quadrada de 4 por 4 cm com pequenos flanges de 8 por 4cm e 2 mm de espessura.

3.6. Execução dos ensaios

Os ensaios de carregamento e descarregamento foram realizados em quintuplicata a fim de se minimizar os erros de execução.

Para o carregamento do silo, foi utilizado um elevador de canecas (Figura 14) propiciando o carregamento o mais concêntrico possível, onde os grãos armazenados inicialmente em sacarias foram despejados saca a saca na moega do elevador.

Já no processo de descarregamento, pelo fato da moega do elevador não comportar todo o produto a ser armazenado, pois no processo de descarregamento o silo

necessitava ser totalmente esvaziado, o milho foi descarregado saca a saca e alojado próximo ao elevador para a retomada do processo de armazenamento, repetindo-se assim este ciclo em todos os ensaios.

Figura 14 – Elevador de canecas



Foram realizados descarregamentos instantâneos, onde o produto manteve-se inerte no interior do silo por aproximadamente uma hora, assim como descarregamentos após três tempos de consolidação, sendo o produto descarregado após 6, 12 e 24 horas respectivamente, após o carregamento do silo.

Após o primeiro carregamento, o produto permaneceu no interior o silo por aproximadamente 1 (uma) hora e só depois, foi descarregado. Este primeiro processo foi denominado como Descarga Instantânea.

O segundo descarregamento ocorreu após 6 horas posteriores ao processo de carregamento do silo, para que houvesse um tempo mínimo de consolidação. Este segundo processo foi denominado Descarga 6 horas. O terceiro processo de descarregamento ocorreu após 12 horas ao carregamento, sendo este denominado Descarga 12 horas. Já o último processo de descarregamento ocorreu após 24 horas ao carregamento, sendo este denominado Descarga 24 horas.

3.7. Determinação das Propriedades Físicas e de Fluxo

Na determinação das propriedades físicas, para a granulometria foi adotado o método do peneiramento, utilizando-se aproximadamente 300g de massa de produto na bateria de peneiras onde permaneceu durante 5 minutos com 10 vibrações por segundo.

A umidade inicial do produto foi analisada com um medidor de umidade portátil AL-101 da empresa Agrológic, para a determinação instantânea do teor de umidade que o produto se encontra.

Para a determinação das propriedades de fluxo tais como o ângulo de atrito interno (ϕ_i), efetivo ângulo de atrito (ϕ_e) e o ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w) utilizou-se o aparelho de cisalhamento direto por translação modelo TSG 70-140, conhecido como “*Jenike Shear Cell*”. Este aparelho é composto por uma célula de cisalhamento de forma cilíndrica, com um anel inferior e um superior que são preenchidos com a amostra do produto a ser cisalhada, um pendural com pesos para a aplicação da força vertical e uma haste para aplicação da força cisalhante (Figura 15).

Figura 15 - Aparelho de cisalhamento utilizando os anéis de Jenike(1964)



A homogeneização e adensamento da amostra se deu por meio de “*twisters*” que consistem em aplicar uma tensão previamente conhecida na amostra com movimentos circulares em 90°. Antes do cisalhamento propriamente dito, a amostra é pré-cisalhada com o mesmo valor de tensão na qual ela foi homogeneizada (MADRONA & CALIL JR., 2009).

Os processos de cisalhamento foram realizados com os níveis de carga expostos na Tabela 5 assim como o cisalhamento para determinação do ângulo de atrito do produto com a parede.

Tabela 5 - Cargas do pré *shear* e *shear*

Carga para Pré <i>Shear</i> (N)	Cargas <i>Shear</i> (N)	Carga para Atrito com a Parede (N)
70	50 – 35 - 20	
50	35 – 20 - 10	50; 40; 30; 20; 10; 4,389
35	20 – 10 – 07	

Fonte: Adaptado de Lopes Neto *et al.* (2009)

A determinação do ângulo de atrito do produto armazenado com a parede a base da célula de cisalhamento foi substituída por uma amostra do material da parede do silo.

Após os ensaios e para análise dos dados obtidos, foi utilizado o *software* Propriedades idealizado por Cheung (2007) para a obtenção das envoltórias de resistência Yield Locus, desenvolvido na linguagem C++ Builder 5.0, que oferece, como principal vantagem, a possibilidade de utilização de componentes visuais e programação contida em sua biblioteca.

Foram criados novos arquivos com dados de tensão normal e de cisalhamento obtidas a partir dos ensaios no *Jenike Shear Cell* para os tempos de armazenamento instantâneo, com 6, 12 e 24 horas. A partir destes arquivos foram plotados gráficos de círculo de Mohr e a partir deles as propriedades de ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito e coesão.

3.8. Determinação das pressões no silo

A partir dos dados de força normal registrados através das células de carga, as pressões horizontais e de atrito obtidas experimentalmente foram determinadas ao se relacionar a força normal à área da seção quadrada extraída do silo.

Posteriormente, as pressões obtidas experimentalmente foram comparadas aos valores das pressões determinadas empiricamente através de equações contidas nas normas estrangeiras AS 3774 (1990) e BS EN 1991/4 (2006) e plotadas em gráficos para a comparação simultânea.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades de fluxo

A partir dos ensaios realizados no “*Jenike Shear Cell*” as propriedades de fluxo (Tabela 6) foram determinadas com o intuito de serem utilizadas na determinação das pressões teóricas propostas pelas normas AS e BS.

Tabela 6 - Propriedades de fluxo de grão de milho em função do tempo

Tempo de Consolidação	γ		ϕ_i		ϕ_e		ϕ_w		C
	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup	
Instantâneo	6,50	7,2	11,8	20,0	18,0	22,2			362,44
6 horas	7,1	7,6	12,6	20,3	20,0	23,2	7,6	8,0	724,61
12 horas	7,3	7,9	13,5	22,0	20,7	26,2			797,48
24 horas	7,4	7,9	19,3	24,2	22,1	27,0			800,45

γ = peso específico consolidado (kN m^{-3}); ϕ_i = ângulo de atrito interno ($^\circ$); ϕ_e = efetivo ângulo de atrito ($^\circ$); ϕ_w = ângulo de atrito do produto com a parede ($^\circ$); C = coesão (kPa)

Ao serem avaliadas as propriedades de fluxo do milho obtidas pelo programa Propriedades, fica evidenciado que quanto maior o tempo de consolidação maior será o ângulo de atrito interno assim como a coesão do produto. Esta progressão pode ser observada também nos trabalhos de Teunou & Fitzpatrick (2000); Fitzpatrick *et al.* (2004); Fitzpatrick *et al.* (2007); Lopes Neto *et al.* (2009) e Fank *et al.* (2015) ao afirmarem que durante o tempo de armazenamento, as forças envolvidas na coesão do produto sofrem acréscimo de forma gradativa. Sendo assim, quanto maiores as forças de interação na coesão dos produtos armazenados, maiores serão as pressões exercidas por tais produtos nas paredes do silo vertical armazenador.

Com relação ao incremento no peso específico ao longo do tempo de armazenamento, Calil Jr e Cheung (2007) afirmam que esta propriedade é afetada pelo nível de tensão atuante e depende diretamente do grau de consolidação do produto. Logo, quanto maior o tempo de consolidação maior será a coesão, e quanto maiores as tensões atuantes na coesão maior será o peso específico do produto. Afirmativa esta apresentada pelo milho em estudo onde apresenta peso específico inicial de aproximadamente $6,9\text{kN/m}^3$ e após a consolidação em 24 horas chega a $7,9\text{kN/m}^3$.

4.2 Pressões

As pressões determinadas experimentalmente foram comparadas entre si sendo relacionadas com o tempo de armazenamento aplicado ao produto e a zona de altura que relaciona o parâmetro H/D. As pressões foram distinguidas em pressões no carregamento e no descarregamento.

Para a situação de silo cheio, parâmetro H/D aproximadamente igual a 4, o comportamento das pressões ao longo do corpo do silo é expresso a partir dos Gráficos 1 e 2 para carregamento e descarregamento respectivamente.

Gráfico 1 - Pressões por tempo de consolidação (Carregamento - H/D igual a 4)

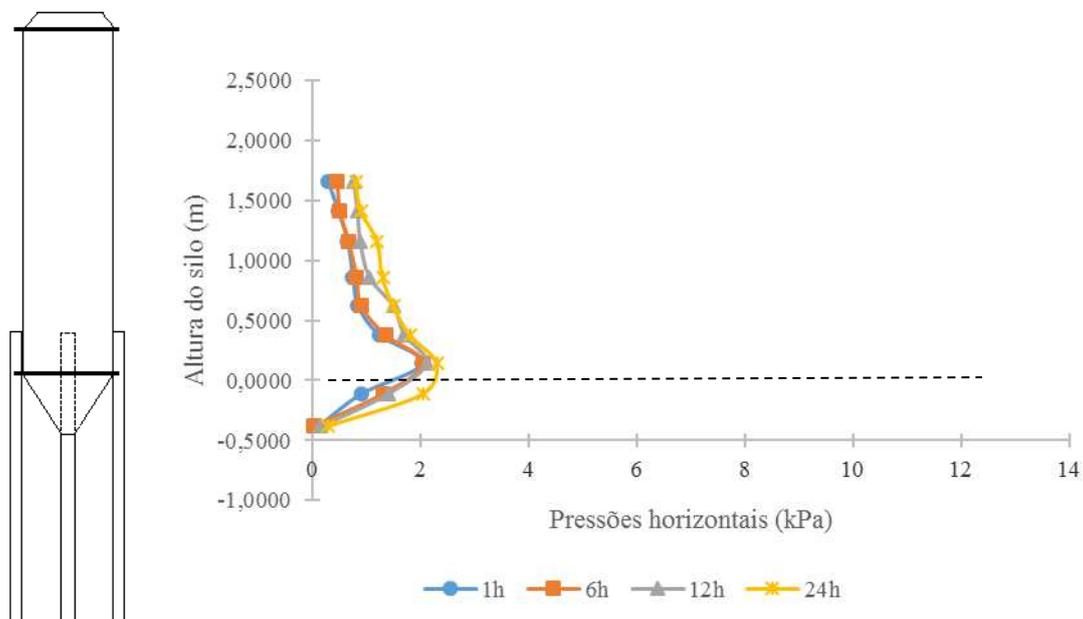
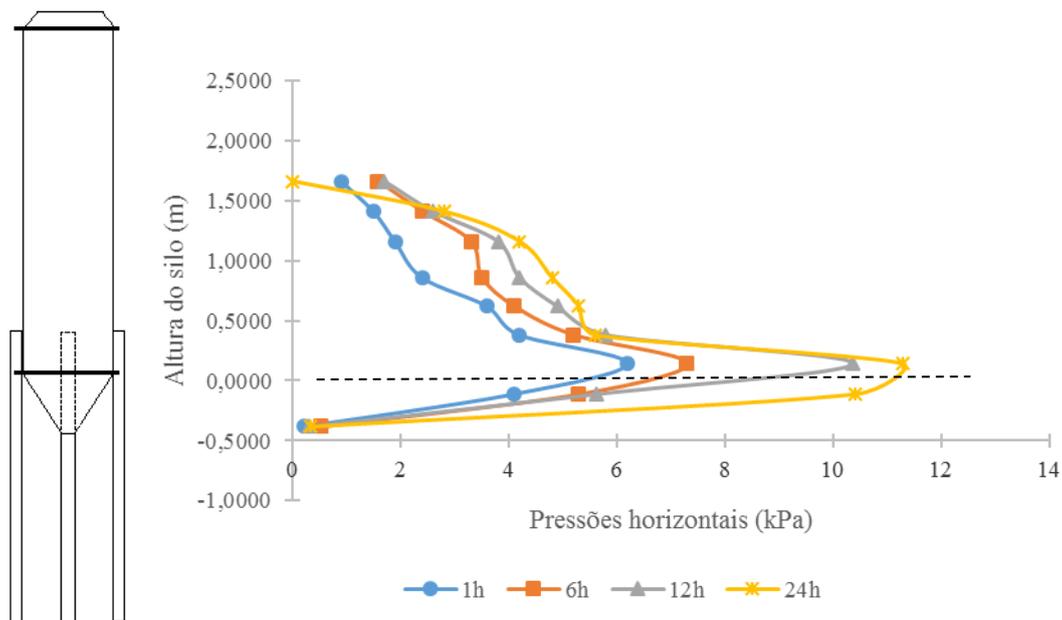


Gráfico 2 - Pressões por tempo de consolidação (Descarregamento - H/D igual a 4)

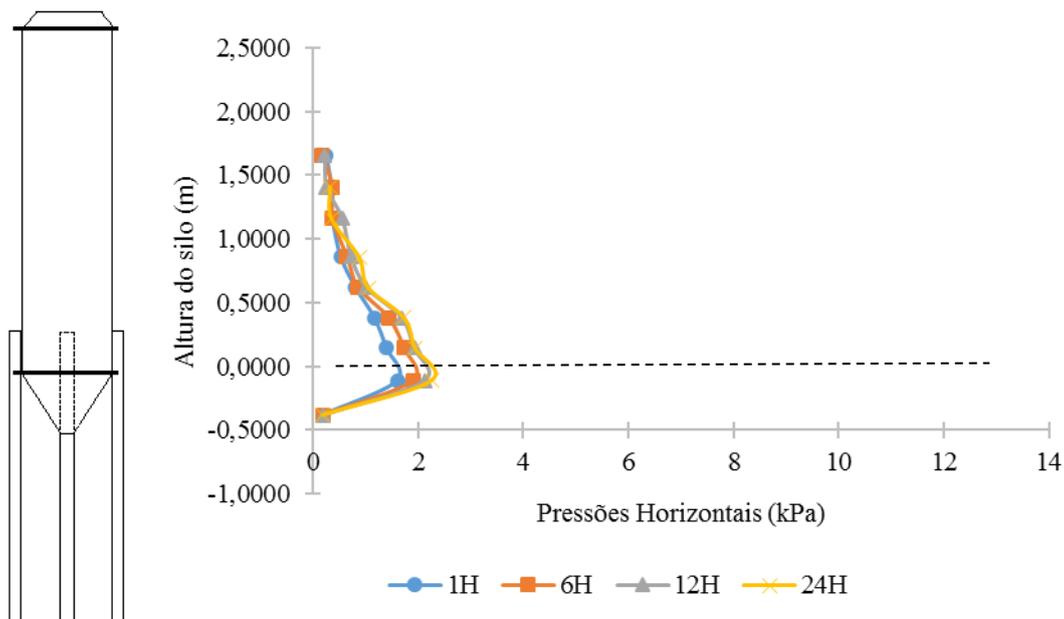


A partir dos gráficos de pressão por tempo de consolidação é possível observar que nas situação de armazenamento do produto por 24 horas, as pressões tanto durante o carregamento quanto no descarregamento são superiores as pressões durante os tempos de armazenamento de 12, 6 e 1 hora, sendo evidenciado o pico de pressão durante o carregamento como sendo ligeiramente abaixo da zona de transição e durante o descarregamento esse pico é mais evidente acima desta zona.

Segundo Rotter (2001), esse fenômeno de aumento de pressão próximo á zona de transição é perfeitamente entendido e esperado pelo fato de que nesta região existe a mudança de sentido e decomposição das tensões normais. Afirma ainda que tal fenômeno pode ser benéfico pois pode auxiliar na redução da compressão circunferencial no anel de transição, diinuindo o raio hidraulico com a adição do anel, o que implicará na redução dos fatores de colapso.

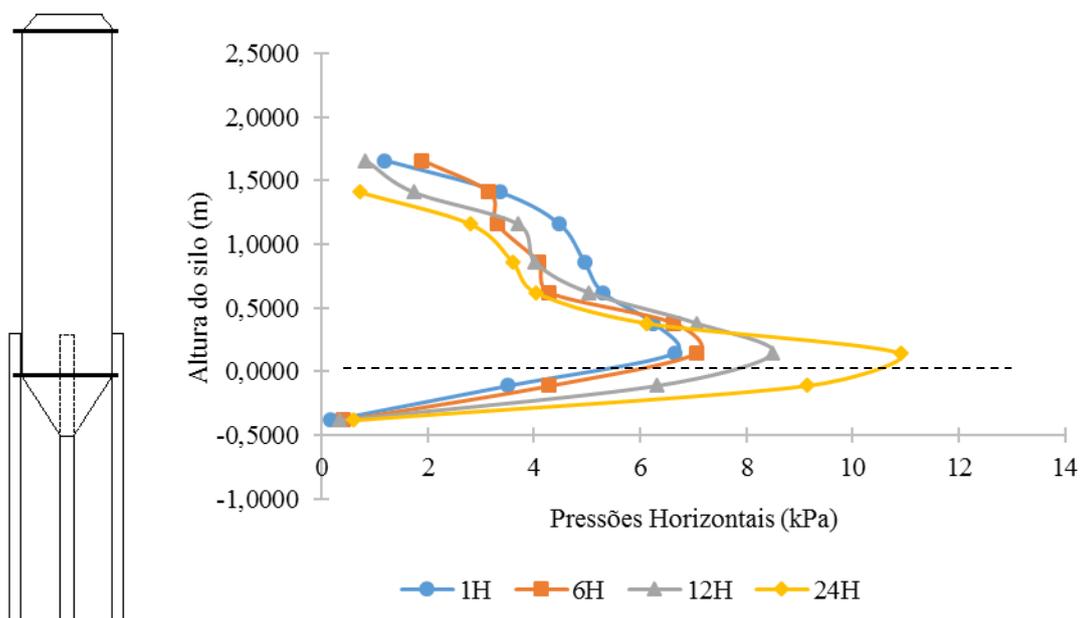
Para a situação do silo na zona 3, ou seja, quando o parâmetro H/D foi igual a três, as pressões de carregamento e descarregamento descritas nos Gráficos 3 e 4 apresentam similaridade no carregamento e descarregamento.

Gráfico 3 - Pressões por tempo de consolidação (Carregamento - H/D igual a 3)



No carregamento do silo até a zona Z3, é fácil notar que as células de carga próximas à zona de transição entre o corpo do silo e a tremonha apresentaram maiores pressões que ficam mais evidentes nos testes para como o produto armazenado por 24 horas. Este fenômeno é esperado, tendo em vista o que a norma AS 3774 prediz com relação ao pico de pressão na zona imediatamente acima e a baixo da zona de transição.

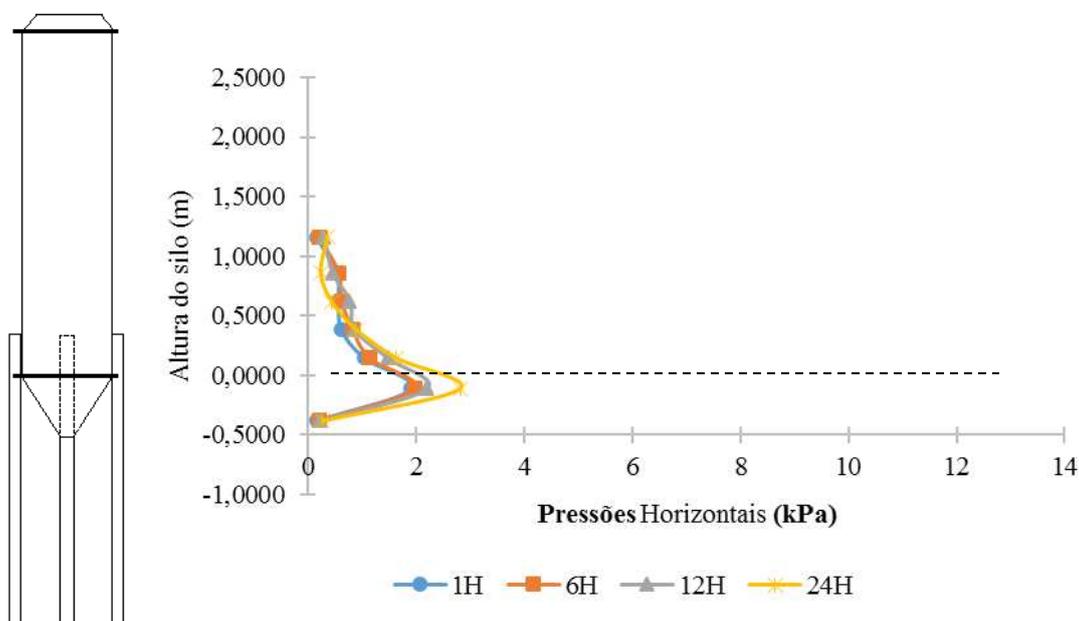
Gráfico 4 - Pressões por tempo de consolidação (Descarregamento - H/D igual a 3)



Não há diferença numérica significativa durante o carregamento com produto armazenado na relação H/D igual a quatro e na relação H/D igual a três pois as células de carga estiveram localizadas abaixo da zona 3. Porém, durante o descarregamento, as pressões com os tempos de 12, 6 e 1 hora de armazenamento são menores na relação H/D igual a três do que na relação H/D igual a quatro pelo alívio da carga normal aplicada acima desta zona.

Quando o silo foi carregado até a zona Z2, ou seja, com a relação H/D igual a dois, as pressões de carregamento foram numericamente similares às encontradas no carregamento quando o silo com relação H/D igual a quatro e H/D igual a três (Gráfico 5).

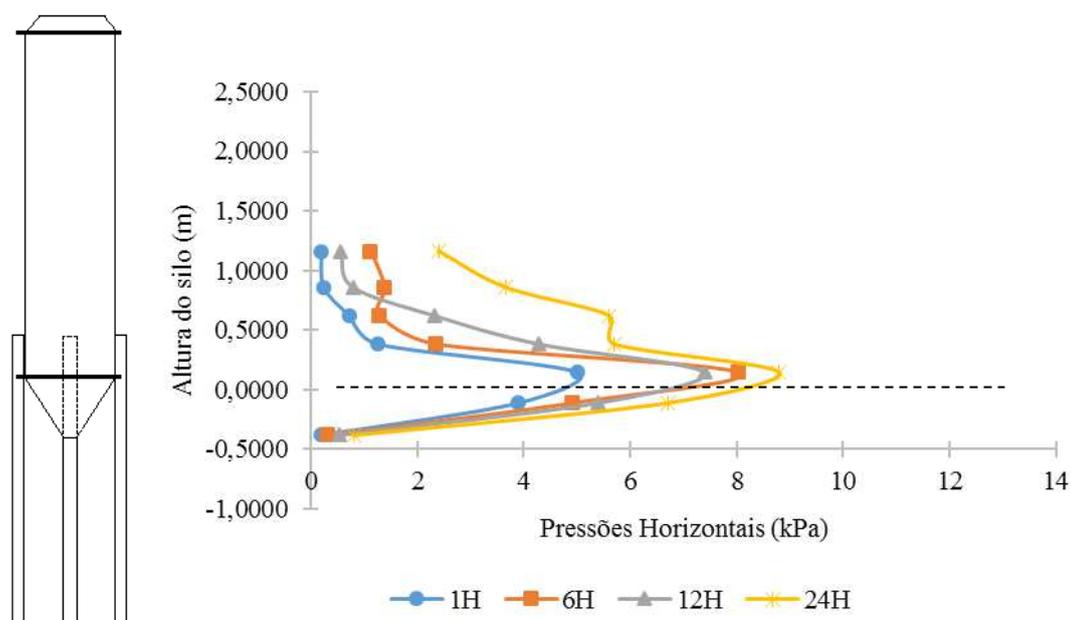
Gráfico 5 - Pressões por tempo de consolidação (Carregamento – H/D igual a 2)



Sabe-se que as pressões que se sobressaem são as encontradas abaixo da zona de transição assim como no carregamento nas demais relações H/D estabelecidas.

Já no descarregamento (Gráfico 6) é importante ressaltar que as pressões observadas com o tempo de armazenamento de 6 e 12 horas foram similares no ponto acima da zona de transição, permanecendo as maiores pressões com o tempo de armazenamento de 24 horas.

Gráfico 6 - Pressões por tempo de consolidação (Descarregamento – H/D igual a 2)



Quando o milho esteve armazenado por 24, 12, 6 e 1 hora no silo nas relações H/D igual a 4, 3 e 2 respectivamente, as pressões durante o descarregamento foram similares numericamente, porém, Lopes Neto *et al.* (2009) e Fank *et al.* (2015) concordam que quanto maior o tempo de armazenamento, maiores sejam as tensões na massa do produto armazenado. Este fenômeno é pouco notado no milho, o que pode ser explicado pelo fato de que a zona infinitesimal estudada do produto quando a relação H/D igual a 4, 3 e 2 sofrem ações de forças normais que são diretamente proporcionais ao acréscimo da relação H/D.

Ao mesmo tempo que o silo ao ser carregado até a zona Z1, quando a relação H/D foi igual a 1, apresenta pressões de carregamento e descarregamento inferiores as pressões nas demais relações H/D (Gráficos 7 e 8).

Gráfico 7 - Pressões por tempo de consolidação (Carregamento – H/D igual a 1)

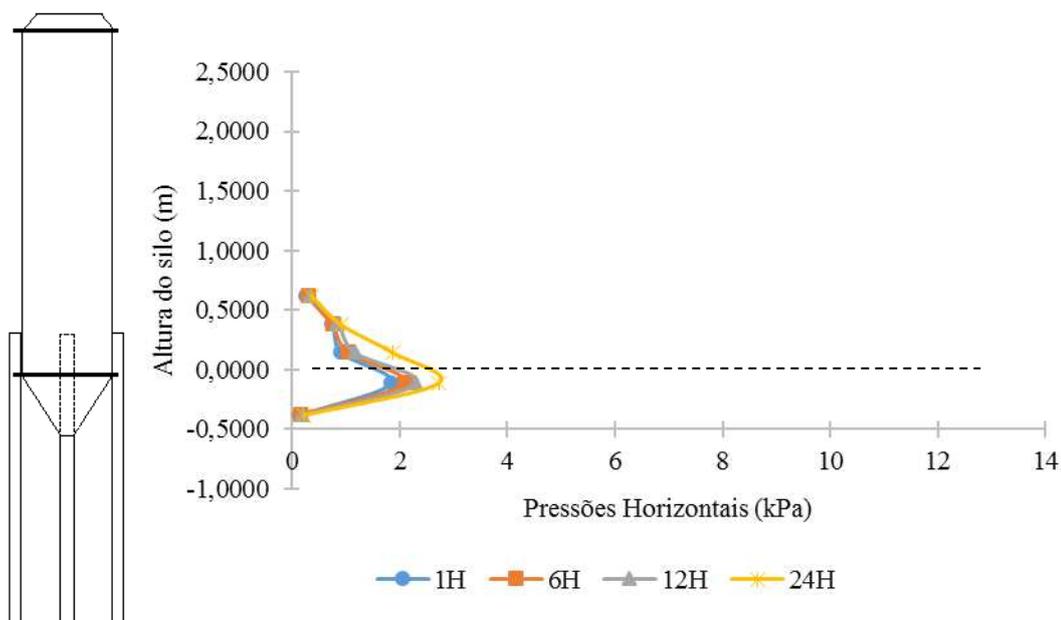
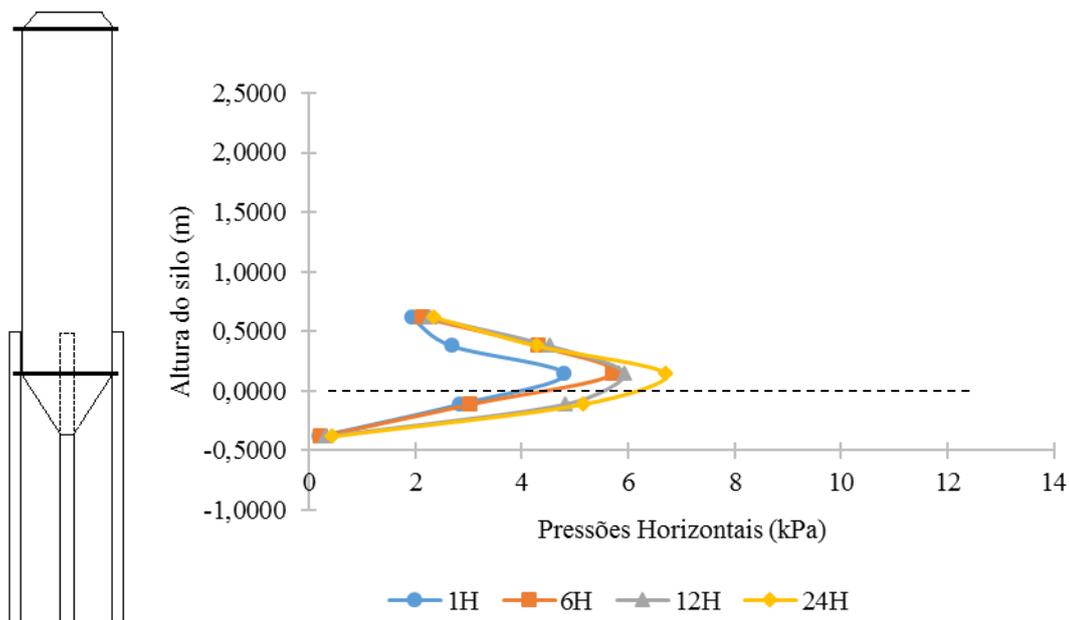


Gráfico 8 - Pressões por tempo de consolidação (Descarregamento – H/D igual a 1)



Nesta relação H/D igual a um, as pressões de descarregamento foram em média 150% inferiores às pressões de descarregamento nas demais relações H/D impostas, sendo assim possível afirmar que para silos classificados pelas normas estrangeiras vigentes, a relação H/D igual a dois, três e quatro não apresentam variações significativas quando aplicadas as condições de parede lisa e tempo de armazenamento.

Como afirmado por Ravenet (1977), as pressões acima da zona de transição estabilizam quando a relação entre H/D é igual a dois. Assim, os resultados encontrados no presente trabalho confirmam tal teoria do autor com relação ao aumento das pressões quando há alteração da relação H/D.

4.3 Comparação por tempo de armazenamento

Sabe-se que as pressões durante o descarregamento são superiores as pressões no carregamento, estando tal afirmativa consistente nas normas AS 3774 e BS 1991/4 assim como nos trabalhos de Couto *et al.* (2013), Wójcik *et al.* (2017) e Fank *et al.* (2018).

A relação entre as pressões horizontais de carregamento e de descarregamento resultam em um coeficiente de sobrepressão (Tabela 7) que, ao ser comparado ao coeficiente sugerido pelas normas AS 3774 e BS EN 1991/4, apresenta valores até 800% superiores aos normatizados.

Com relação a este coeficiente, os valores experimentais apresentados no presente trabalho concordam com o entendimento de diversos autores como Ooi e Rotter (1990) e Calil Junior e Cheung (2007) que concordam que há diferença no coeficiente de sobrepressão da teoria de Janssen, utilizada nas normas estrangeiras vigentes.

Faz-se necessário saber que embora no descarregamento sejam impostos coeficientes de sobrepressão, as pressões ao longo do corpo do silo crescem com o tempo de armazenamento.

Um fator importante sobre as pressões durante o descarregamento serem maiores que as pressões durante o carregamento está ligado à mudança do estado ativo para o passivo alterando assim o comportamento das tensões no interior do silo (KOBYLKA (2017).

Tabela 7 - Pressões horizontais de carregamento e descarregamento e desvio padrão

	Phc	Phd	C_{sobrepressão}
H/D1 – Inst	0,96 ± 0,41	5,02 ± 2,36	4,06 ± 2,06
H/D2 – Inst	1,04 ± 0,41	4,79 ± 2,36	3,75 ± 2,06
H/D3 – Inst	1,40 ± 0,41	8,64 ± 2,36	7,24 ± 2,06
H/D4 – Inst	2,02 ± 0,41	6,20 ± 2,36	4,18 ± 2,06
H/D1 – 6h	1,27 ± 0,41	5,20 ± 2,36	3,93 ± 2,06
H/D2 – 6h	1,14 ± 0,41	5,70 ± 2,36	4,56 ± 2,06
H/D3 – 6h	1,73 ± 0,41	10,06 ± 2,36	8,33 ± 2,06
H/D4 – 6h	2,06 ± 0,41	7,30 ± 2,36	5,24 ± 2,06
H/D1 – 12h	1,38 ± 0,41	5,43 ± 2,36	4,05 ± 2,06
H/D2 – 12h	1,47 ± 0,41	5,92 ± 2,36	4,45 ± 2,06
H/D3 – 12h	1,82 ± 0,41	10,50 ± 2,36	8,68 ± 2,06
H/D4 – 12h	2,11 ± 0,41	10,37 ± 2,36	8,26 ± 2,06
H/D1 – 24h	1,50 ± 0,41	6,50 ± 2,36	5,00 ± 2,06
H/D2 – 24h	1,64 ± 0,41	6,71 ± 2,36	5,07 ± 2,06
H/D3 – 24h	1,94 ± 0,41	10,90 ± 2,36	8,96 ± 2,06
H/D4 – 24h	2,30 ± 0,41	11,30 ± 2,36	9,00 ± 2,06

Phc = pressão horizontal no carregamento; Phd = pressão horizontal no descarregamento; C_{sobrepressão} = coeficiente de sobrepressão.

Hezel (2007) em seu trabalho com simulação das pressões atuantes no corpo de um silo apresenta gráficos próximos aos encontrados no presente trabalho afirmando o fato de que, independente da relação H/D imposta ao projeto do silo, as pressões nas zonas mais baixas próximas ao solo serão as maiores visto a mudança de direção das tensões serem consideradas abruptas no ato da abertura do orifício de descarga para escoamento do produto armazenado.

Nascimento *et al.* (2013), em seu estudo de pressões utilizando duas relações H/D distintas, averiguam que tanto para a relação H/D igual a 1 quanto para a relação H/D igual a 1,5 as pressões normatizadas foram superestimadas quando comparadas às

pressões experimentais. Afirma ainda que as maiores pressões foram encontradas na maior relação H/D, porém, utiliza descarga excêntrica em seu trabalho, diferente da descarga utilizada no presente trabalho porém, com resultados semelhantes.

4.4 Comparação experimental *versus* normas estrangeiras

Ao comparar-se individualmente as pressões de carregamento e descarregamento experimentais com as pressões teóricas desenvolvidas a partir da resolução das equações normatizadas pode-se observar que para a situação de carregamento, os valores calculados pelas normas AS 3774 e BS 1991/4 foram superiores aos experimentais.

Gráfico 9 - Comparação de pressões experimentais e normatizadas (Carregamento/Descarregamento - Instantâneo - H/D igual a 4)

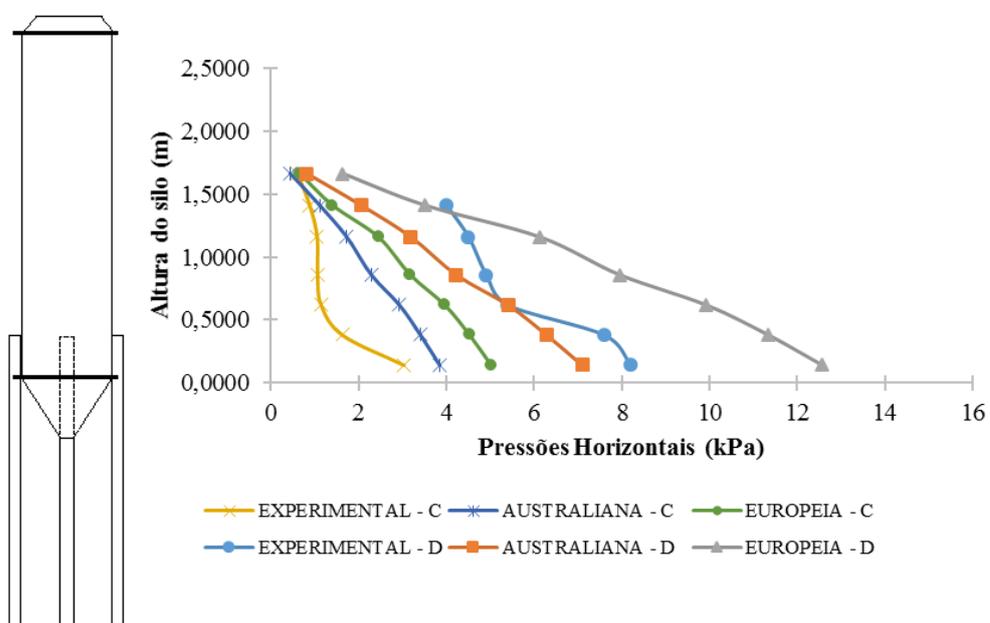
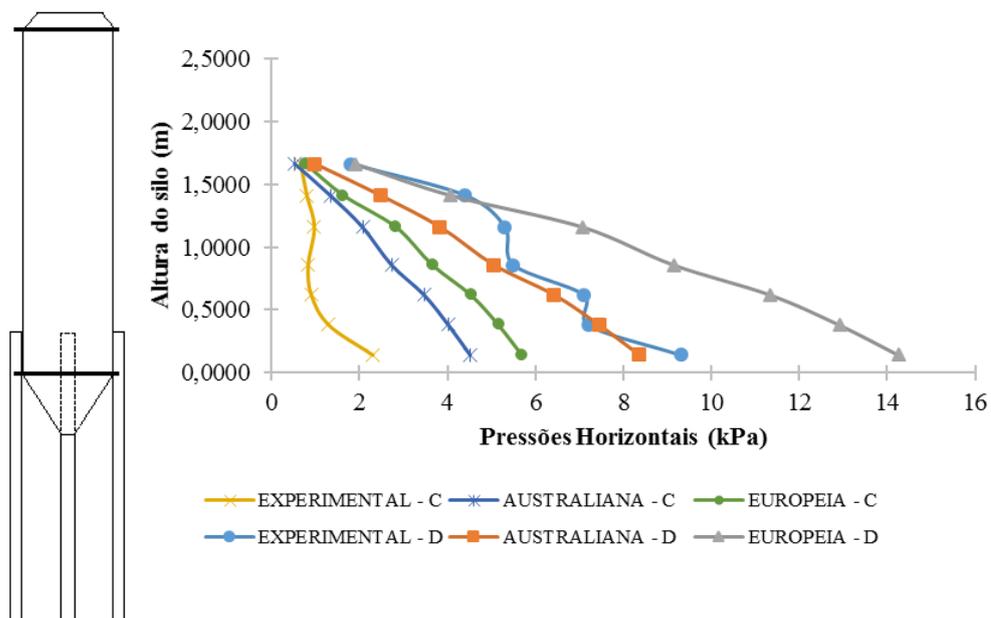


Gráfico 10 - Comparação de pressões experimentais e normalizadas (Carregamento/Descarregamento -6horas - H/D igual a 4)



Comparando os gráficos gerados com os dados experimentais com tempo de armazenamento de uma hora – Instantâneo (Gráfico 10) e de seis horas (Gráfico 11), é notório que as pressões durante o carregamento nestas duas situações de tempo de armazenamento são similares, havendo diferença apenas nas pressões de descarregamento pelo fato de haver acomodação e consolidação do produto armazenado.

Couto *et al.* (2013) encontram variações similares com relação ao aumento dos valores obtidos através da norma BS EN 1991/4 quando comparados aos valores experimentais, sendo os valores normalizados até 150% superiores aos experimentais durante o descarregamento. No presente trabalho, esta diferença também foi de aproximadamente 150% entre os valores normalizados e experimentais.

A norma AS 3773 também majora seus valores de pressões no descarregamento, porém, apresentando aumento de até 80% entre os valores experimentais e normalizados, sendo possível assim, afirmar que, no uso de normas estrangeiras para determinação das pressões horizontais em um silo com características de parede lisa, relação H/D igual a 4 e tempo de armazenamento de instantâneos a 6 horas, a norma AS 3774 é a mais indicada entre as duas normas utilizadas como parâmetro.

Quando o tempo de armazenamento varia entre 12 e 24 horas, as pressões durante o carregamento foram idênticas assim como nos demais tempos de armazenamento, havendo alterações durante o descarregamento como nos Gráficos 11 e 12.

Gráfico 11 - Comparação de pressões experimentais e normatizadas (Carregamento/Descarregamento – 12horas - H/D igual a 4)

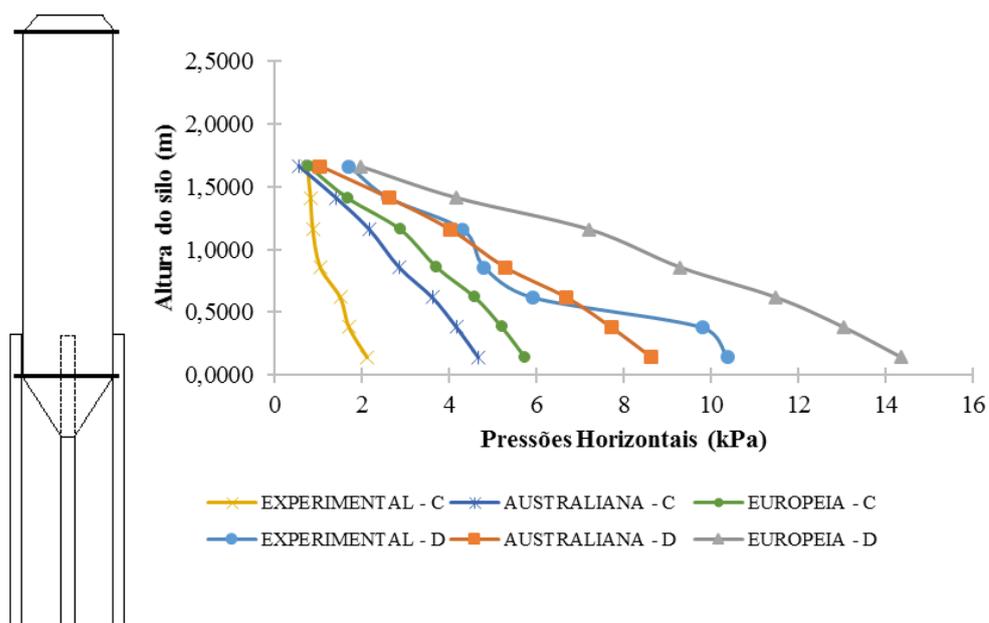


Gráfico 12 - Comparação de pressões experimentais e normatizadas (Carregamento/Descarregamento – 24horas - H/D igual a 4)

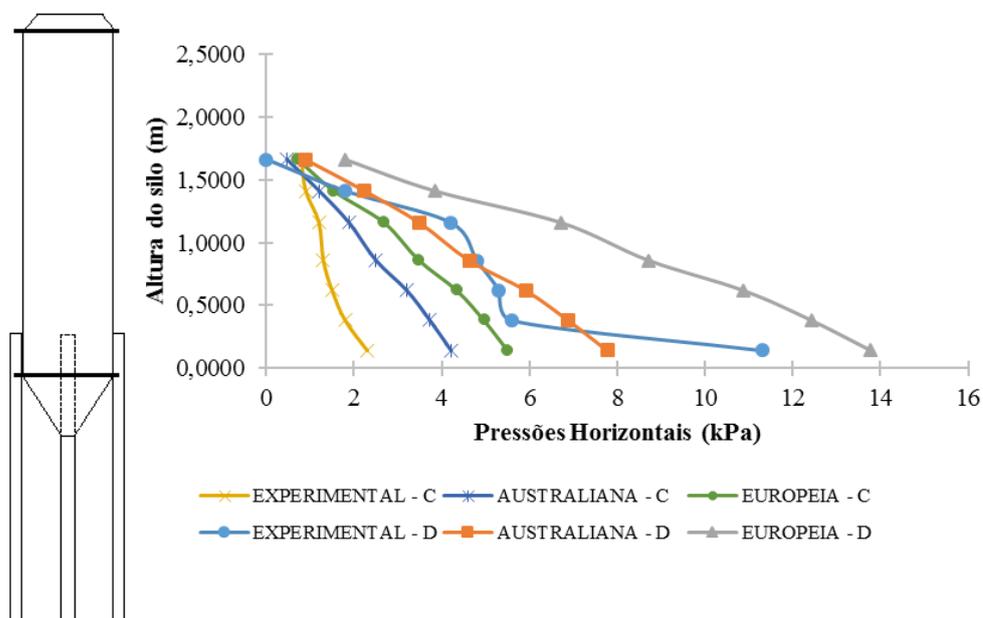


Gráfico 14 - Comparação de pressões experimentais e normatizadas (Carregamento/Descarregamento – 6horas - H/D igual a 3)

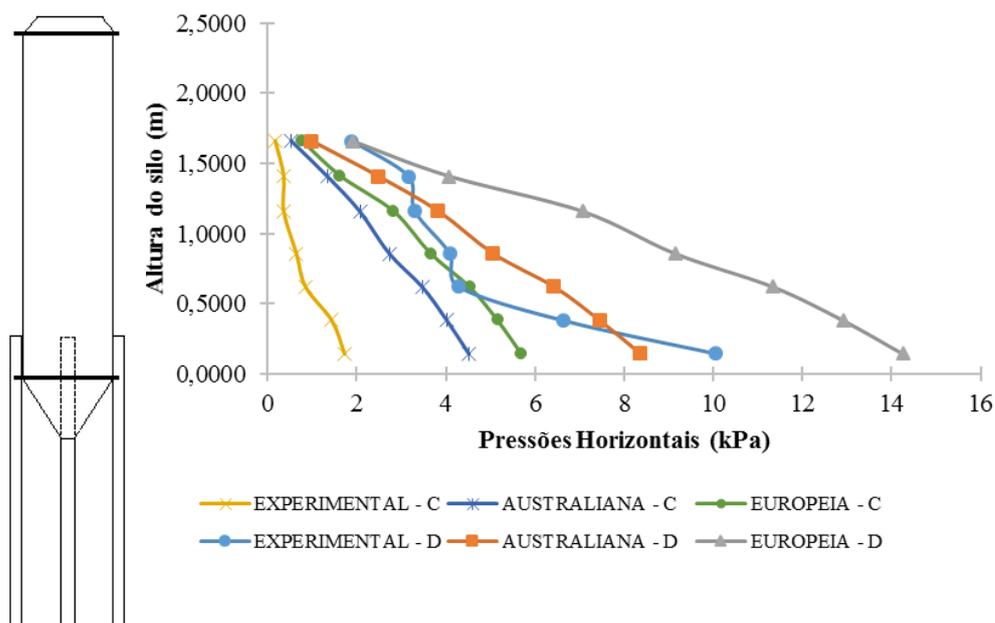


Gráfico 15 - Comparação de pressões experimentais e normatizadas (Carregamento/Descarregamento – 12horas - H/D igual a 3)

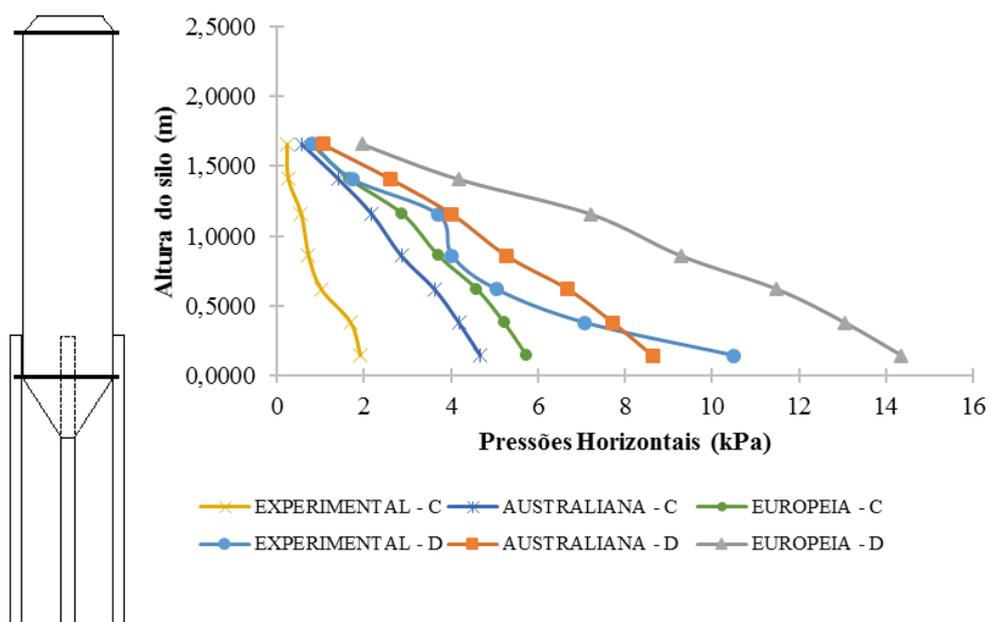
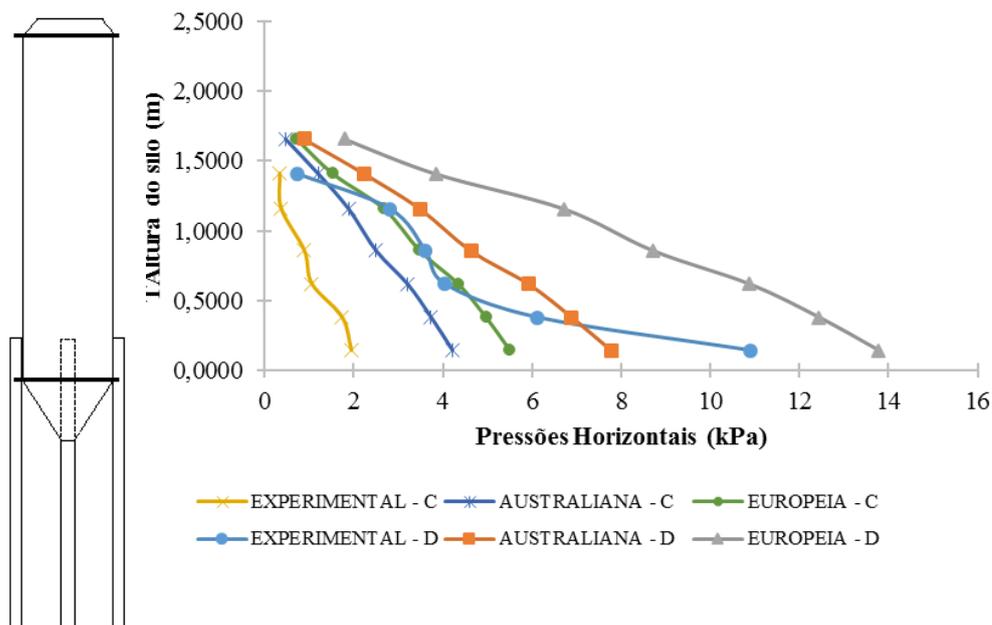


Gráfico 16 - Comparação de pressões experimentais e normatizadas (Carregamento/Descarregamento – 24horas - H/D igual a 3)



Assim como na relação H/D igual a quatro, as pressões experimentais durante o descarregamento com o silo na relação H/D igual a tres, foram mais aproximadas da norma AS 3774 do que as pressões determinadas a partir da norma BS EN 1991/4.

Afirmativa similar pode ser observada com a imposição das relação H/D igual a dois e igual a um (Gráficos 17 a 24).

Gráfico 17 - Comparação de pressões experimentais e normatizadas (Carregamento/Descarregamento - Instantâneo - H/D igual a 2)

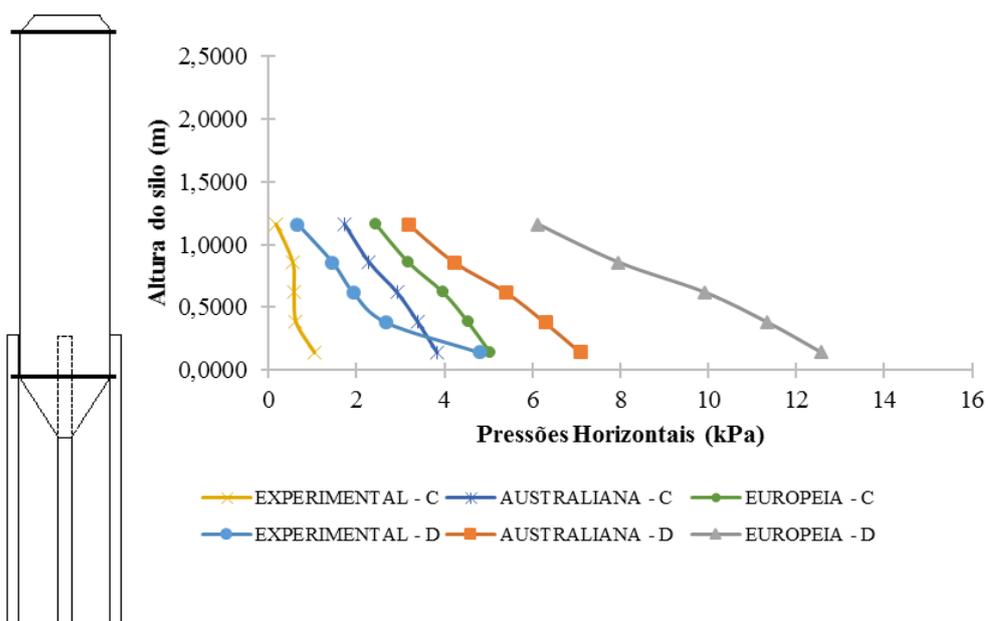


Gráfico 18 - Comparação de pressões experimentais e normatizadas (Carregamento/Descarregamento - 6horas - H/D igual a 2)

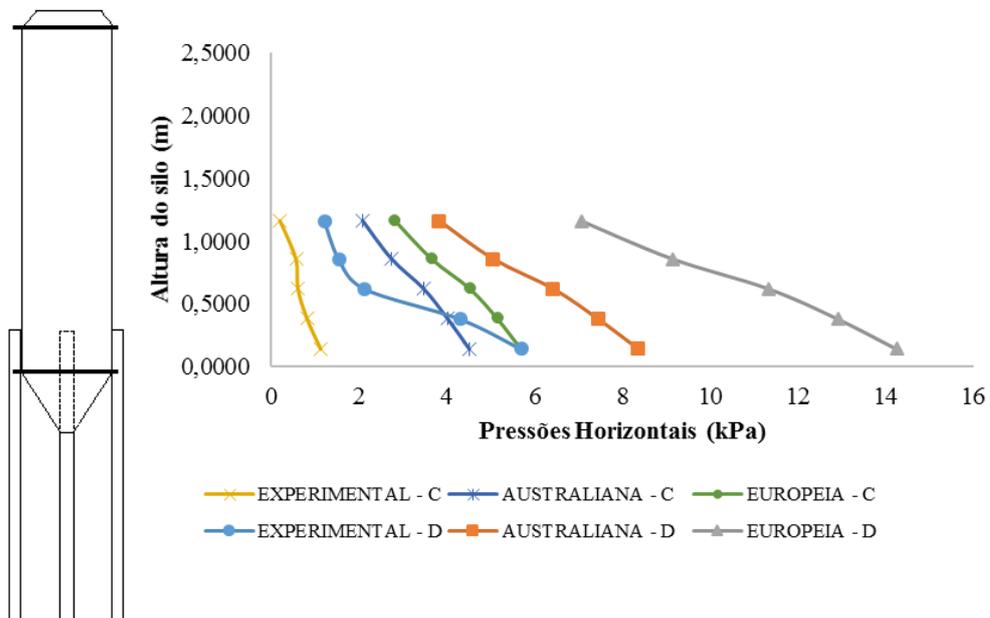


Gráfico 19 - Comparação de pressões experimentais e normatizadas (Carregamento/Descarregamento - 12horas - H/D igual a 2)

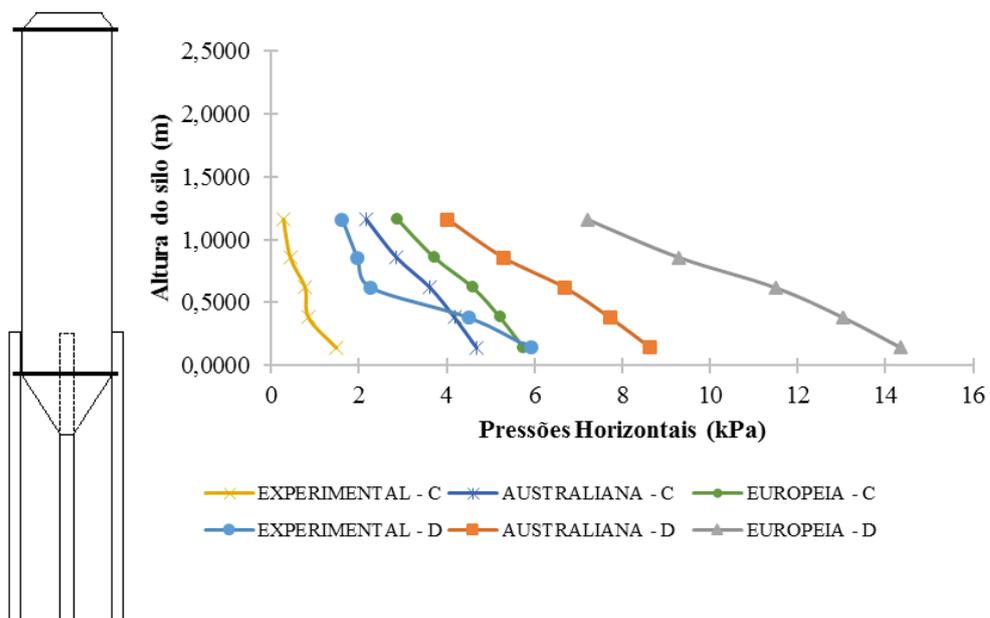


Gráfico 22 - Comparação de pressões experimentais e normatizadas (Carregamento/Descarregamento - 6horas - H/D igual a 1)

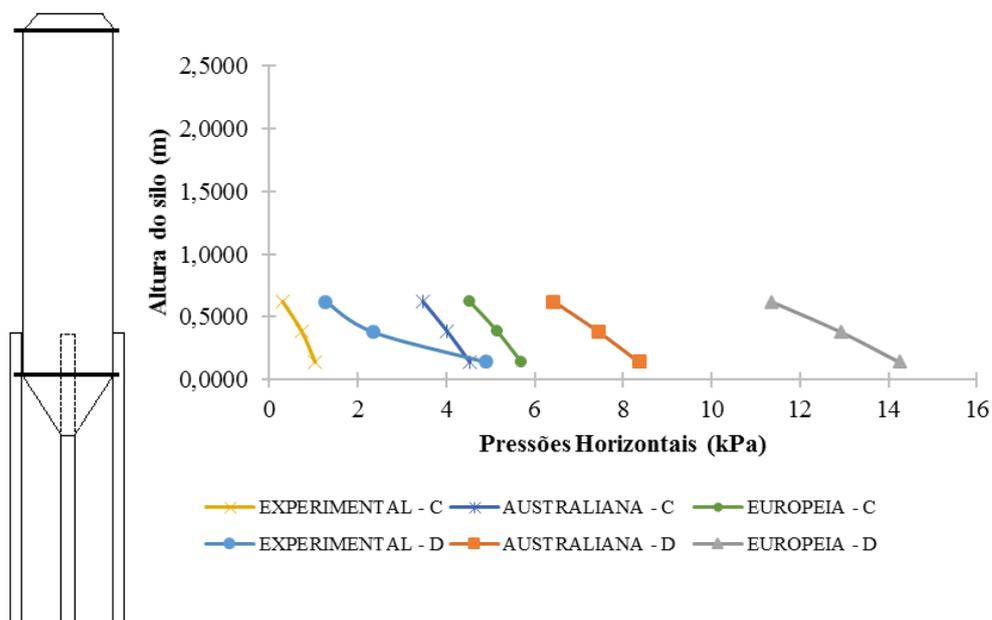


Gráfico 23 - Comparação de pressões experimentais e normatizadas (Carregamento/Descarregamento - 12horas - H/D igual a 1)

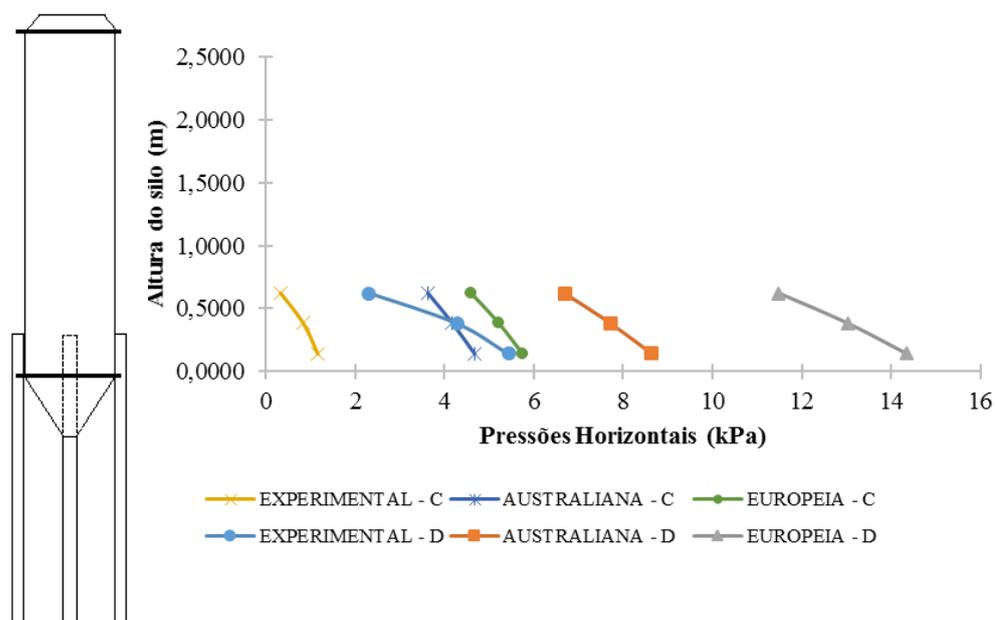
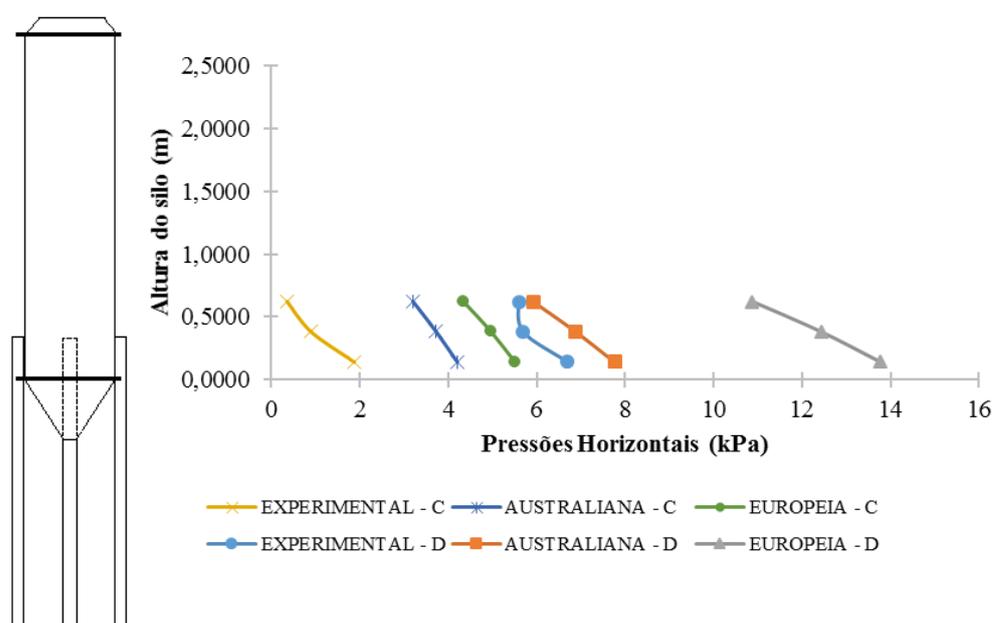


Gráfico 24 - Comparação de pressões experimentais e normatizadas (Carregamento/Descarregamento - 24horas - H/D igual a 1)



Nota-se que as pressões experimentais durante o descarregamento quando a relações H/D foram iguais a dois e a um, foram menores que as pressões quando a relação H/D igual a três e igual a quatro, pelo fato de que há um alívio nas cargas horizontais normais impostas a massa de produto tendo em vista que a quantidade de produto armazenado diminui com a diminuição da relação H/D.

Couto *et al.* (2013), Gallego (2015), Wójcik *et al.* (2017) e Fank *et al.* (2018) em seus trabalhos também observam a superioridade nas pressões teóricas quando comparadas as pressões experimentais, sendo aceita a afirmativa de que o coeficiente de segurança utilizado na determinação das pressões majora estas extrapolando-as da realidade constatada experimentalmente.

Por influência do tempo de armazenamento na determinação das pressões ao longo do corpo do silo, Couto *et al.* (2013) estudando o comportamento das pressões exercidas pelo milho em um silo vertical, afirmam não existir influência direta entre o tempo de armazenamento e o aumento das pressões no descarregamento, porém, esta afirmativa não foi constatada no presente trabalho pois é há acréscimo das pressões de descarregamento quanto maior for o tempo de armazenamento do produto em estudo pois, quanto maior o tempo que o produto passa no interior do silo, melhor será o

arranjo das partículas, havendo assim o aumento do peso específico e consequentemente, aumento das pressões.

Assim, as pressões teóricas foram recalculadas com e sem o coeficiente de segurança de 1,25 sugerido pela norma AS3774 e de 1,10 segundo a norma BS 1991/4, (Tabela 10 e 11 – Apêndice A), porém, mesmo sem o coeficiente de segurança, as pressões normatizadas foram superiores em até 60% das experimentais.

Como análise geral desta comparação entre pressões experimentais e normatizadas, os silos com maior relação H/D (três e quatro), apresentam maiores pressões de descarregamento, sendo a norma AS 3774 a mais indicada para a determinação das pressões em um silo com características similares as do silo em estudo.

4.5 Pressões de Atrito

Durante o carregamento e descarregamento, foram avaliadas ainda as pressões de atrito nas situações de relação H/D igual a 4, 3, 2 e 1 respectivamente, como indicados nos Gráficos de 25 a 32 seguintes.

Assim como nas pressões horizontais, Palma (2008) afirma que pelo não conhecimento integral das ações durante o processo de descarregamento, as normas estrangeiras adotam coeficientes de segurança para a determinação das pressões de atrito ao longo do corpo do silo, porém, como as pressões normatizadas ainda permaneceram superiores as pressões de atrito experimentais, os gráficos analisados continham o coeficiente de segurança, sendo os gráficos sem o coeficiente inseridos no Apêndice A.

Gráfico 25 - Pressões de atrito com silo relação H/D igual a 4 (Carregamento)

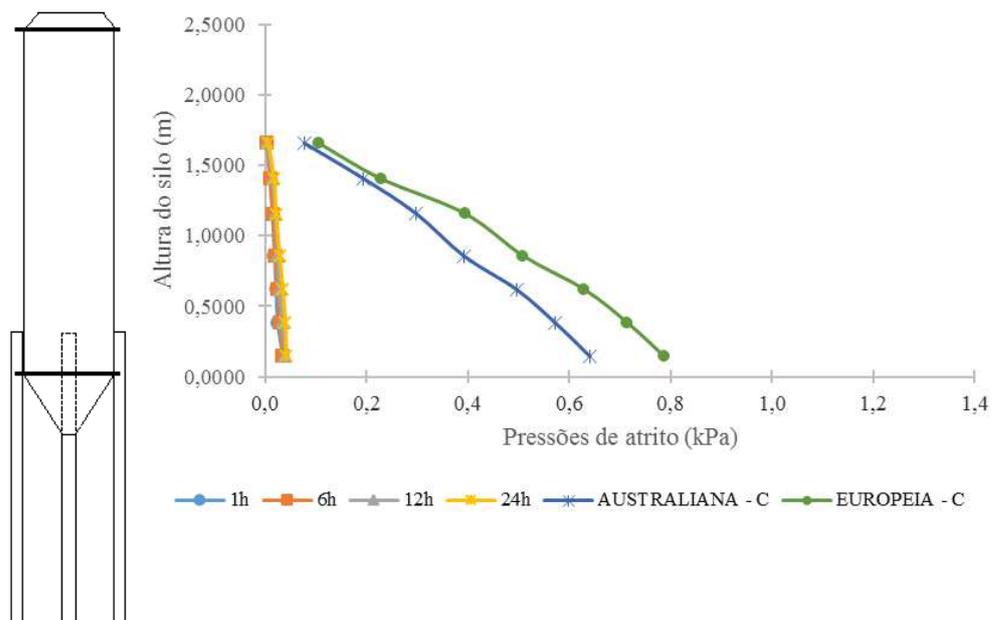
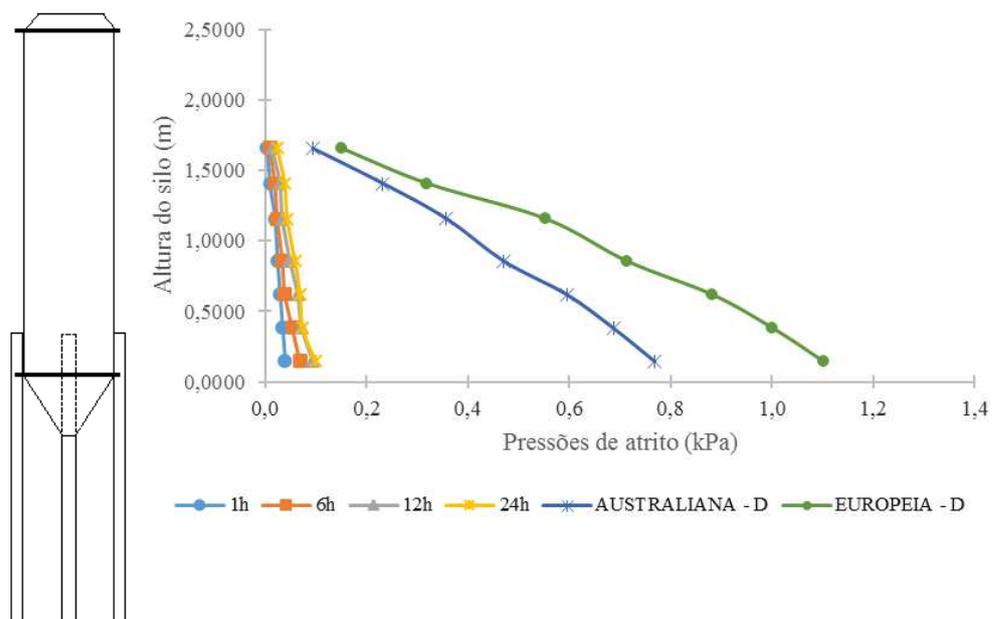
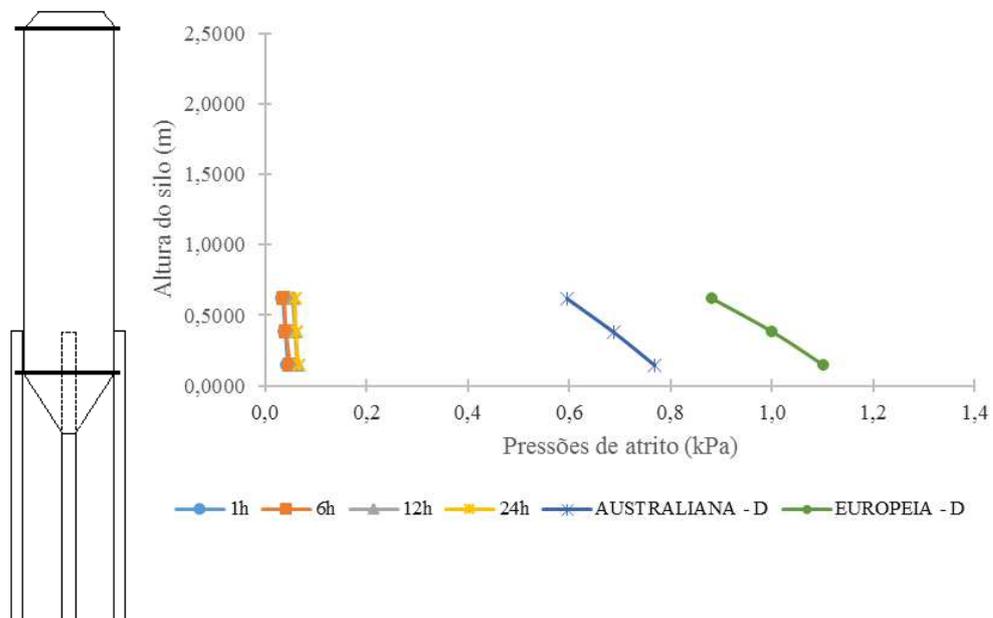


Gráfico 26 - Pressões de atrito com silo relação H/D igual a 4 (Descarregamento)



A partir da comparação entre os dados obtidos através dos gráficos 17 e 18 para as pressões de atrito entre o carregamento e o descarregamento, é evidenciado o fato de que as pressões de atrito são maiores no descarregamento que no carregamento quando relacionadas ao tempo de armazenamento do produto,

Gráfico 32 - Pressões de atrito com silo relação H/D igual a 1 (Descarregamento)



Assim, pode-se afirmar que a relação H/D imposta não alterou com significância as pressões de atrito entre o produto e a parede do silo, sendo as maiores pressões de atrito na relação H/D igual a quatro e as menores pressões de atrito quando H/D igual a um, onde em todos os casos as pressões de atrito experimentais inferiores às pressões de atrito teóricas.

5. CONCLUSÕES

Diante dos estudos realizados e dos dados obtidos, conclui-se que as propriedades de fluxo do milho tais como ângulo de atrito interno, peso específico e coesão são maiores quanto maior é o tempo de armazenamento, estando em média 50% superior os valores das propriedades no tempo de armazenamento instantâneo.

As pressões experimentais ao serem comparadas quanto ao tempo de armazenamento e a relação H/D imposta apresentaram valores que, assim como as propriedades de fluxo, aumentaram em consórcio ao aumento do tempo de armazenamento e da relação H/D.

Numericamente, a relação H/D apresenta influência direta nas pressões horizontais onde, para a relação igual a 4 (silo cheio) em todos tempos de armazenamento, as pressões foram maiores que as demais.

Outra conclusão é que as pressões de atrito, no geral, foram maiores no descarregamento que durante o carregamento, porém, não apresentaram diferenças numéricas significativas quando impostas relações H/D distintas podendo ser afirmado que as pressões de atrito no presente estudo, independem da relação H/D do silo.

Quando comparadas às normas AS 3774 e BS 1991/4, as pressões experimentais apresentam valores até 70% inferiores aos normatizados, porém, durante o descarregamento, as pressões experimentais se aproximaram numericamente das pressões teóricas.

Apesar da exclusão dos coeficientes de segurança das normas AS 3774 e BS 1991/4, as pressões determinadas teoricamente a partir delas são expressivamente maiores que as pressões experimentais para o carregamento.

Assim, a partir das pressões que o produto exerce sobre as paredes do silo em estudo no presente trabalho, será possível a elaboração do projeto de um silo em verdadeira grandeza com características semelhantes as adotadas aqui, com garantias de preservação das propriedades físicas do produto armazenado e estabilidade estrutural do sistema.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como trabalhos futuros a determinação das pressões verticais durante o carregamento e descarregamento do silo em estudo utilizando células de pressão na base das colunas do silo.

Outra sugestão seria quanto à averiguação do padrão de fluxo e à vazão mássica durante os processos de carregamento e descarregamento.

Uma terceira sugestão é a determinação das pressões horizontais e de atrito com o silo com as mesmas dimensões, porém, com paredes onduladas e em zigue zague para confronto com os valores de pressão obtidos no presente trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AS 3774. Australian Standard. Loads on bulk containers. Sydney: Australian Standard, 62p., 1990.
- Ai, J.; Chen, J.F.; Ooi, J.Y. Finite element simulation of the pressure dip in sandpiles, *Int. J. Solids Struct.* V.50, p.981–995, 2013.
- Baikov, V. N. Reinforced concret structures. Mir Publishers, p. 266-273, 1978.
- Batista, Claudia da Silva. Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulados em silos verticais. Tese de Doutorado. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2009.
- Benink, E.J. Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes. Doctoral Thesis. Netherlands: Universiteit Twente, 162p., 1989.
- Brasil. Decreto no 3.855, de 3 de julho de 2001. Regulamenta a Lei no 9.973, de 29 de maio de 2000. Brasília, 2001.
- BS EN 1991-4- Eurocode 1. Actions on structures. Silos and tanks. 112p., 2006.
- Calderón, C. A.; Olivares, M. C. V.; Unac, R. O.; Vidales, A. M. Correlations between flow rate parameters and the shape of the grains in a silo discharge. *Powder Technology*, v. 320, p. 43–50, 2017.
- Calil Junior, C. Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais. Tese de Doutorado. São Carlos: Universidade de São Paulo, 198p., 1990.
- Calil Jr, C.; Nascimento, J. W. B.; Araújo, E. E. Silos metálicos multicelulares. São Carlos, EESC/USP, 175p., 1997.
- Calil Junior, C.; Cheung, A. B. Silos: Pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. São Carlos, Universidade de São Paulo, 240 p., 2007.
- Camargo F. L.; Sanchez C. G. Novo Alimentador de Bagaço de Cana. *Bioenergia em Revista: Diálogos*. São Paulo, 2011.
- Cheung, A. B. Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Paulo, 2007.
- Coelho, L. C. Software para cálculo de fluxo e pressões em silos cilíndricos metálicos para armazenamento de produtos agrícolas e industriais. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, 2016.
- CONAB. Boletim safra de grãos de milho, 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>.
- Couto, A.; Ruiz, A.; Aguado P.J. Design and instrumentation of a mid-size test station for measuring static and dynamic pressures in silos under different conditions – Part I: Description. *Computers and Electronics in Agriculture*, p.164–173, 2012.
- Couto, A.; Ruiz, A.; Herráez, L.; Moran, J.; Aguado, P. J. Measuring pressures in a slender cylindrical silo for storing maize. Filling, static state and discharge with different material flow rates and comparison with Eurocode 1 part 4. *Computers and Electronics in Agriculture*. v. 96, p. 40–56, 2013.
- Ding, S.; Rotter, J. M.; Ooi, J. Y.; Enstad, G.; Xub, D. Normal pressures and frictional traction on shallow conical hopper walls after concentric filling: Predictions and experiments. *Chemical Engineering Science*, p. 264–272, 2013.
- Ding, S.; Ji, Y.; Senbin, Y.; Rotter, J.M.; Li, Q. Measurements of pressure and frictional tractions along walls of a large-scale conical shallow hopper and comparison with Eurocode 1991-4:2006. *Thin-Walled Structures*, p. 231–238, 2014.

- Fank, M. Z.; Christ, D.; Cardoso, D. L.; Willrich, F. L.; Lorenzi, V. Coeficiente de transferência de carga nas fundações de silos verticais cilíndricos *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, p. 887–891, 2015.
- Fank, M. Z.; Nascimento, J.W. B.; Cardoso, D. L.; Meira, A. S.; Willrich, F. L. Vertical pressures and compressive friction force in a large silo. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v.38, n.4, p.498-503, 2018.
- Fitzpatrick, J. J.; Iqbal, T.; Delaney, C.; Twomey, T.; Keogh, M. K. Effect of powder properties and storage conditions on the flowability of milk powders with different fat contents. *J. Food Eng.* V.64, p. 435–444, 2004.
- Fitzpatrick, J. J.; Barry, K.; Cerqueira, P. S. M.; Iqbal, T.; O’neill, J.; Roos, Y. H. Effect of composition and storage conditions on the flowability of dairy powders. *Journal of Food Engineering*, v.17, p.328-392, 2007.
- Fujimoto, C. P. Comportamento estrutural de silo unicelular cilíndrico de concreto armado: análise comparativa entre sistema de cone invertido e sistema convencional. 137f. Dissertação de Mestrado. Universidade de Campinas, 2018.
- Gallego, E.; Ruiz, A.; Aguado, P. J. Simulation of silo filling and discharge using ANSYS and comparison with experimental data. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.118, p. 281–289, 2015.
- Garbaza, I. E. Programa computacional para cálculos de pressões em silos verticais de acordo com a norma australiana. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras, 2011.
- Goodey R. J.; Brown, C. J.; Rotter J. M. Rectangular steel silos: Finite element predictions of filling wall pressures. *Engineering Structures*, v.132, p.61–69, 2017.
- Hezel, C. R. Avaliação das pressões em silos verticais conforme diferentes normas internacionais. Dissertação de Mestrado – UNIOESTE, Cascavel, 2007.
- Horabik, J.; Molenda, M. Distribution of static pressure of seeds in a shallow model silo. *Int. Agrophys.*, v.31, p.167-174, 2017.
- Janssen, H. A. Versuche über Getreidedruck in Silozellen. *Z. Ver. Dtsch. Ing.*, p. 1045–1049, 1895.
- Jenike, A. W. Storage and flow of silos. Salt Lake City: University of Utah, 89p., 1964.
- Jenike, A. W.; Johanson, J.R. Bulk Solids Handling Survey. Flow of solids newsletter. East Coast, USA, 1968.
- Jenike, A. W.; Johanson, J. R.; Carson, J. W. Bin loads in 3 parts. *Journal of engineering for Industry, ASCE*, v.95. p. 1-5, 6-12, 13-20, 1973.
- Kejin, L.; Zhaoran, X.; Shihao, W. Development of arching and silo wall pressure distribution in storage and discharging state based on discrete element analysis. Chinese Society of Agricultural Engineering - CNKI, China, 2018.
- Kobyłka, R.; Molenda, M. DEM simulations of loads on obstruction attached to the wall of a model grain silo and of flow disturbance around the obstruction. *Powder Technology*, v. 256, p.210–216, 2014.
- Kobylka, R.; Horabik, J.; Molenda, M. Numerical simulation of the dynamic response due to discharge initiation of the grain silo. *International Journal of Solids and Structures*. V. 106–107, p. 27-37, 2017.
- Kock, M. A. Dimensionamento de um silo metálico com fundo plano para armazenamento de soja. Trabalho de Conclusão de curso. Universidade tecnológica do Paraná – Pato Branco, 2018.
- Koenen, M. Berechnung des Seiten und Bodendrucks in Silos (Calculation of side and floor pressure in silo walls). *Zentralbl. Bauverwaltung*, p. 446–449, 1895.

- Ledo, R. C.; Cheung, A. B.; Silva, J. G. Development of an equipment to obtain the relation between the horizontal and vertical pressure in silos. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v.38, n.4, p.491-497, 2018.
- Lobato, M.; Mascarenhas, F. P.; Mesquita, A. L. A. Conical hopper design for mass flow – case of red mud j. C. HOLOS, 2016.
- Lohnes, R. A. Lateral stress ratios for particulate materials. *Powder Handlings Processing, Michigan*, p. 331-336, 1993.
- Lopes Neto, J. P.; Silva, V. R. da; Nascimento, J. W. B. do. Propriedades de fluxo de produtos pulverulentos alimentícios. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, p. 639-644, 2009.
- Lopes Neto, J. P.; Nascimento J. W. B. do. Características de fluxo e projeto de tremonhas cônicas em silos verticais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, p. 339–345, 2014.
- Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B. do; Fank, M. Z. da. Forças verticais e de atrito em silos cilíndricos com fundo plano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.6, p.652–657, 2014.
- Madrona, F. S.; Calil Junior, C. Análise das pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica. *Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos*, p. 37-56, 2009.
- Nascimento, F. C; Calil Junior, C. A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: o parâmetro k. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, v.11, n. 52, p.17-37, 2009.
- Nascimento, J. W. B.; Lopes Neto, J. P.; Montross, M. D. Horizontal pressures in cylindrical metal silos and comparison with different international standards. *Eng. Agríc., jaboticabal*, v.33, n.4, p.601-611, 2013.
- Ooi, J.Y., Rotter, J.M. Wall pressures in squat steel silos from simple finite- element analysis. *Comput Struct*, p. 361–374, 1990.
- Palma, G.; Calil Júnior, C. Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d \geq 1.5$). *Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos*, v. 10, n. 42, p. 129-150, 2008.
- Ravenet, J. Silos, flujo e vaciado sólidos, formacion de bovedas, efectos. Barcelona, Espanha: Técnicos Asociados, S.A, 335p., 1977.
- Reimbert, M.L.; Reimbert, A.M. Silos: Theory and Practice. London: Olympia Translation Service, 252p., 1956.
- Reis, S. G. Determinação das ações atuantes nos silos através de redes neurais artificiais. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Lavras, 2011.
- Rotter, J.M. Guide for the Economic Design of Circular Metal Silos. Spon Press, London and New York, 2001.
- Rotter, J. M. Silo and hopper design for strength. In: McGlinchey, D. Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation. Blackwell Publishing Ltd., cap. 3, p. 99-132, 2008.
- Staron, L.; Lagrée, P.-Y.; Popinet, S. Continuum simulation of the discharge of the granular silo, A validation test for the $\mu(I)$ visco-plastic flow law. *Eur. Phys. J. E*, 2014.
- Teunou, E.; Fitzpatrick, J. J. Effect of storage time and consolidation on food powder flowability. *Journal of Food Engineering*, v.43, p.97-101, 2000.
- Wang, Y.; Luc, Y.; Ooi, J. Y. A numerical study of wall pressure and granular flow in a flat-bottomed silo. *Powder Technology*, v.282, p. 43–54, 2015.
- Widisinghe, S.; Sivakugan, N. Vertical stresses within granular materials in containments. *International Journal of Geotechnical Engineering*, V.8, n. 4, p. 431-435, 2014.

- Wright, C. The Effect of Grain Shape on Side-Wall Pressure in Model Grain Silos. Proceedings of The National Conference: On Undergraduate Research (NCUR). University of Memphis - TN, 2017.
- Wojcik, M.; Sondej, M.; Rejowski, K.; Tejchman, J. Full-scale experiments on wheat flow in steel silo composed of corrugated walls and columns. Powder Technology, 2017.
- Zheng, Q. J.; Yu, A. B. Finite element investigation of the flow and stress patterns in conical hopper during discharge. Chemical Engineering Science, v.129, p.49–57, 2015.

APÊNDICE A

Tabela 8 - Comparação numérica entre valores experimentais e normalizados

(Carregamento sem coeficiente de segurança)

Carregamento - Silo cheio											
Experimental H/D = 4				AS 3774				BS 1991/4			
1h	6h	12h	24h	1h	6h	12h	24h	1h	6h	12h	24h
0,6	0,66	0,76	0,8	0,35	0,43	0,45	0,39	0,59	0,69	0,71	0,65
0,88	0,8	0,83	0,9	0,89	1,07	1,13	0,97	1,28	1,48	1,52	1,4
1,05	0,97	0,88	1,2	1,38	1,66	1,74	1,51	2,23	2,57	2,62	2,44
1,06	0,83	1,05	1,3	1,83	2,19	2,29	2,34	2,89	3,32	3,38	3,17
1,14	0,9	1,5	1,5	2,34	2,78	2,9	2,56	3,61	4,12	4,18	3,95
1,63	1,3	1,7	1,8	2,73	3,22	3,34	2,98	4,12	4,7	4,74	4,52
2,03	2,13	2,21	2,3	3,07	3,62	3,74	3,37	4,57	5,18	5,22	5,01
Carregamento - Z3											
Experimental H/D = 3				AS 3774 H/D = 3				BS 1991/4 H/D = 3			
1h	6h	12h	24h	1h	6h	12h	24h	1h	6h	12h	24h
0,11	0,16	0,18	0	0,35	0,43	0,45	0,39	0,59	0,69	0,71	0,65
0,13	0,17	0,25	0,25	0,89	1,07	1,13	0,97	1,28	1,48	1,52	1,4
0,16	0,21	0,29	0,36	1,38	1,66	1,74	1,51	2,23	2,57	2,62	2,44
0,54	0,57	0,44	0,24	1,83	2,19	2,29	2,34	2,89	3,32	3,38	3,17
0,96	0,62	0,77	0,44	2,34	2,78	2,9	2,56	3,61	4,12	4,18	3,95
1,28	0,84	0,9	0,83	2,73	3,22	3,34	2,98	4,12	4,7	4,74	4,52
1,47	1,14	1,34	1,42	3,07	3,62	3,74	3,37	4,57	5,18	5,22	5,01
Carregamento - Z2											
Experimental H/D = 2				AS 3774 H/D = 2				BS 1991/4 H/D = 2			
1h	6h	12h	24h	1h	6h	12h	24h	1h	6h	12h	24h
0,06	0,07	0,08	0	0,35	0,43	0,45	0,39	0,59	0,69	0,71	0,65
0,1	0,14	0,18	0,2	0,89	1,07	1,13	0,97	1,28	1,48	1,52	1,4
0,14	0,16	0,25	0,29	1,38	1,66	1,74	1,51	2,23	2,57	2,62	2,44
0,25	0,26	0,28	0,3	1,83	2,19	2,29	2,34	2,89	3,32	3,38	3,17
0,35	0,37	0,4	0,44	2,34	2,78	2,9	2,56	3,61	4,12	4,18	3,95
0,55	0,73	0,81	0,94	2,73	3,22	3,34	2,98	4,12	4,7	4,74	4,52
0,66	0,77	1,08	1,25	3,07	3,62	3,74	3,37	4,57	5,18	5,22	5,01
Carregamento - Z1											
Experimental H/D = 1				AS 3774 H/D = 1				BS 1991/4 H/D = 1			
1h	6h	12h	24h	1h	6h	12h	24h	1h	6h	12h	24h
0,05	0,07	0,07	0	0,35	0,43	0,45	0,39	0,59	0,69	0,71	0,65
0,09	0,12	0,15	0,18	0,89	1,07	1,13	0,97	1,28	1,48	1,52	1,4
0,12	0,15	0,2	0,26	1,38	1,66	1,74	1,51	2,23	2,57	2,62	2,44
0,18	0,24	0,26	0,28	1,83	2,19	2,29	2,34	2,89	3,32	3,38	3,17
0,27	0,32	0,35	0,46	2,34	2,78	2,9	2,56	3,61	4,12	4,18	3,95
0,33	0,64	0,72	0,88	2,73	3,22	3,34	2,98	4,12	4,7	4,74	4,52
0,55	0,69	1,01	1,05	3,07	3,62	3,74	3,37	4,57	5,18	5,22	5,01

Pressões Horizontais de carregamento sem coeficiente de segurança

Gráfico 33 - Pressões horizontais de carregamento sem coeficiente de segurança (Instantâneo).

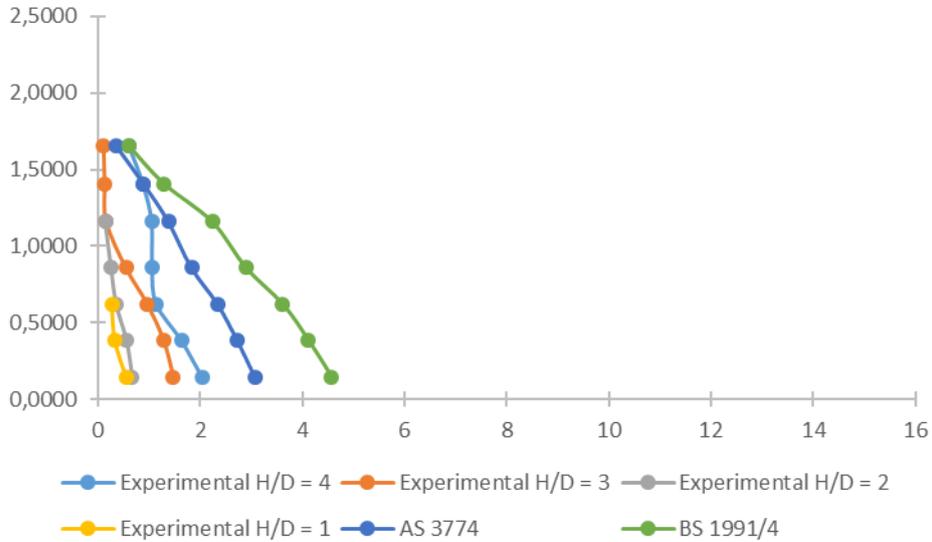


Gráfico 34 - Pressões horizontais de carregamento sem coeficiente de segurança (6 Horas).

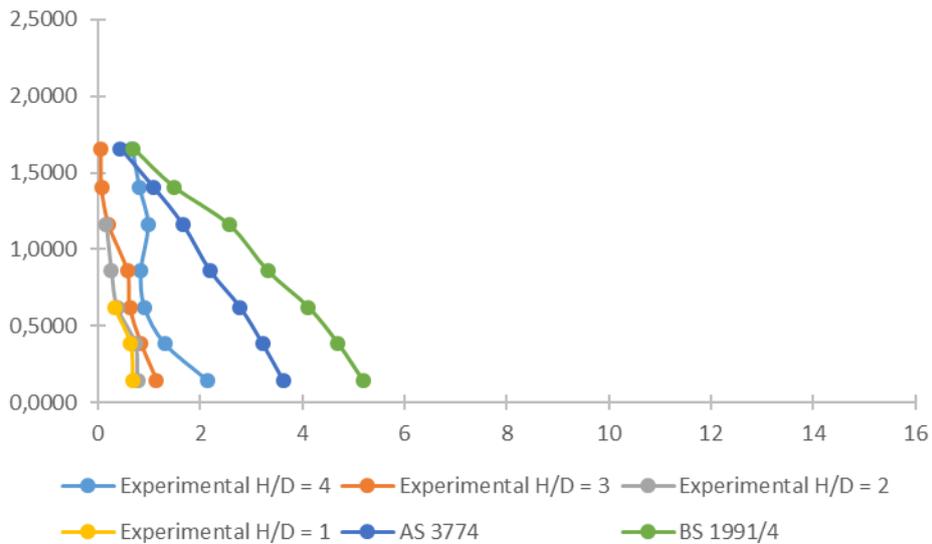


Tabela 9 - Comparação numérica entre valores experimentais e normalizados
(Descarregamento sem coeficiente de segurança)

Descarregamento - Silo cheio											
Experimental H/D = 4				AS 3774				BS 1991/4			
1h	6h	12h	24h	1h	6h	12h	24h	1h	6h	12h	24h
2,8	3,2	3,7	0	0,65	0,79	0,84	0,71	1,48	1,73	1,78	1,63
3,5	4,4	4,6	4,8	1,64	1,98	2,09	1,8	3,19	3,7	3,79	3,49
3,9	4,7	4,9	5,2	2,55	3,07	3,22	2,79	5,56	6,43	6,55	6,1
5,4	5,5	5,8	6,1	3,38	4,04	4,23	3,7	7,23	8,31	8,45	7,92
6,6	7,1	7,9	8,3	4,33	5,14	5,35	4,74	9,02	10,31	10,44	9,88
6,9	7,2	8,8	9,6	5,03	5,96	6,18	5,51	10,31	11,74	11,86	11,3
9,2	10,3	10,57	11,3	5,68	6,69	6,91	6,22	11,42	12,96	13,05	12,52

Descarregamento - Z3											
Experimental H/D = 3				AS 3774				BS 1991/4			
1h	6h	12h	24h	1h	6h	12h	24h	1h	6h	12h	24h
1,19	1,89	2,02	0	0,65	0,79	0,84	0,71	1,48	1,73	1,78	1,63
2,36	3,15	3,73	3,92	1,64	1,98	2,09	1,8	3,19	3,7	3,79	3,49
3,48	4,3	4,69	4,8	2,55	3,07	3,22	2,79	5,56	6,43	6,55	6,1
3,95	4,58	4,82	5,6	3,38	4,04	4,23	3,7	7,23	8,31	8,45	7,92
5,3	5,89	6,04	7,04	4,33	5,14	5,35	4,74	9,02	10,31	10,44	9,88
6,25	6,63	7,06	8,11	5,03	5,96	6,18	5,51	10,31	11,74	11,86	11,3
8,64	9,06	10,3	10,9	5,68	6,69	6,91	6,22	11,42	12,96	13,05	12,52

Descarregamento - Z2											
Experimental H/D = 2				AS 3774				BS 1991/4			
1h	6h	12h	24h	1h	6h	12h	24h	1h	6h	12h	24h
0,32	0,53	0,81	0	0,65	0,79	0,84	0,71	1,48	1,73	1,78	1,63
0,33	0,57	2,22	0,68	1,64	1,98	2,09	1,8	3,19	3,7	3,79	3,49
0,66	0,69	2,81	3,22	2,55	3,07	3,22	2,79	5,56	6,43	6,55	6,1
1,75	1,83	2,54	3,95	3,38	4,04	4,23	3,7	7,23	8,31	8,45	7,92
2,52	2,57	3,13	5,26	4,33	5,14	5,35	4,74	9,02	10,31	10,44	9,88
2,67	4,27	5,3	7,51	5,03	5,96	6,18	5,51	10,31	11,74	11,86	11,3
5,79	6,7	7,92	9,71	5,68	6,69	6,91	6,22	11,42	12,96	13,05	12,52

Descarregamento - Z1											
Experimental H/D = 1				AS 3774				BS 1991/4			
1h	6h	12h	24h	1h	6h	12h	24h	1h	6h	12h	24h
0,07	0,31	0,37	0	0,65	0,79	0,84	0,71	1,48	1,73	1,78	1,63
0,13	0,36	0,42	1,6	1,64	1,98	2,09	1,8	3,19	3,7	3,79	3,49
0,2	1,02	0,56	2,4	2,55	3,07	3,22	2,79	5,56	6,43	6,55	6,1
0,24	1,17	0,79	3,55	3,38	4,04	4,23	3,7	7,23	8,31	8,45	7,92
0,71	1,13	2,04	3,6	4,33	5,14	5,35	4,74	9,02	10,31	10,44	9,88
1,25	1,38	4,3	3,7	5,03	5,96	6,18	5,51	10,31	11,74	11,86	11,3
3,02	4,9	5,43	5,7	5,68	6,69	6,91	6,22	11,42	12,96	13,05	12,52

Pressões Horizontais de descarregamento sem coeficiente de segurança

Gráfico 37 - Pressões horizontais de descarregamento sem coeficiente de segurança (Instantâneo).

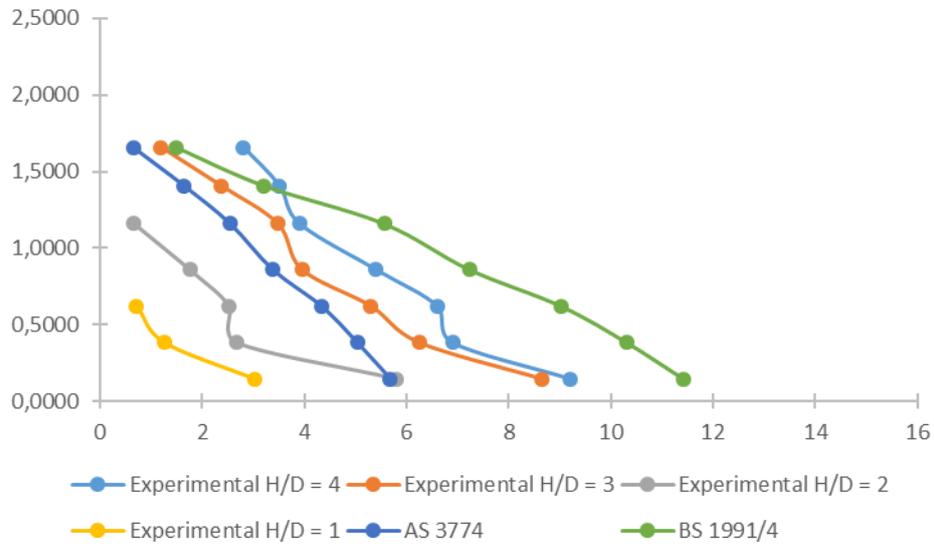


Gráfico 38 - Pressões horizontais de descarregamento sem coeficiente de segurança (6 Horas).

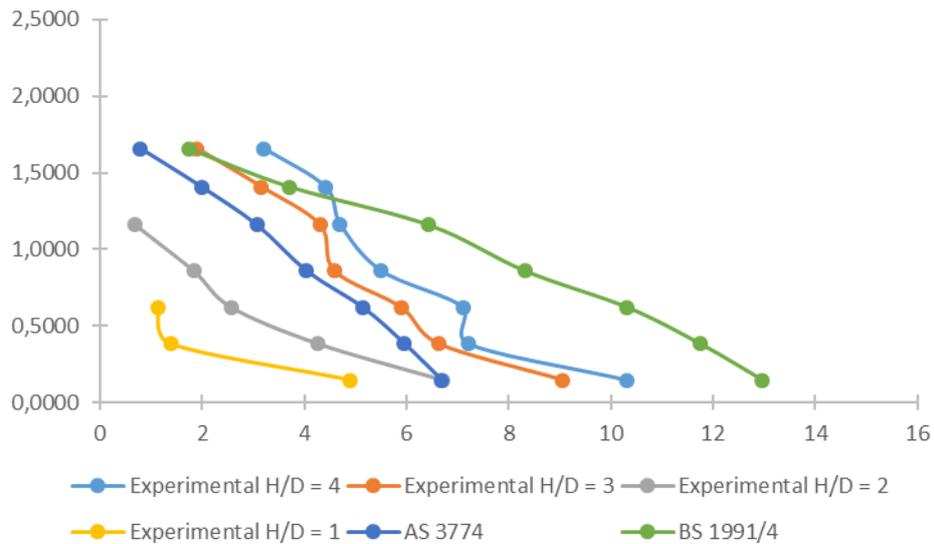


Gráfico 39 - Pressões horizontais de descarregamento sem coeficiente de segurança (12 Horas).

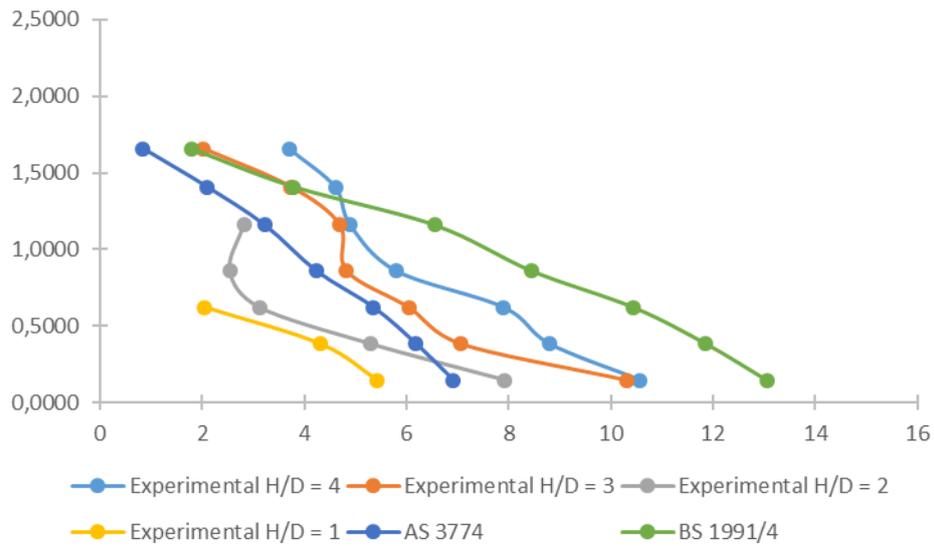
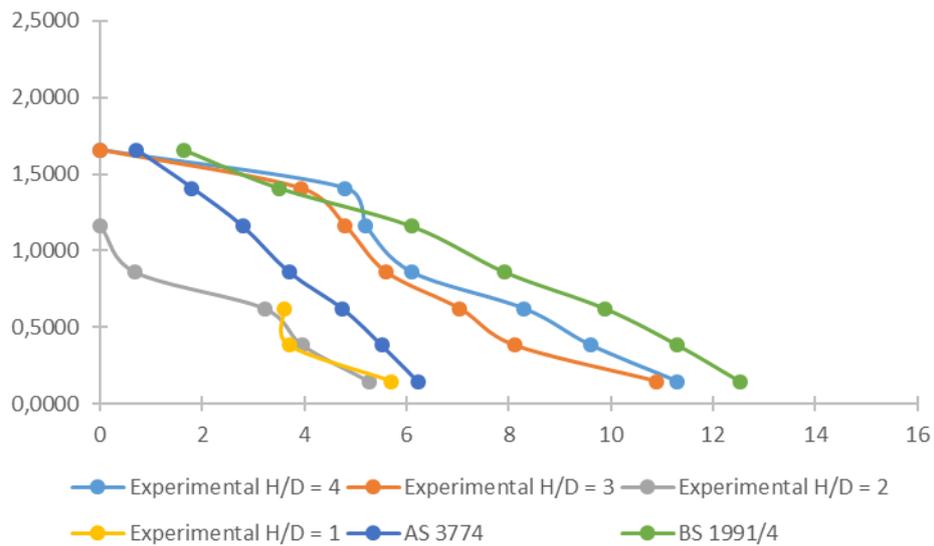


Gráfico 40 - Pressões horizontais de descarregamento sem coeficiente de segurança (24 Horas).



Pressões de Atrito no carregamento e descarregamento sem coeficiente de segurança

Gráfico 41 - Pressões de atrito no carregamento sem coeficiente de segurança (H/D = 4).

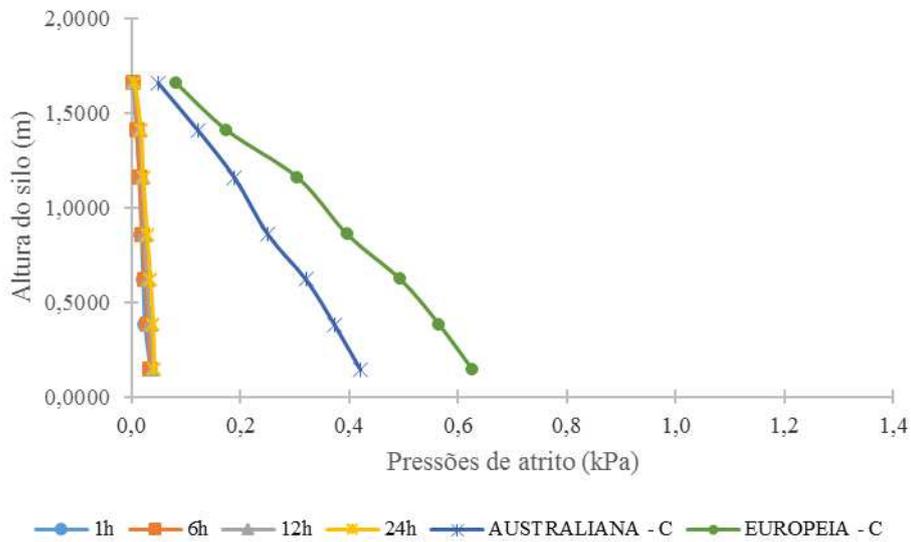


Gráfico 42 - Pressões de atrito no descarregamento sem coeficiente de segurança (H/D = 4).

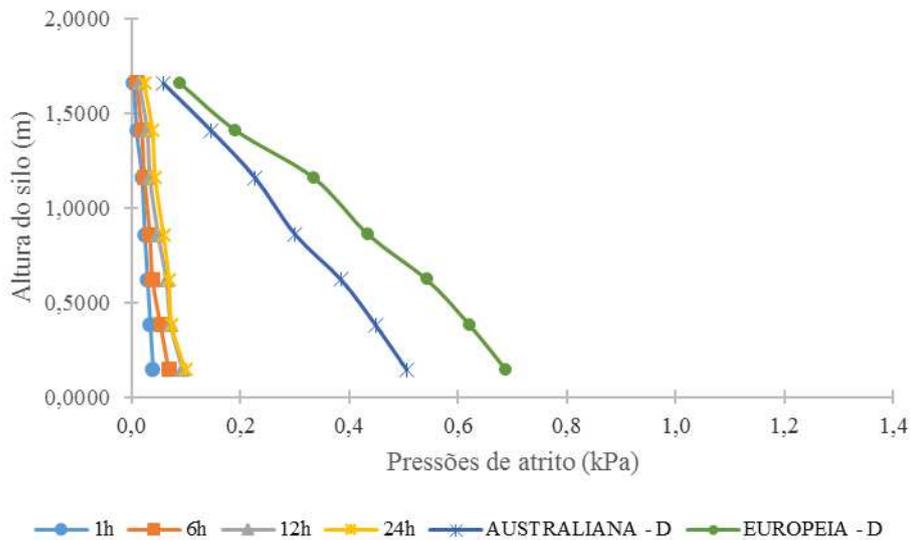


Gráfico 43 - Pressões de atrito no carregamento sem coeficiente de segurança ($H/D = 3$).

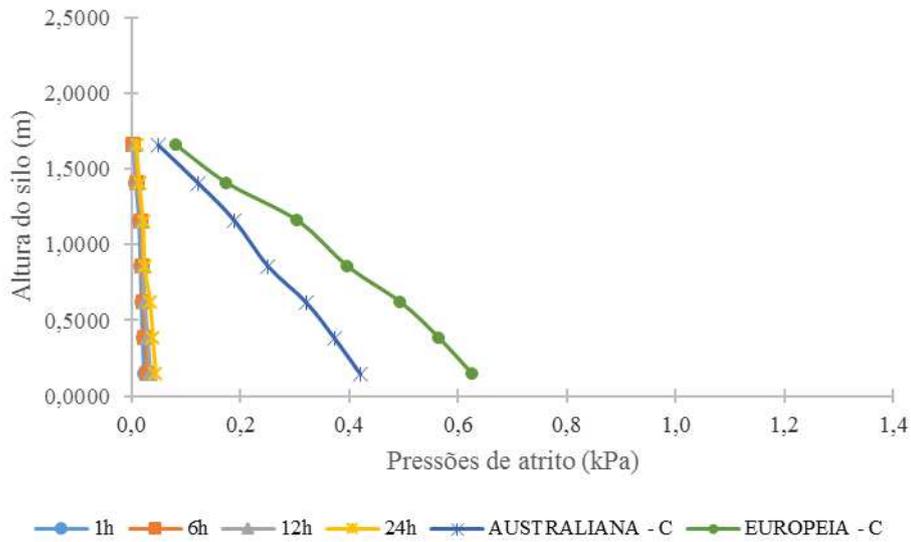


Gráfico 44 - Pressões de atrito no descarregamento sem coeficiente de segurança ($H/D = 3$).

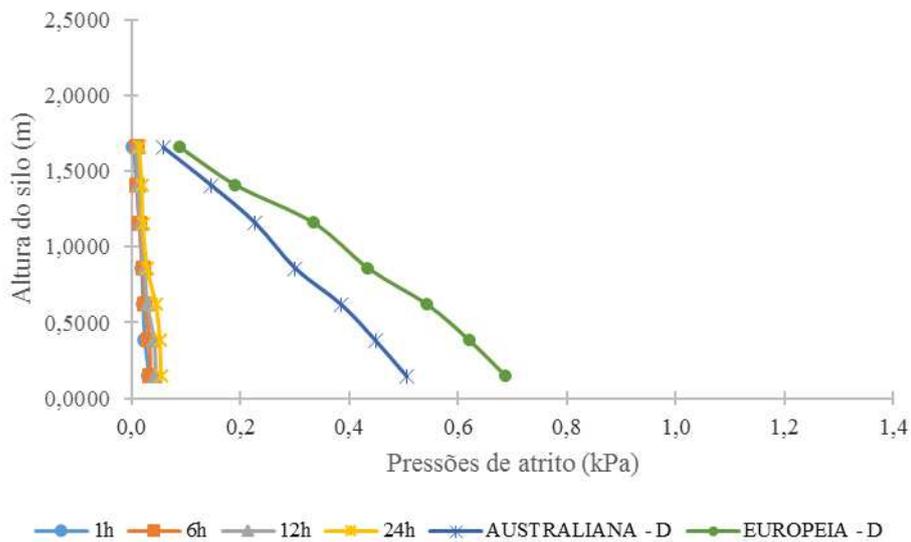


Gráfico 45 - Pressões de atrito no carregamento sem coeficiente de segurança ($H/D = 2$).

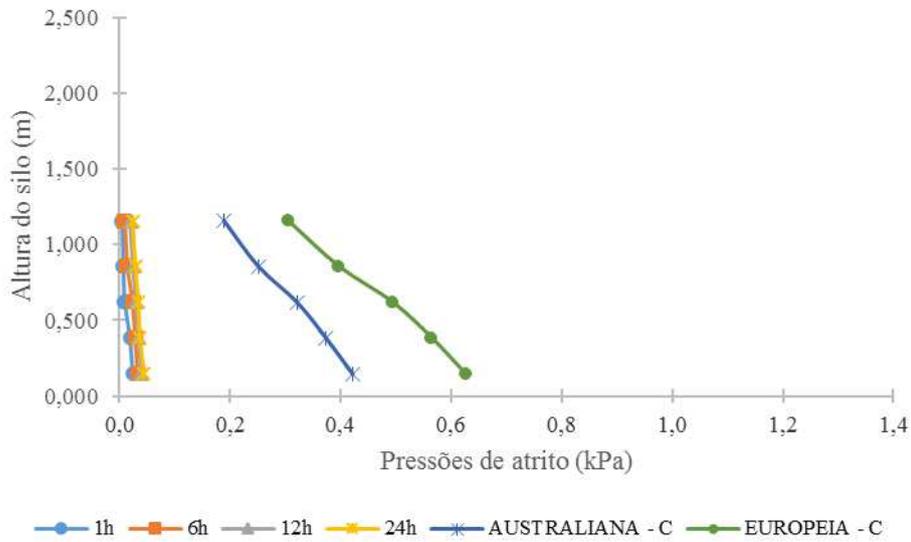


Gráfico 46 - Pressões de atrito no descarregamento sem coeficiente de segurança ($H/D = 2$).

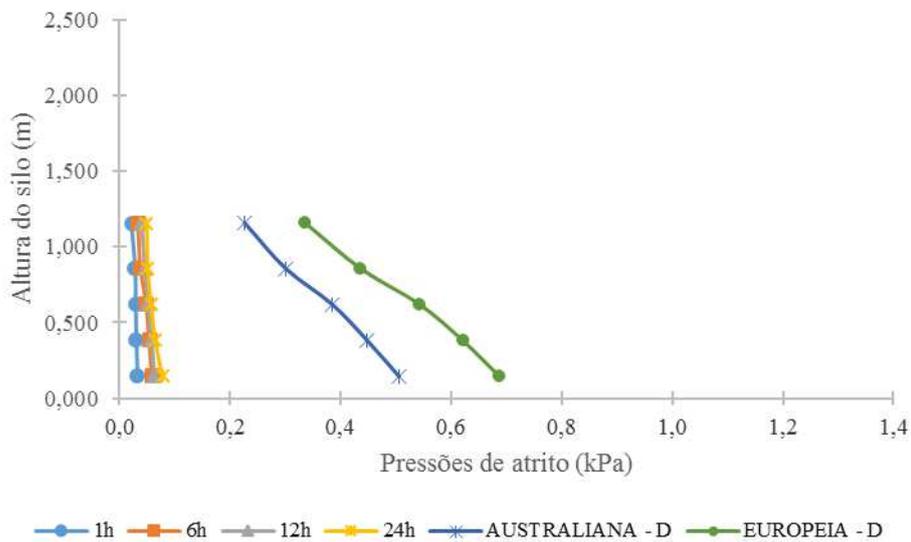


Gráfico 47 - Pressões de atrito no carregamento sem coeficiente de segurança ($H/D = 1$).

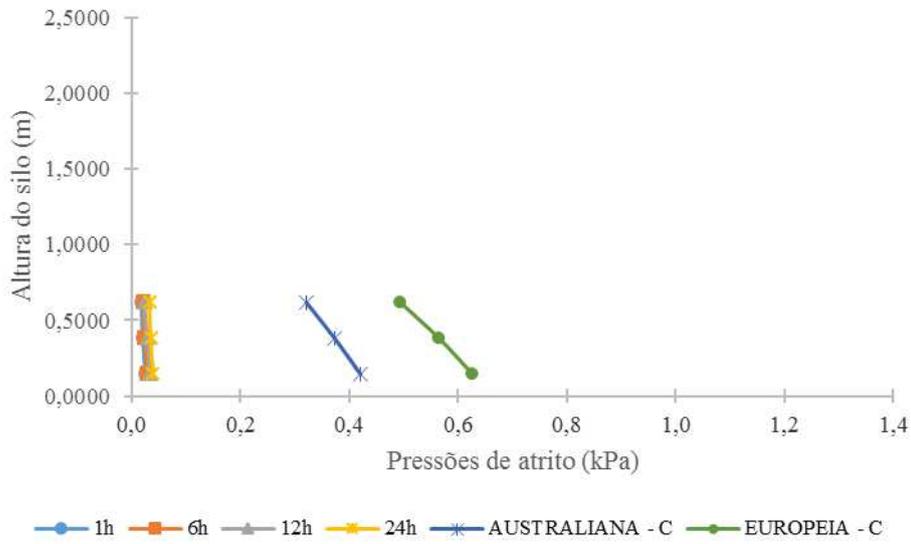


Gráfico 48 - Pressões de atrito no descarregamento sem coeficiente de segurança ($H/D = 1$).

