



WISNER COIMBRA DE PAULA

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE TREMONHAS
CONCÊNTRICAS E EXCÊNTRICAS NOS
ESFORÇOS DE SILOS ESBELTOS METÁLICOS

LAVRAS - MG
2020

WISNER COIMBRA DE PAULA

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE TREMONHAS
CONCÊNTRICAS E EXCÊNTRICAS NOS ESFORÇOS DE SILOS
ESBELTOS METÁLICOS

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções e Ambiente, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Francisco Carlos Gomes

Coorientador

Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento

LAVRAS - MG
2020

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

de Paula, Wisner Coimbra.

Influência da geometria de tremonhas concêntricas e
excêntricas nos esforços de silos esbeltos metálicos / Wisner
Coimbra de Paula. - 2020.

183 p. : il.

Orientador(a): Francisco Carlos Gomes.

Coorientador(a): José Wallace Barbosa do Nascimento.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. silo piloto. 2. pressão normal. 3. descarga excêntrica. I.
Gomes, Francisco Carlos. II. do Nascimento, José Wallace Barbosa.
III. Título.

WISNER COIMBRA DE PAULA

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE TREMONHAS
CONCÊNTRICAS E EXCÊNTRICAS NOS ESFORÇOS DE SILOS
ESBELTOS METÁLICOS

INFLUENCE OF THE CONCENTRIC AND EXCENTRIC HOPPER
GEOMETRY IN THE EFFORTS OF METALLIC SLENDER SILOS

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções e Ambiente, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 13 de março de 2020

Dr. Tadayuki Yanagi Junior

DEG/UFLA

Dr. Pedro José Aguado Rodríguez

Universidad de León (Espanha)

Dra. Ilda de Fátima Ferreira Tinôco

UFV

Dr. Francisco Carlos Gomes
Orientador

Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento
Coorientador

LAVRAS - MG
2020

*Dedico este trabalho à minha mãe, Rosângela Andrade Coimbra,
pelo incentivo, paciência e amor incomensuráveis.
Sempre exemplo de dignidade e força.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por se fazer presente em todos os momentos de minha vida.

Agradeço à minha família, meus pais, Francisco e Rosângela, e irmãos, Cássio e Marlon. Minha realização profissional não seria completa sem o apoio da família.

Meu sincero reconhecimento ao professor e amigo, Francisco Carlos Gomes, pela orientação e apoio em todo o período de estudos, por acreditar que eu conseguiria desenvolver este trabalho.

Ao professor Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento pela coorientação do trabalho e por estar à frente dos ensaios físicos das amostras de milho, na Universidade Federal de Campina grande. Ainda, agradeço aos professores que comporam a banca de defesa, Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento, Dr. Tadayuki Yanagi Junior, Dr. Pedro José Aguado Rodríguez e Dra. Ilda de Fátima Ferreira Tinôco, pela especial dedicação ao estudo de meu trabalho e grandiosas considerações para o seu aperfeiçoamento.

À equipe de trabalho do Centro de Processamento e Pesquisa dos Produtos Armazenados, os amigos Rômulo Marçal Gandia, Estácio Antunes de Oliveira Júnior e Luiz Felipe Souza faço meus agradecimentos, por todo apoio dado durante os ensaios e pela amizade.

Agradeço à colaboração prestada pelo Prof. Carlito Calil Junior, através da doação do equipamento utilizado no trabalho, o silo piloto.

Por fim, reforço o maior agradecimento à minha mãe, Rosângela, pela motivação durante toda a minha vida aos meus estudos. Por todo o carinho, dedicação e sacrifício próprio para que eu pudesse trilhar toda essa jornada do conhecimento.

RESUMO

Os silos verticais esbeltos são estruturas de armazenamento cujas tensões e deformações nas tremonhas concêntricas e excêntricas ainda requerem estudos para seu completo conhecimento, pois há grande variabilidade nas pressões devidas ao produto armazenado ou à geometria da estrutura. O objetivo deste trabalho científico, técnico e aplicado foi avaliar as pressões exercidas pelo armazenamento de milho nas paredes de diversas geometrias de tremonhas, além dos esforços de tração na região de transição. Propôs-se, portanto, a análise do comportamento estrutural das tremonhas instaladas em um silo piloto, cujo projeto baseia-se no princípio de modelos de Pieper e Schütz (1980), utilizado como padrão pela norma alemã DIN 1055-6 (2000). Estas tremonhas foram avaliadas quando submetidas às cargas estáticas e dinâmicas (carregamento, armazenamento e descarregamento) de grãos de milho. A partir destes resultados de pressões, compararam-se com as teorias de Janssen (1895) e Walker (1966) e com as principais normas internacionais de cálculo silos esbeltos (ISO 11697:2012, EN 1991-4:2006 e AS 3774:1996). Os resultados mostraram que as pressões normais nas tremonhas são dependentes de sua geometria, ocorrendo grande variação desses esforços com a excentricidade da boca de descarga, com a inclinação das suas paredes, com a geometria da parede do corpo do silo (neste trabalho foram estudadas paredes lisas e onduladas) e com a condição de carregamento ou descarregamento do silo. Estas mesmas variáveis, objetos deste estudo, mostraram grande influência nos esforços de tração na região de transição e nas cargas verticais que são transmitidas aos pilares. Estas informações se fazem importantes, pois as normas internacionais não tratam de cargas causadas por tremonhas de grande excentricidade e são necessárias ao projeto e desenvolvimento de equipamentos e silos objetivando o manuseio seguro e econômico do produto, visando à integridade da estrutura e equipamentos durante o processamento de produtos armazenados.

Palavras-chave: silo piloto, cargas estáticas e dinâmicas, normas internacionais de cálculo, pressão normal, descarga excêntrica, esforços de tração.

ABSTRACT

The slender vertical silos are storage structures whose stresses and deformations in the concentric and eccentric hoppers still require studies for their complete knowledge, as there is great variability in the pressures due to the stored product or the structure geometry. The objective of this scientific, technical and applied work was to evaluate the pressures exerted by the storage of maize on the walls of different hopper geometries, in addition to the tensile efforts in the devices that connect these to the pilot silo wall and the axial efforts in its pillars. Therefore, it was proposed to analyze the structural behavior of hoppers installed in a pilot silo, whose design is based on the principle of models by Pieper and Schütz (1980), bases as a standard by the German standard DIN 1055-6 (2000). These hoppers were evaluated when subjected to static and dynamic loads (filling, storage and discharging) of maize kernels. From these pressure results, they were compared with the theories of Janssen (1895) and Walker (1966) and with the main international standards for the calculation of slender silos (ISO 11697:2012, EN 1991-4:2006 and AS 3774:1996). The results showed that the normal pressures in the hoppers are dependent on their geometry, with great variation of these efforts with the eccentricity of the discharge mouth, with the inclination of its walls, with the geometry of the silo wall (in this work, walls were studied smooth and wavy) or with the condition of filling or discharging the silo. These same variables, objects of this study, showed great influence on the traction efforts in the devices that support the hoppers in the silo and in the vertical loads that are transmitted to the columns. This information is important because the international standards do not deal with loads caused by large eccentricity hoppers and are necessary for the design and development of equipment and silos aiming at the safe and economical handling of the product, aiming at the integrity of the structure and equipment during the processing of stored products.

Keywords: pilot silo, static and dynamic loads, international calculation standards, normal pressure, eccentric discharge, traction efforts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Silos construídos com diferentes materiais estruturais.....	24
Figura 2 – Classificação de silo quanto à construção.....	25
Figura 3 – Silo horizontal elevado.....	26
Figura 4 - Diferença entre líquidos e sólidos na distribuição de pressões.....	27
Figura 5 - Notação da geometria de silos elevados e pressões atuantes.....	28
Figura 6 - Máquina de cisalhamento de Jenike.....	31
Figura 7 - Bancada de consolidação.....	31
Figura 8 - Principais tipos de fluxo.....	33
Figura 9 - Fluxo de funil, em tubo.....	34
Figura 10 - Fluxo de funil misto.....	34
Figura 11 - Determinação do tipo de fluxo.....	35
Figura 12 - Determinação do tipo de fluxo.....	35
Figura 13 - Formação de arcos na boca da tremonha.....	36
Figura 14 - Função fluxo do produto armazenado e fator fluxo da tremonha.....	38
Figura 15 – Sequência fotográfica da descarga do silo com e sem uso de <i>inserts</i>	39
Figura 16 - Tipos de tremonhas.....	40
Figura 17 - Diagrama para dimensionamento de tremonhas.....	41
Figura 18 - Gráfico para determinação do fator fluxo (ff) de tremonhas em cunha.....	43
Figura 19 - Determinação da função $H(\alpha)$ para tremonhas cônicas e em cunha.....	45
Figura 20 - Determinação da função $G(\phi_i)$	47
Figura 21 – Pressões atuantes nas paredes de um silo.....	49
Figura 22 – Campo de tensões de um silo (fluxo de massa).....	49
Figura 23 – Comparação das pressões horizontais em tremonha centrada segundo o MEF e algumas normas existentes.....	52
Figura 24 – Variação das pressões horizontais com a alteração da excentricidade da tremonha.....	53
Figura 25 – Pressões normais às paredes de um silo: tremonha centrada e variação do ângulo de atrito interno do produto (θ_i).....	54
Figura 26 – Pressões normais às paredes de um silo: tremonha com 60% de excentricidade e variação do ângulo de atrito interno do produto (θ_i).....	55
Figura 27 – Pressões normais às paredes de um silo: tremonha com 100% de excentricidade e variação do ângulo de atrito interno do produto (θ_i).....	56
Figura 28 – Configuração do silo e discretização da malha de elementos finitos.....	57
Figura 29 – Modos de fluxo em tremonhas cônicas obtidos via MEF.....	58
Figura 30 – Comparação das pressões horizontais no silo.....	58
Figura 31 – Pressões horizontais ao longo da altura do silo.....	59
Figura 32 – Forças atuantes em uma camada infinitesimal no material ensilado.....	60
Figura 33 – Forças atuantes em uma camada infinitesimal de produto na tremonha.....	62
Figura 34 - Inclinação de tremonha cônica em função do padrão de fluxo.....	68
Figura 35 – Inclinação de tremonha em cunha em função do padrão de fluxo.....	69
Figura 36 - Cargas na tremonha.....	70
Figura 37 – Carga adicional.....	72
Figura 38 - Representação da excentricidade limite de silos considerada pela norma.....	73
Figura 39 - Distribuições de pressões de enchimento em tremonhas.....	74
Figura 40 - Distribuições de pressões de descarga em tremonhas.....	76
Figura 41 – Forma alternativa de decomposição das pressões.....	78
Figura 42 - Distribuições das pressões estáticas nas paredes de tremonhas de silos.....	81
Figura 43 - Razão de pressão normal inicial (k_n) para pressões iniciais na tremonha.....	82
Figura 44 - Distribuições das pressões dinâmicas nas paredes de tremonhas.....	83
Figura 45 - Razão entre as pressões horizontal e vertical da tremonha na descarga.....	85
Figura 46 – Variação das pressões circunferenciais na parede do silo.....	86
Figura 47 - Distribuição das pressões de excentricidade.....	89

Figura 48 – Vista esquemática geral do silo piloto.	94
Figura 49 – Detalhe “A”: sistema de medição horizontal.	95
Figura 50 - Detalhe “B”: sistema de medição do peso do produto armazenado.	95
Figura 51 – Detalhe “C”: sistema de fixação dos anéis e tremonha.	96
Figura 52 - Vista interna do silo piloto revestido com chapa metálica ondulada.	97
Figura 53 – Representação esquemática da estação experimental.	97
Figura 54 – Fundo plano.	98
Figura 55 - Tremonha concêntrica de 15° com a vertical com furações.	98
Figura 56 - Tremonha excêntrica de 15° com a vertical.	99
Figura 57 - Tremonha de 30° com a vertical.	99
Figura 58 - Tremonha de 45° com a vertical.	99
Figura 59 - Tremonha concêntrica de 60° com a vertical.	100
Figura 60 – Vistas frontal e superior da tremonha de fundo plano.	100
Figura 61 – Vistas frontal e posterior da tremonha com inclinação de 60° com a vertical, concêntrica.	100
Figura 62 – Vistas frontal e posterior da tremonha de 45° de inclinação com a vertical, concêntrica.	101
Figura 63 – Vistas laterais esquerda e direita da tremonha de 45° de inclinação com a vertical, excêntrica.	101
Figura 64 – Vistas frontal e posterior da tremonha de 30° de inclinação com a vertical, concêntrica.	102
Figura 65 – Vistas laterais esquerda e direita da tremonha de 30° de inclinação com a vertical, excêntrica.	102
Figura 66 – Vistas frontal e posterior da tremonha de 15° de inclinação com a vertical, concêntrica.	103
Figura 67 – Vistas laterais esquerda e direita da tremonha de 15° de inclinação com a vertical, excêntrica.	103
Figura 68 – Célula de pressão do tipo diafragma.	104
Figura 69 – Esquema de fixação das células de pressão na tremonha.	104
Figura 70 – Célula de carga de tração.	105
Figura 71 – Sistema de aquisição de dados utilizado.	105
Figura 72 – Calibração das células de carga de tração.	106
Figura 73 – Revestimento do silo piloto com lona plástica e enchimento com água.	106
Figura 74 – Medição da altura da coluna d’água.	107
Figura 75 – Curvas de calibração das células de carga de tração.	109
Figura 76 – Curvas de calibração das células de pressão do tipo diafragma.	110
Figura 77 – Médias das pressões normais dos quatro carregamentos e descarregamentos, por sensor de pressão.	112
Figura 78 – Médias das pressões normais dos quatro carregamentos e descarregamentos, entre os sensores de pressão.	113
Figura 79 – Valores medidos pelas células de pressão no fundo plano, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento. ...	114
Figura 80 - Valores medidos pelas células de pressão no fundo plano, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	115
Figura 81 – Pressões normais (experimentais, normativas e teóricas) na tremonha plana.	116
Figura 82 – Pressões normais experimentais, normativas e teóricas na tremonha de 60°, na condição de carregamento.	118
Figura 83 – Pressões normais experimentais, normativas e teóricas na tremonha de 60°, na condição de descarregamento.	119
Figura 84 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 60°, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento. ...	120
Figura 85 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 60°, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	121

Figura 86 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 45° concêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.....	122
Figura 87 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 45° concêntrica, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	123
Figura 88 – Pressões normais na região de transição e boca de descarga da tremonha de 45° concêntrica (silo com parede ondulada).	124
Figura 89 - Pressões normais experimentais, normativas e teóricas na tremonha de 45° concêntrica, na condição de carregamento.	125
Figura 90 - Pressões normais experimentais, normativas e teóricas na tremonha de 45° concêntrica, na condição de descarregamento.....	126
Figura 91 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 45° excêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.....	128
Figura 92 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 45° excêntrica, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	128
Figura 93 - Valores medidos pelas células de pressão na parede vertical da tremonha de 45° excêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	129
Figura 94 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 30° concêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.....	131
Figura 95 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 30° concêntrica, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	132
Figura 96- Pressões normais experimentais, normativas e teóricas na tremonha de 30° concêntrica, na condição de carregamento.....	133
Figura 97- Pressões normais experimentais, normativas e teóricas na tremonha de 30° concêntrica, na condição de descarregamento.....	134
Figura 98 - Valores medidos pelas células de pressão na “Vista A” da tremonha de 30° excêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.....	136
Figura 99 - Valores medidos pelas células de pressão na “Vista B” da tremonha de 30° excêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.....	136
Figura 100 - Valores medidos pelas células de pressão na “Vista A” da tremonha de 30° excêntrica, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.....	137
Figura 101 - Valores medidos pelas células de pressão na “Vista B” da tremonha de 30° excêntrica, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.....	137
Figura 102 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 15° concêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.....	139
Figura 103 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 15° concêntrica, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.....	139
Figura 104 - Pressões normais experimentais, normativas e teóricas na tremonha de 15° concêntrica, na condição de carregamento.	140
Figura 105 - Pressões normais experimentais, normativas e teóricas na tremonha de 15° concêntrica, na condição de descarregamento.....	141

Figura 106 - Valores medidos pelas células de pressão na “Vista A” da tremonha de 15° excêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	143
Figura 107 - Valores medidos pelas células de pressão na “Vista A” da tremonha de 15° excêntrica, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	143
Figura 108 - Valores medidos pelas células de pressão na “Vista B” da tremonha de 15° excêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	144
Figura 109 - Valores medidos pelas células de pressão na “Vista B” da tremonha de 15° excêntrica, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	145
Figura 110 – Tremonhas concêntricas e excêntricas sobrepostas para comparação das pressões normais.	146
Figura 111 – Curvas de tendência das pressões normais estáticas nas tremonhas concêntricas de 15°, 30°, 45° e 60° de inclinação com a vertical.	147
Figura 112 – Curvas de tendência das pressões normais dinâmicas nas tremonhas concêntricas de 15°, 30°, 45° e 60° de inclinação com a vertical.	148
Figura 113 – Curvas de tendência das pressões normais estáticas nas tremonhas excêntricas de 15°, 30° e 45° de inclinação com a vertical.	150
Figura 114 – Curvas de tendência das pressões normais dinâmicas nas tremonhas excêntricas de 15°, 30° e 45° de inclinação com a vertical.	150
Figura 115 - Valores de tração medidos pelas células de carga de tração com o fundo plano, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	153
Figura 116 – Média dos valores máximos de tração medidos nos sensores de ligação da tremonha plana ao corpo do silo piloto.	154
Figura 117 - Valores de tração medidos pelas células de carga de tração com a tremonha de 60°, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	155
Figura 118 – Média dos valores máximos de tração medidos nos sensores de ligação da tremonha de 60° ao corpo do silo piloto.	156
Figura 119 - Valores de tração medidos pelas células de carga de tração com a tremonha de 45° concêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	157
Figura 120 - Valores de tração medidos pelas células de carga de tração com a tremonha de 45° excêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	157
Figura 121 – Média dos valores máximos de tração medidos nos sensores de ligação da tremonha de 45° concêntrica ao corpo do silo piloto.	159
Figura 122 – Média dos valores máximos de tração medidos nos sensores de ligação da tremonha de 45° excêntrica ao corpo do silo piloto.	159
Figura 123 - Valores de tração medidos pelas células de carga de tração com a tremonha de 30° concêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	160
Figura 124 - Valores de tração medidos pelas células de carga de tração com a tremonha de 30° excêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	161
Figura 125 - Valores de tração medidos pelas células de carga de tração com a tremonha de 15° concêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	161
Figura 126 - Valores de tração medidos pelas células de carga de tração com a tremonha de 15° excêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	162
Figura 127 – Média dos valores máximos de tração medidos nos sensores de ligação da tremonha de 30° concêntrica ao corpo do silo piloto.	162

Figura 128 – Média dos valores máximos de tração medidos nos sensores de ligação da tremonha de 30° excêntrica ao corpo do silo piloto.	163
Figura 129 – Média dos valores máximos de tração medidos nos sensores de ligação da tremonha de 15° concêntrica ao corpo do silo piloto.	164
Figura 130 – Média dos valores máximos de tração medidos nos sensores de ligação da tremonha de 15° excêntrica ao corpo do silo piloto.	164
Figura 131 - Valores de esforços axiais de compressão medidos pelos sensores na base dos pilares do silo com a tremonha de 45° excêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	167
Figura 132 - Valores de esforços axiais de compressão medidos pelos sensores na base dos pilares do silo com a tremonha de 30° excêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	168
Figura 133 - Valores de esforços axiais de compressão medidos pelos sensores na base dos pilares do silo com a tremonha de 15° excêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.	168
Figura 134 – Média das cargas axiais máximas de compressão nos pilares da esquerda e direita do silo piloto.	169
Figura 135 – Média das cargas axiais máximas de compressão nos pilares do silo piloto para as tremonhas de 45°, 30° e 15° excêntricas.	170

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos silos em relação à esbeltez.	26
Tabela 2 - Caracterização dos materiais armazenados quanto à função fluxo (FF). ...	37
Tabela 3 – Limites superior e inferior das propriedades físicas dos produtos.	80
Tabela 4 – Designação do formato da seção transversal do silo.....	87
Tabela 5 - Resumo dos ensaios realizados no silo piloto.....	91
Tabela 6 - Propriedades físicas do milho utilizado nos ensaios.	108
Tabela 7 - Pressões hidrostáticas obtidas no processo de validação das calibração dos sensores.	110
Tabela 8 – Pressão normal na tremonha de 60°, com desvio padrão.	117
Tabela 9 - Valores de pressão normal estática na tremonha de 60° calculados pelas normas estrangeiras e teoria, na posição das células de pressão (sensores).....	118
Tabela 10- Valores de pressão normal dinâmica na tremonha de 60° calculados pelas normas estrangeiras e teoria, na posição das células de pressão (sensores).....	119
Tabela 11 – Pressão normal na tremonha de 45° concêntrica, com desvio padrão. .	122
Tabela 12 - Valores de pressão normal estática na tremonha de 45° concêntrica, calculados pelas normas estrangeiras e teoria, nas mesmas posições das células de pressão (sensores).	125
Tabela 13 - Valores de pressão normal dinâmica na tremonha de 45° concêntrica, calculados pelas normas estrangeiras e teoria, nas mesmas posições das células de pressão (sensores).	126
Tabela 14 – Pressão normal na tremonha de 45° excêntrica, com desvio padrão. ...	127
Tabela 15 – Pressão normal média na tremonha de 30° concêntrica, com desvio padrão.	130
Tabela 16 - Valores de pressão normal estática na tremonha de 30° concêntrica, calculados pelas normas estrangeiras e teoria, nas mesmas posições das células de pressão (sensores).	133
Tabela 17 - Valores de pressão normal dinâmica na tremonha de 30° concêntrica, calculados pelas normas estrangeiras e teoria, nas mesmas posições das células de pressão (sensores).	134
Tabela 18 – Pressão normal na tremonha de 30° excêntrica, com desvio padrão. ...	135
Tabela 19 – Pressão normal na tremonha de 15° concêntrica, com desvio padrão. .	138
Tabela 20 - Valores de pressão normal estática na tremonha de 15° concêntrica, calculados pelas normas estrangeiras e teoria, nas mesmas posições das células de pressão (sensores).	140
Tabela 21 - Valores de pressão normal dinâmica na tremonha de 15° concêntrica, calculados pelas normas estrangeiras e teoria, nas mesmas posições das células de pressão (sensores).	141
Tabela 22 – Pressão normal na tremonha de 15° excêntrica, com desvio padrão. ...	142
Tabela 23 – Equações das curvas de tendência das pressões normais estáticas em função da altura da tremonha, para as tremonhas concêntricas.	147
Tabela 24 - Equações das curvas de tendência das pressões normais dinâmicas em função da altura da tremonha, para as tremonhas concêntricas.	149
Tabela 25 – Equações das curvas de tendência das pressões normais estáticas em função da altura da tremonha, para as tremonhas excêntricas.	151
Tabela 26 – Equações das curvas de tendência das pressões normais dinâmicas em função da altura da tremonha, para as tremonhas excêntricas.	152
Tabela 27 – Médias dos esforços máximos de tração nos sensores na região de transição para tremonhas concêntricas, com desvios padrões.	165
Tabela 28 - Médias dos esforços máximos de tração nos sensores na região de transição para tremonhas excêntricas, com desvios padrões.	166

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS MINÚSCULAS

a	Menor lado da seção transversal do silo retangular	[L]
b ou b_f	Largura da boca da tremonha	[L]
$b_{\text{mín}}$	Dimensão mínima da boca de descarga	[L]
$b_{f,\text{mín}}$	Dimensão mínima da boca de descarga	[L]
d	Diâmetro do silo	[L]
d_c	Diâmetro do silo ou o maior diâmetro inscrito em outro formato de estrutura	[L]
e_0	Excentricidade da boca de descarga	[L]
e_i	Excentricidade máxima de enchimento no topo da superfície	[L]
ff	Fator fluxo da tremonha	[1]
g	Aceleração da gravidade	[LT ⁻²]
h_h	Altura da tremonha, medida do seu vértice à zona de transição	[L]
h_D	Altura acima da saída de descarga	[L]
h_0	Altura da tremonha	[L]
j	Coeficiente da tremonha	[1]
p_h	Pressão horizontal no corpo do silo	[FL ⁻²]
p_{h0}	Pressão horizontal na parede vertical do silo, na região de transição com a tremonha	[FL ⁻²]
p_n	Pressão normal à parede da tremonha	[FL ⁻²]
p_{ne}	Pressão normal à parede da tremonha (dinâmica)	[FL ⁻²]
p_{nf}	Pressão normal à parede da tremonha, na condição de enchimento e armazenamento	[FL ⁻²]
p_{nhf}	Pressão normal final (dinâmica) na parede da tremonha, em uma profundidade z_h	[FL ⁻²]
p_{nhi}	Pressão normal inicial (estática) na parede da tremonha, em uma profundidade z_h	[FL ⁻²]
p_{ni}	Pressão normal inicial (estática) na parede vertical do silo	[FL ⁻²]
p_{n1} e p_{n2}	Definem as pressões da tremonha devidas à pressão vertical do material armazenado na região de transição	[FL ⁻²]
p_{n3}	Pressão normal na tremonha devido ao sólido armazenado em seu interior	[FL ⁻²]
p_{qhf}	Pressão de atrito na parede da tremonha (dinâmica)	[FL ⁻²]
p_{qhi}	Pressão de atrito na parede da tremonha (estática)	[FL ⁻²]
p_t	Pressão de atrito do produto com a parede da tremonha	[FL ⁻²]

p_{te}	Pressão de atrito do produto com a parede da tremonha, na condição de descarga do silo	[FL ⁻²]
p_{tf}	Pressão de atrito do produto com a parede da tremonha, na condição de enchimento e armazenamento	[FL ⁻²]
p_v	Pressão vertical	[FL ⁻²]
p_{vft}	Pressão vertical na transição	[FL ⁻²]
p_{vhf}	Pressão vertical na tremonha durante a descarga em uma dada profundidade z_h abaixo da região de transição	[FL ⁻²]
p_{vit}	Pressão vertical média no produto na região de transição	[FL ⁻²]
p_w	Pressão de atrito do produto com a parede do corpo do silo	[FL ⁻²]
x	Ordenada a partir do vértice da tremonha	[L]
z	Ordenada com base na superfície equivalente	[L]
z_g	Profundidade efetiva da tremonha	[L]
z_h	Profundidade da tremonha abaixo da região de transição	[L]
α	Ângulo de inclinação das paredes da tremonha	[1]
$\alpha_{crít}$	Máximo ângulo de inclinação com a vertical da tremonha	[1]
β	Ângulo de inclinação das paredes da tremonha	[1]
λ	Relação entre a pressão horizontal e vertical	[1]
σ_1	Tensão de consolidação	[FL ⁻²]
$\sigma_{1'}$	Tensão confinada	[FL ⁻²]
σ'_1	Tensão principal atuando em um arco estável hipotético que pode formar-se dentro do silo	[FL ⁻²]
$\sigma_{crít}$	Resistência confinada do produto armazenado	[FL ⁻²]
$\sigma_{ic.crít}$	Resistência confinada do produto, dependente da tensão de consolidação σ_1	[FL ⁻²]
σ_c	Tensão confinada de ruptura	[FL ⁻²]
\emptyset_e	Efetivo ângulo de atrito interno do produto	[1]
\emptyset_{es}	Valor superior do efetivo ângulo de atrito interno	[1]
\emptyset_i	Ângulo de atrito interno do material armazenado	[1]
\emptyset_w	Ângulo de atrito do produto com a parede	[1]
\emptyset_{ws}	Valor superior do ângulo de atrito com a parede	[1]
μ	Coeficiente de atrito	[1]
μ_h	Menor valor característico do coeficiente de atrito da parede da tremonha	[1]
μ_{heff}	Coeficiente de atrito do produto armazenado no silo com a parede da tremonha	[1]
μ_w	Coeficiente de atrito do produto com a parede	[1]

γ	Peso específico do produto	$[FL^{-3}]$
γ_{inf}	Valor efetivo inferior do peso específico do produto	$[FL^{-3}]$

LETRAS MAIÚSCULAS

A	Área da sessão transversal de um silo	$[L^2]$
C_b	Coeficiente de majoração	[1]
C_h	Coeficiente geométrico adimensional da tremonha	[1]
D	Diâmetro do corpo do silo	[L]
D_0	Diâmetro da abertura da boca de descarga	[L]
F	Razão entre a pressão normal e a tensão vertical atuantes na parede da tremonha (parâmetro K)	[1]
FF	Função fluxo	[1]
H	Altura do silo	[L]
$H(\alpha)$	Função dependente da forma e inclinação da tremonha	[1]
l_h	Comprimento da parede da tremonha	[L]
K	Razão entre as pressões horizontal e vertical	[1]
L	Dimensões da boca de descarga	[L]
S	Coeficiente de forma da tremonha	[1]
T	Ponto de transição da tremonha com o corpo do silo	[L]
U	Perímetro da seção transversal do silo	[L]
Z	Ordenada com base na camada infinitesimal	[L]

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AS	Australian Standard
CFBC	Canadian Farm Building Code
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DIN	Deutsche Norm
EN	EUROCODE - European Committee for Standardization
ISO	International Organization for Standardization

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	21
2.	OBJETIVOS	23
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1.	Classificação dos silos	24
3.2.	Caracterização de silos	26
3.3.	Propriedades dos produtos armazenados	29
3.4.	Fluxo em silos	32
3.5.	Obstruções do fluxo	36
3.6.	Projeto de tremonhas	39
3.6.1.	Geometria e inclinação das paredes	39
3.6.2.	Cálculo do fator fluxo da tremonha	42
3.6.3.	Cálculo da tensão crítica ($\sigma_{\text{crít}}$)	44
3.6.4.	Cálculo da função $H(\alpha)$	45
3.6.5.	Cálculo da função $G(\theta_i)$	46
3.7.	Pressões nas paredes e no fundo dos silos esbeltos	48
3.8.	Teoria de Janssen (1895)	60
3.9.	Teoria de Walker (1966)	62
3.10.	Medições das pressões em silos	65
3.11.	Normas internacionais para projeto de silos	66
3.11.1.	<i>International Organization for Standardization</i> - ISO 11697 (2012)	68
3.11.2.	<i>European Committee of Standardization</i> - EN 1991-4 (2006)	73
3.11.3.	<i>Australian Standard</i> - AS 3774 (1996)	80
4.	MATERIAL E MÉTODOS	91
4.1.	Propriedades físicas dos produtos ensilados analisados	92
4.2.	Estação experimental de armazenamento	92
4.2.1.	Descrição do silo piloto (modelo de Pieper e Schütz)	92
4.2.2.	Tremonhas	97
4.2.3.	Medição das pressões nas tremonhas analisadas	103
4.2.4.	Aquisição de dados das tremonhas	105
4.2.5.	Calibração das células de carga de tração do silo (sensores)	105
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	108
5.1.	Propriedades físicas do milho	108
5.2.	Calibração das células de carga de tração que sustentam a tremonha	109
5.3.	Calibração das células de pressão do tipo diafragma	109
5.4.	Validação das calibrações (provas de carga)	110
5.5.	Resultados das pressões normais nas tremonhas obtidos nos ensaios instantâneos	111
5.5.1.	Fundo plano ($\alpha=90^\circ$)	111
5.5.2.	Tremonha com inclinação $\alpha=60^\circ$	117
5.5.3.	Tremonha com inclinação $\alpha=45^\circ$ concêntrica	121
5.5.4.	Tremonha com inclinação $\alpha=45^\circ$ excêntrica	127
5.5.5.	Tremonha com inclinação $\alpha=30^\circ$ concêntrica	130
5.5.6.	Tremonha com inclinação $\alpha=30^\circ$ excêntrica	134
5.5.7.	Tremonha com inclinação $\alpha=15^\circ$ concêntrica	138
5.5.8.	Tremonha com inclinação $\alpha=15^\circ$ excêntrica	142
5.6.	Diferenças de pressões entre tremonhas	145
5.7.	Resultados dos esforços de tração obtidos nos sensores instalados nos dispositivos de sustentação da tremonha na região de transição do silo	153
5.8.	Resultados dos esforços obtidos nos sensores na base dos pilares do silo piloto (tremonhas excêntricas)	166
5.9.	Considerações gerais sobre a análise dos resultados	170
6.	CONCLUSÕES	173

7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	175
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	176

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A necessidade de ampliar a capacidade estática da rede armazenadora atendendo as exigências dos novos materiais de construção e das solicitações de projetos atuais tornaram os estudos sobre silos bastante desafiadores para os pesquisadores, projetistas e construtores. A situação atual exige uma avaliação crítica do crescimento do setor. De acordo com Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2019), o Brasil tem hoje capacidade para armazenar 167 milhões de toneladas de grãos, ante uma produção de 238,9 milhões de toneladas na safra 2018/2019. De acordo com estimativas da própria estatal, a capacidade ideal de armazenamento deve ser 20% superior à safra.

Nota-se, então, que existe uma demanda para instalação de novas unidades armazenadoras. Aliada a esta necessidade de expansão, o setor enfrenta problemas de acidentes que têm ocorrido nessas unidades: deformações, ruínas, colapsos estruturais, explosões de pós, incorrendo em grandes prejuízos materiais e humanos. Neste contexto, tornam-se necessários o aprimoramento das técnicas de construção e projetos em estruturas de armazenamento e a elaboração de uma norma brasileira específica, ainda inexistente. Numa análise geral, os projetos são desenvolvidos com base nos critérios de dimensionamento adotados pelas normas internacionais, com o uso de dados de propriedades físicas de produtos armazenados pouco estudados no país. Muitos pesquisadores brasileiros têm desenvolvido trabalhos com o propósito de subsidiar a elaboração da norma brasileira de silos, dentre os quais se podem citar Milani (1993), Calil (1984-1985), Gomes (1994-2000), Palma (2005), Cheung (2007) e Madrona (2008). Entre os diversos temas relacionados, o estudo do comportamento das pressões atuantes nessas estruturas tem se destacado nas diversas áreas de pesquisa. Pouco se conhece sobre as teorias empregadas no estudo dos silos agregada à qualidade do armazenamento, na busca de uma interação entre o produto e o sistema construtivo e estrutural. Grande número dos silos existentes não apresenta condições ideais de operação devido ao insuficiente conhecimento das pressões, do fluxo e das variáveis que afetam o comportamento dos produtos armazenados. Tal situação tem contribuído para os acidentes e colapsos em silos. Uma análise das principais normas e das teorias propostas indica a existência de divergências entre elas, principalmente quando se referem à determinação das pressões exercidas pelo produto armazenado sobre a estrutura.

De forma geral, as solicitações em um silo estão relacionadas aos seguintes tipos de ações: permanentes (peso próprio, cobertura, equipamentos diversos), variáveis (pressões dos produtos armazenados, vento, recalques) e excepcionais

(explosões e impactos). As principais ações que devem ser consideradas no dimensionamento de uma unidade armazenadora são aquelas advindas dos produtos armazenados, os quais transferem pressões para as paredes laterais e para o fundo do silo. Quando se avaliam especificamente as tremonhas, podem-se citar problemas de segregação do produto em descarga e ovalizações da estrutura causadas por pressões localizadas na região de transição entre corpo do silo e tremonha. Estas questões, dentre diversas outras, estão diretamente relacionadas à geometria da tremonha e às propriedades físicas dos produtos armazenados, fatores que causam diferentes concentrações de tensões nessas partes do silo. Ademais, tremonhas cujas paredes tenham grande inclinação, tendem a melhorar o fluxo do produto, porém, exigem maiores alturas da estrutura, majorando os custos de produção e instalação da unidade armazenadora.

Devido às incertezas relacionadas ao dimensionamento e ao manuseio dos produtos e da estrutura, e devido ao alto custo das instalações, as unidades de armazenamento devem apresentar robustez e confiabilidade e, por isso, muitas vezes a ponderação entre segurança e economia se desequilibra, tendendo para o lado da segurança.

Portanto, dadas as importâncias econômica, científica e social relativas à questão, configura-se a necessidade do correto conhecimento da determinação das ações e respectivas tensões que atuam nas tremonhas dos silos, especialmente pelo fato de que as normas internacionais não tratam dos esforços causados pela descarga com grande excentricidade. Por sua vez, estas pressões atuantes são diretamente dependentes das propriedades físicas dos produtos armazenados, do padrão de fluxo e da forma geométrica do corpo do silo e de sua tremonha, entre outros fatores.

Tais constatações induziram ao desenvolvimento deste trabalho de pesquisa com o propósito de abordar, com mais profundidade, o comportamento das pressões atuantes em diversas geometrias distintas de bocas de descarga de silos, as tremonhas, sob a ótica da correlação entre os modelos teóricos, experimentais e com as normas internacionais. Estas informações se fazem importantes, pois são necessárias ao projeto e desenvolvimento de equipamentos e silos objetivando o manuseio seguro e econômico do produto, visando à integridade da estrutura e equipamentos durante o processamento de produtos armazenados (carregamento e descarga).

2. OBJETIVOS

Esta pesquisa visou à determinação e avaliação de diversos esforços causados por diferentes geometrias de tremonhas de um silo esbelto cilíndrico metálico, submetido ao carregamento e descarregamento de grãos de milho. Ademais, foram adotadas as principais teorias e normas internacionais para a previsão das pressões nas tremonhas, confrontando-as com os resultados experimentais, considerando os dispositivos de descarga de fundo plano e inclinado, com descarga centrada e excêntrica.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Análise das pressões normais em tremonhas com diferentes geometrias instaladas em um silo piloto metálico esbelto, considerando dois tipos de rugosidade das paredes do corpo do silo (parede lisa e ondulada). Este estudo se deu nas condições de enchimento, armazenamento e descarregamento da estrutura (pressões estáticas e dinâmicas);
- Compreender e descrever os efeitos do descarregamento centrado e excêntrico em tremonhas quanto às pressões normais nas paredes das tremonhas e na região de transição;
- Comparação das principais teorias de cálculo de pressões normais em tremonhas de silos verticais existentes (JANSSEN, 1895; WALKER, 1966) com as principais normas internacionais de silos esbeltos (ISO 11697:2012, EN 1991-4:2006 e AS 3774:1996), tendo como referência os resultados de pressões e sobrepressões obtidos no silo piloto;
- Avaliação dos esforços de tração na região de transição, considerando a descarga do silo concêntrica e excêntrica;
- Verificação da influência das tremonhas excêntricas na distribuição das cargas axiais dos pilares de sustentação do silo piloto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Classificação dos silos

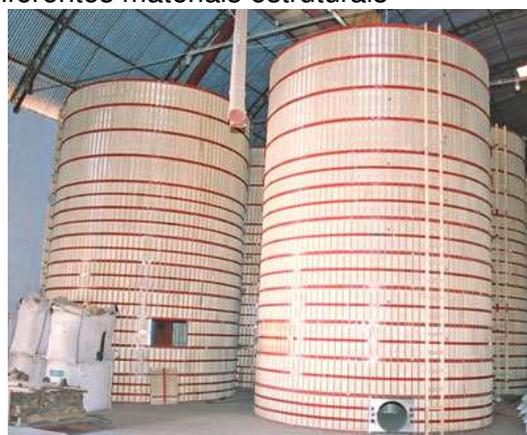
Os silos podem ser divididos em categorias de acordo com seu material estrutural, sua posição em relação ao solo ou conforme seja possível a entrada de ar no local de armazenamento (herméticos ou não herméticos).

Existem silos construídos com os mais diversos materiais estruturais, podendo-se citar: concreto armado (Figura 1-a) ou protendido, madeira (Figura 1-b), argamassa armada, pré-moldado, chapas metálicas (Figura 1-c), alvenaria (Figura 1-d), dentre outros.

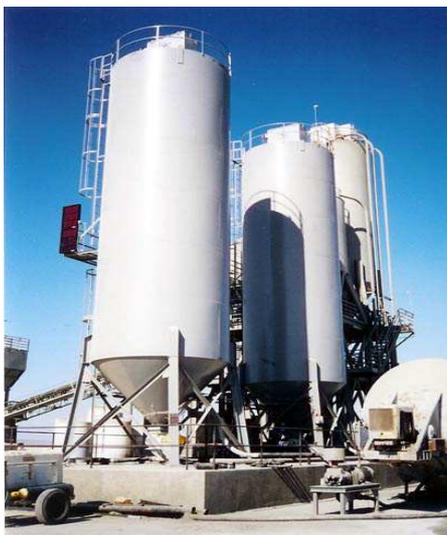
Figura 1 – Silos construídos com diferentes materiais estruturais



(a) Concreto Armado



(b) Madeira



(c) Chapas metálicas



(b) Alvenaria

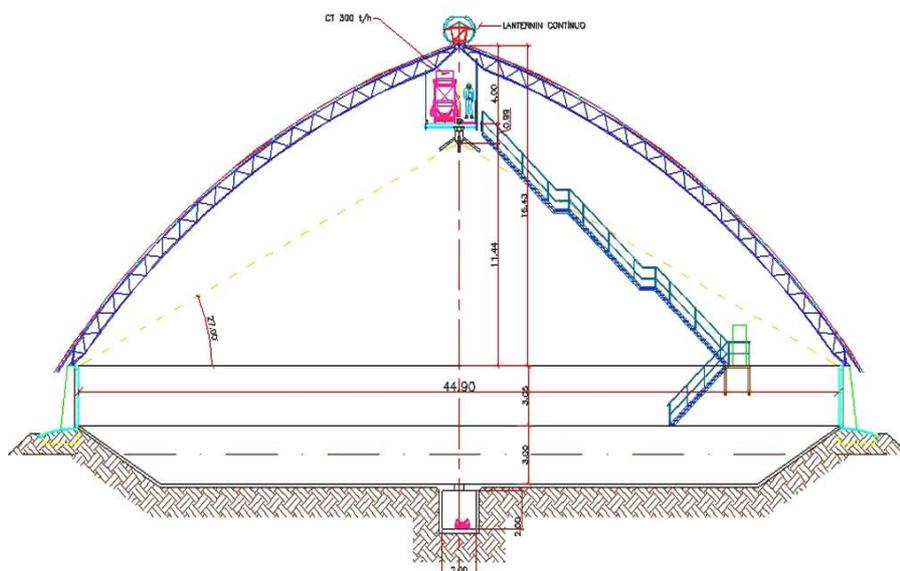
Quanto à tipologia construtiva, podem ser elevados, ou seja, construídos acima do nível do solo; subterrâneos, os quais apresentam os compartimentos de estocagem

abaixo do nível do solo, ou apresentar uma configuração intermediária entre os dois tipos supracitados, conhecidos como semi-subterrâneos (Figura 2).

Figura 2 – Classificação de silo quanto à construção.



a) Silo horizontal subterrâneo: vista geral e vista interna. Fonte: Gomes (2000).



b) Corte esquemático de um silo horizontal semi-subterrâneo. Fonte: Rasi (2014).



c) Silo elevado. Fonte: Madrona (2008).

A geometria também é parâmetro para a classificação dos silos, sendo sua relação entre altura do corpo (H) e diâmetro (D) considerada para tal, de acordo com o apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos silos em relação à esbeltez.

Normas	Silos baixos	Silos medianamente esbeltos	Silos esbeltos
Australiana (AS 3774:1996)	$H/D < 1,0$	$1,0 \leq H/D \leq 3,0$	$H/D > 3,0$
Europeias (EN 1991-4:2006) (DIN 1055-06:2005)	$0,4 \leq H/D \leq 1,0$	$1,0 \leq H/D \leq 2,0$	$H/D \geq 2,0$
Europeia (ISO 11697:2012)	$H/D < 1,0$	$1,0 \leq H/D \leq 1,5$	$H/D > 1,5$

H é a altura do silo,
D é o diâmetro do silo.

Fonte: Adaptado de Calil Jr. e Cheung (2007).

Quando se tratar de silo horizontal, sua dimensão longitudinal será preponderante em relação às outras dimensões (Figura 3).

Figura 3 – Silo horizontal elevado.



(a) Vista geral.



(b) Detalhe das tremonhas.

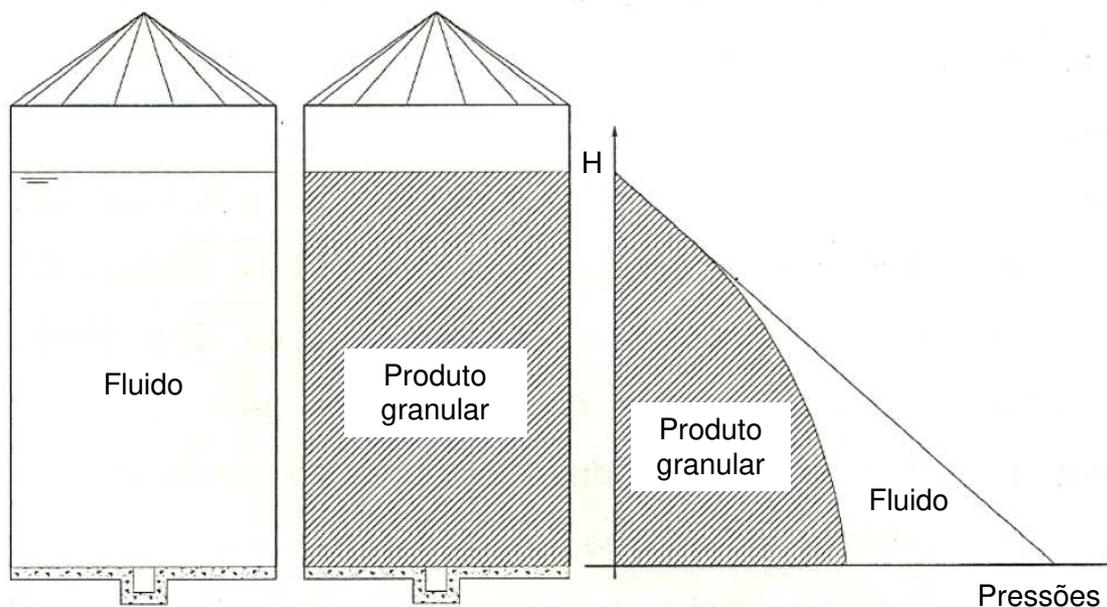
Fonte: Gomes (2000).

3.2. Caracterização de silos

Conforme citado por Calil (2007), os primeiros silos altos foram construídos entre 1870 e 1880, época em que os calculistas acreditavam que os produtos armazenados se comportavam como líquidos, projetando as estruturas para resistirem às pressões equivalentes às hidrostáticas. Este paradigma foi quebrado quando Roberts (1884), após realizar ensaios em modelos de escala reduzida, verificou que grãos diferenciavam-se no comportamento em relação aos líquidos. Em suas

observações, foram constatadas que as pressões verticais nas paredes dos silos aumentavam linearmente com a altura até um determinado ponto, a partir do qual o comportamento mudava e não era mais proporcional à altura. Desta forma, concluiu que uma parcela do peso do produto armazenado era transferida para as paredes por meio do atrito produto-parede. Assim, as pressões no fundo e nas paredes, na parte mais baixa de um silo, são menores que as exercidas por um líquido (Figura 4).

Figura 4 - Diferença entre líquidos e sólidos na distribuição de pressões.



Fonte: Calil (2007).

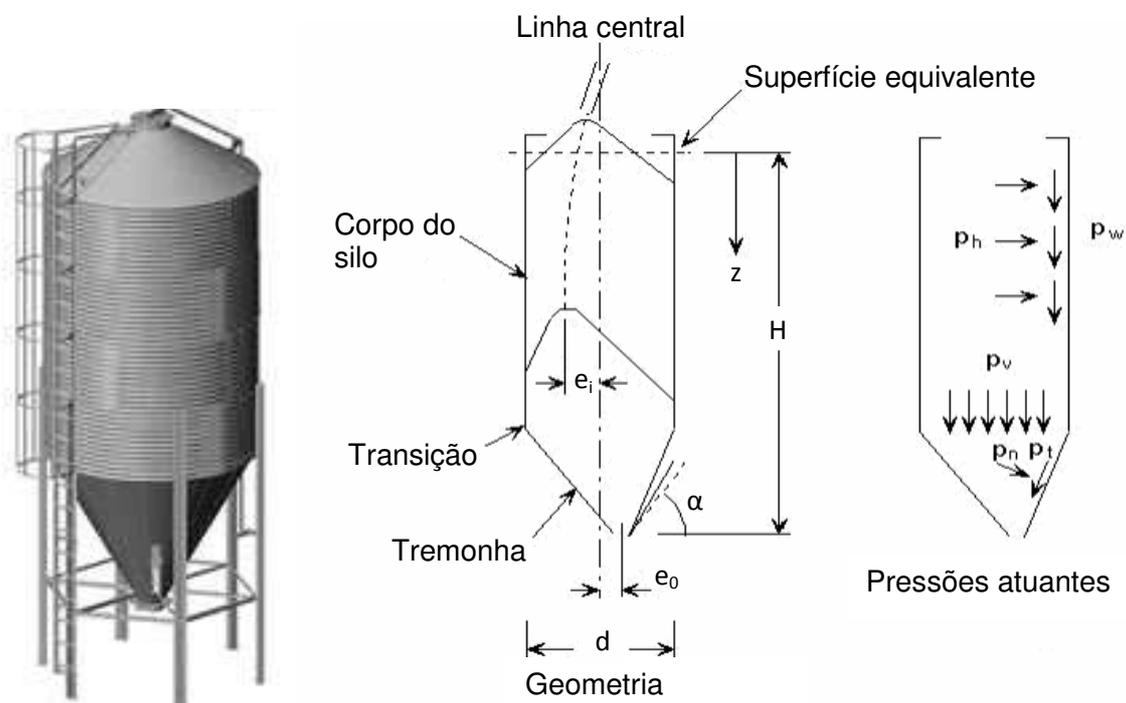
Ainda nesse sentido de comparação de cargas hidrostáticas e cargas de produtos granulados e em forma de pó, Tanaka (2009) realizou uma investigação em silos de pequeno porte (reservatórios de pequeno porte) na qual verificou que quando se possuem os dados referentes às propriedades dos materiais granulados, tais como ângulo de atrito interno e ângulo de atrito do grão com a superfície do reservatório, torna-se mais interessante o dimensionamento baseado na carga dos produtos armazenados, pois, dessa forma, observa-se um ganho considerável em termos de economia de material.

Janssen (1895) foi o pioneiro no estabelecimento de uma teoria para o cálculo das pressões que ocorrem em silos. Seu estudo baseou-se em silos cilíndricos no qual, por meio da análise de uma parte infinitesimal do produto armazenado, obtiveram-se as pressões via equilíbrio de forças. No entanto, este estudo considerava a condição de carregamento estático e, sabe-se hoje, que em condições de carga e descarga do silo ocorrem pressões superiores a estas encontradas por Janssen (1895).

Assim como para outras construções, a análise estrutural de um silo se dá considerando as ações atuantes, as quais podem ser classificadas em permanentes, variáveis e excepcionais. As ações permanentes atuantes no silo são o peso próprio e o peso de equipamentos fixos que nele se apoiam. Por sua vez, as cargas variáveis são constituídas pelos produtos armazenados, elementos estruturais que sofrem vibração e que estão fixos no silo (como correias transportadoras, por exemplo), esforços do vento, etc. Impactos de veículos e explosões de gases internos nos silos já configuram as ações excepcionais. Portanto, em um silo cheio, as principais pressões a serem consideradas são aquelas provenientes dos produtos ensilados, as quais são ilustradas na Figura 5, nas situações de enchimento, armazenamento e esvaziamento, sendo genericamente definidas por:

- Pressão horizontal no corpo do silo (p_h);
- Pressão vertical (p_v);
- Pressão de atrito do produto com a parede do corpo do silo (p_w);
- Pressão de atrito do produto com a parede da tremonha (p_t);
- Pressão normal à parede da tremonha (p_n).

Figura 5 - Notação da geometria de silos elevados e pressões atuantes.



em que:

α = ângulo da tremonha com a horizontal;

e_0 = excentricidade da boca de descarga;

e_i = excentricidade máxima de enchimento no topo da superfície;

z = ordenada com base na superfície equivalente.

Fonte: Adaptado de Palma (2005).

d = diâmetro do silo;

H = altura efetiva do silo;

Uma particularidade das ações que atuam nos silos está na avaliação do material ensilado, sendo distintamente consideradas as cargas de carregamento do produto no silo e as cargas induzidas pelo fluxo do produto armazenado. Cada um dos processos, seja carregamento, armazenamento ou descarga, causa tensões nas paredes da estrutura com magnitudes bastante diversas.

Conforme explicado por Madrona (2009), o peso próprio do produto armazenado em repouso dentro do silo causa uma tensão vertical que aumenta com a profundidade do silo. Concomitantemente, surge uma tensão horizontal devido ao confinamento lateral imposto pelas paredes da estrutura. A relação entre a pressão horizontal na parede do silo e a pressão vertical no produto é definida como coeficiente K (ou parâmetro K), tendo sido adotado pela primeira vez por Janssen (1895).

Na condição de carregamento e armazenamento (momento anterior ao início da descarga), o produto granular está submetido a um estado de tensões denominado de estado ativo. Este é identificado por apresentar a tensão principal máxima na direção vertical, coincidente com o eixo do silo, e a tensão mínima na direção horizontal. A partir do momento em que se inicia a descarga do material ensilado, essa configuração de tensões se altera, pois a maior tensão principal passa atuar na direção horizontal e a menor tensão principal, na direção vertical. Esta situação é chamada de estado passivo de tensões e é caracterizado pela expansão vertical do produto e compressão horizontal (deformação plástica).

3.3. Propriedades dos produtos armazenados

Como as características dos produtos granulares e pulverulentos são distintas daquelas dos sólidos e dos líquidos, torna-se mais complexo o projeto de silos com relação a fluxos contínuos e como estruturas econômicas e seguras e, para que isto ocorra, é fundamental que as cargas não sejam subestimadas e nem superestimadas.

Durante o processamento dos produtos armazenados a granel em silos com descarga por gravidade, é fundamental que os movimentos de entrada e saída desses produtos ocorram de uma forma efetiva e eficiente, sendo necessário o conhecimento das relevantes propriedades físicas e de fluxo dos produtos armazenados (MILANI, 1993). Poucas (ou incompletas) são as informações sobre essas propriedades, principalmente considerando-se os fatores temperatura, umidade e consolidação sob condições de armazenamento granelizado agindo simultaneamente.

A finalidade de uma especificação de cargas é fornecer condições para projeto de estruturas de silos seguras e econômicas. Para uma estrutura ser segura e econômica, é importante que as cargas não sejam especificadas como maiores que as

estritamente necessárias. A segurança da estrutura só pode ser determinada pelo conhecimento dos tipos e modos possíveis de ruínas que nela possam ocorrer. As características de descarga do material armazenado, o tipo de segregação, a formação de zonas em repouso, o completo esvaziamento do silo, as distribuições de pressões nas paredes e fundações, a integridade e o custo da construção podem ser determinados, direta ou indiretamente, pelo tipo de fluxo (massa ou funil). Portanto, a forma como o material armazenado vai fluir na descarga deve ser determinada enquanto o silo está sendo selecionado, projetado e ou quando mudanças em suas estruturas são previstas (CALIL JR., 1990).

Segundo Calil Jr. *et al.* (1997), o primeiro passo para o projeto de fluxo e estruturas de silos verticais é a determinação das propriedades físicas de produtos armazenados e esta deve ser realizada levando-se em conta as condições mais severas que podem ocorrer no silo.

As propriedades físicas dos produtos armazenados são muito importantes para o processamento dos sistemas armazenados durante o carregamento e o descarregamento, sendo que, no carregamento podem ocorrer compactação e segregação e, no descarregamento, pode ocorrer a formação de abóbadas estáveis sobre a boca de descarga, acarretando sérios problemas de fluxo e problemas estruturais na instalação. A queda posterior dessas abóbadas dá origem a pressões muito elevadas sobre as paredes dos silos e tremonhas. Já a formação do conduto de descarga, quando corre fluxo de funil, provoca sérias segregações e avarias nos elementos mecânicos de descarga (RAVENET, 1983).

Com relação à determinação das propriedades físicas e ou de fluxo dos produtos armazenados a granel, Jenike (1964) desenvolveu um estudo propondo o uso de um aparelho de cisalhamento direto, apropriado para produtos armazenados, denominado “Jenike Shear Cell” ou célula de cisalhamento de Jenike (Figura 6), e que, desde então, tem sido usado por muitos pesquisadores em todo o mundo, podendo-se citar Madrona e Calil Jr. (2009), Lopes Neto, Nascimento e Fank (2014), Grudzień, Chaniecki e Babout (2018), Deshmukh *et al* (2019), Salehi *et al* (2020), dentre diversos outros.

Nesse referido aparelho, a amostra do produto é conduzida ao cisalhamento ou é deslizada sobre uma placa de mesmo material do silo a ser projetado, sob condições específicas, obtendo-se os ângulos de atrito.

Figura 6 - Máquina de cisalhamento de Jenike.



Fonte: Teixeira (2003).

Com os parâmetros determinados com esse equipamento são possíveis a determinação e a predição das pressões que ocorrerão na estrutura e, principalmente, os tipos de fluxo, importantes para o processamento e expedição do produto armazenado a granel. Nesse aparelho, podem-se, também, reproduzir as condições de armazenamento com o tempo, chamado de efeito de consolidação. Para determinação do efeito do tempo de consolidação de produtos armazenados é utilizada uma bancada de consolidação associada ao aparelho de cisalhamento (Figura 7).

A bancada consiste de seis conjuntos, onde as células do aparelho de cisalhamento são transferidas para permanecerem no tempo pré-determinado, sob a ação de uma força vertical estática, por meio do pendural de pesos com cargas. Durante a consolidação, as células contendo as amostras do produto são colocadas dentro de recipientes herméticos que preservam a umidade contida na amostra em análise.

Figura 7 - Bancada de consolidação.



Fonte: Teixeira (2003).

Ao estudar a influência da compressibilidade dos sólidos armazenados em silos, observa-se que a maioria dos produtos granulares e pulverulentos é relativamente compressível, afetando significativamente os parâmetros de projeto. Portanto, a compressibilidade, que por muitos métodos de cálculo não é considerada, deve ser levada em consideração no projeto de um silo, em virtude das consequências que podem acarretar no comportamento da estrutura.

Considerando a importância deste assunto, Milani (1993) apresentou um trabalho com o objetivo principal de contribuir com o desenvolvimento da norma nacional específica para projeto e construção de silos. Este autor definiu uma metodologia para a determinação das propriedades de produtos armazenados com a finalidade de adoção dos parâmetros necessários para o cálculo das ações e fluxo de produtos armazenados em estruturas de armazenamento. Para a determinação destas propriedades, ele utilizou farinha de trigo e colza em um aparelho de cisalhamento direto, de movimento de translação, conhecido em nível internacional por “Jenike Shear Cell” (máquina de ensaio TSG 70-140).

Ao comparar diferentes equipamentos para medir as propriedades de fluxo do cimento, Arnold e Reed (1987) concluíram que as determinações feitas por diversos equipamentos muitas das vezes não atingem os valores necessários para permitir um escoamento seguro do produto armazenado, enquanto que os ensaios realizados pelo aparelho de cisalhamento de Jenike apresentaram os valores mais adequados para as propriedades determinadas para o cimento.

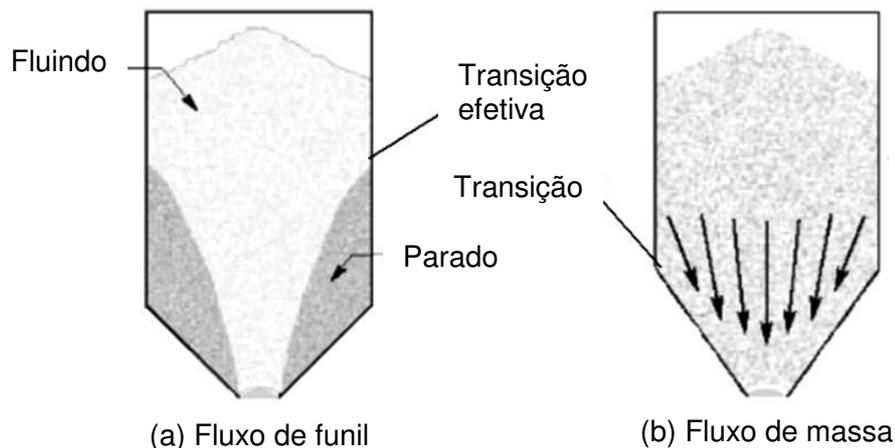
Schwedes (1983) concluiu que para o projeto de silos as propriedades físicas dos produtos armazenados devem ser exatamente conhecidas ou determinadas, sendo o melhor método e equipamento para tais determinações é o desenvolvido por Jenike.

Dentre as propriedades mensuráveis dos produtos granulares e pulverulentos, as mais importantes para o estudo de silos são citadas por Gaylord e Gaylord (1984) e Mohsenin (1986), sendo o ângulo de repouso e ângulo de atrito interno (ϕ_i), o efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e); o ângulo e coeficiente de atrito com a parede (ϕ_w); o peso específico em função do estado de consolidação e umidade do material (γ) e a granulometria.

3.4. Fluxo em silos

A descarga do material por gravidade pode ocorrer conforme dois tipos principais de fluxo: por fluxo de funil e fluxo de massa (Figura 8).

Figura 8 - Principais tipos de fluxo.



Fonte: Palma (2005).

A existência de um tipo de fluxo ou outro dependerá das propriedades físicas do produto, assim como da geometria e rugosidade da superfície da tremonha.

O fluxo de funil caracteriza-se pela formação de um canal de fluxo, alinhado com a boca de descarga, cercado por uma zona na qual o produto permanece estático, enquanto que o fluxo de massa é caracterizado pelo movimento de todas as partículas do produto armazenado durante a operação de descarga.

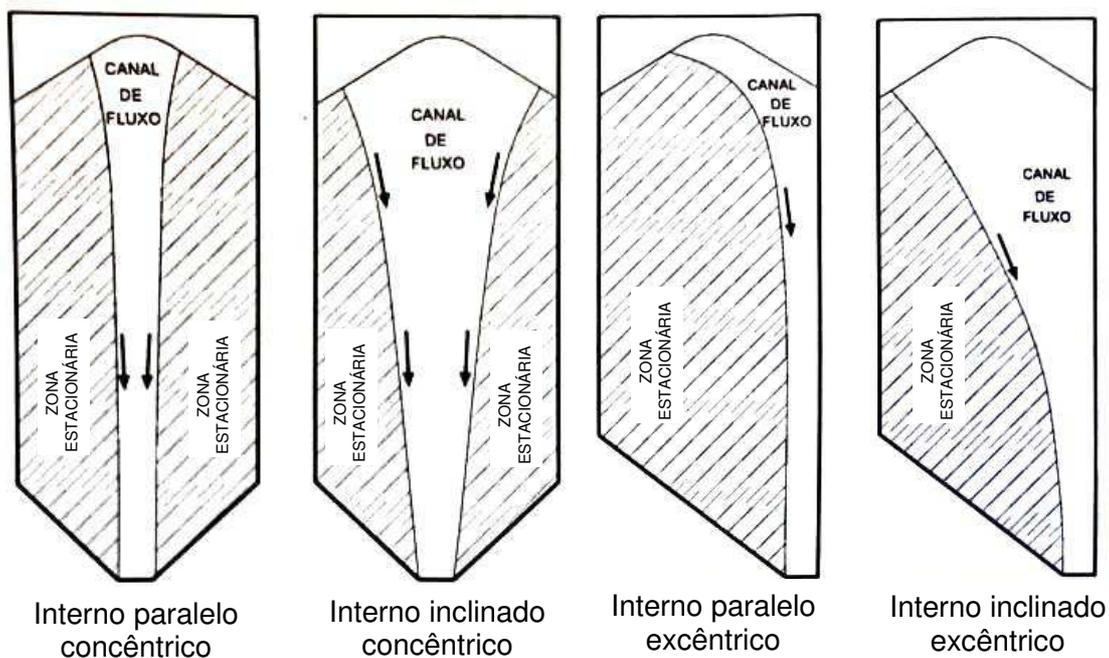
Segundo Calil Jr. (1990), o tipo de fluxo caracteriza o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente. Determina, também, a distribuição das pressões nas paredes do silo e fundação e a integridade e custo da construção.

A formação do conduto de descarga provoca uma diminuição das pressões nas paredes laterais devida à zona estagnada. No entanto, na região de transição efetiva existe uma elevação acentuada nessas pressões (região onde o canal de fluxo encontra a parede do silo).

Diversos padrões de canais de fluxo podem se formar, dependendo do tipo de produto armazenado, geometria e posicionamento da tremonha, entre outros fatores (Figura 9).

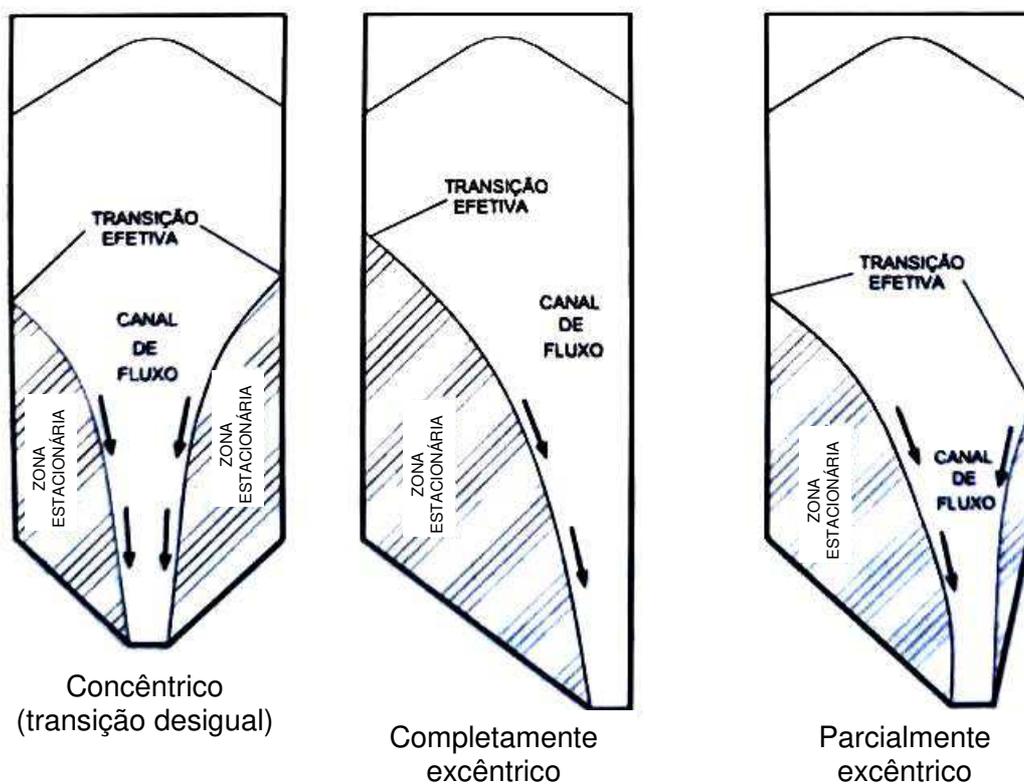
Existem, ainda, situações nas quais o padrão de fluxo de material dentro do silo fica indeterminado, podendo ocorrer parcialmente o de massa e o de funil, conforme Figura 10.

Figura 9 - Fluxo de funil, em tubo.



Fonte: Calil Jr. e Cheung (2007).

Figura 10 - Fluxo de funil misto.



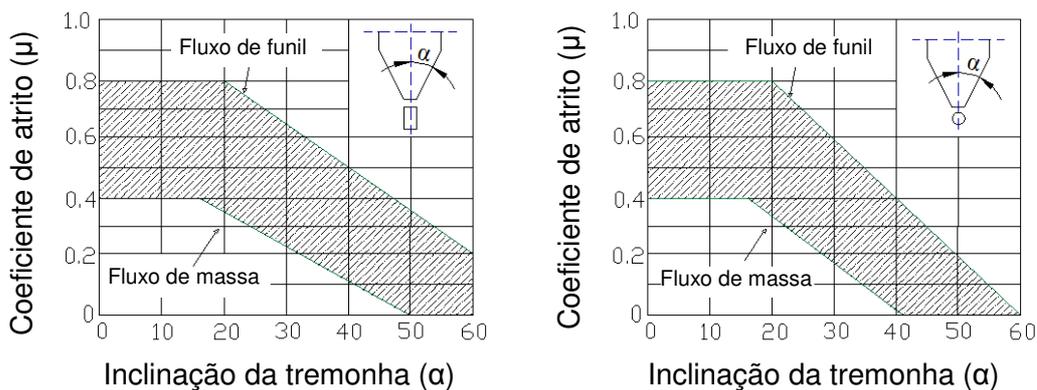
Fonte: Calil Jr. e Cheung (2007).

Para determinação do tipo de fluxo, podem-se citar os procedimentos constantes nas normas internacionais australiana (*Australian Standard - AS*

3774:1996) e europeia (*European Committee of Standardization - EN 1991-4:2006*), tal como ilustrado na Figura 11 e Figura 12, respectivamente.

Nestas normas supracitadas, gráficos predizem o tipo de fluxo em função do ângulo ou do coeficiente de atrito do produto armazenado com a parede, da inclinação das paredes da tremonha e de sua geometria (geralmente cônicas ou piramidais, concêntricas).

Figura 11 - Determinação do tipo de fluxo.

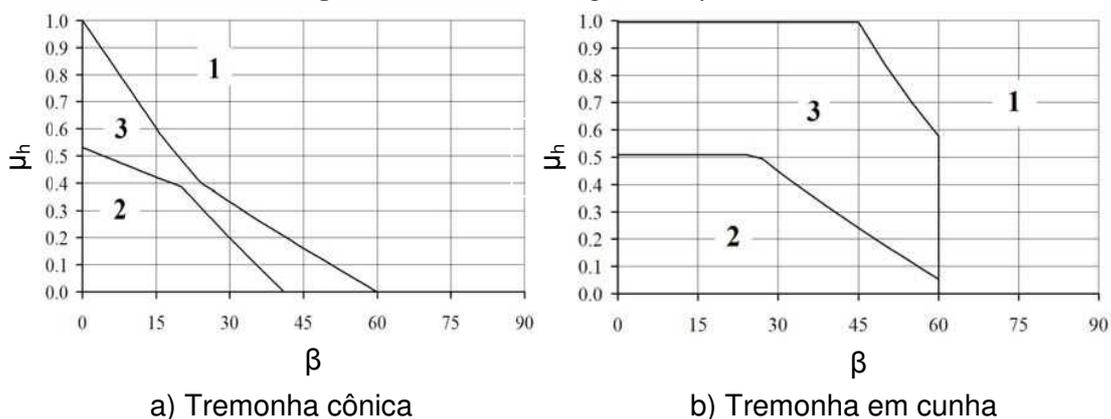


Legenda:

 Zona de fluxo instável

Fonte: Adaptado de AS 3774 (1996).

Figura 12 - Determinação do tipo de fluxo.



Sendo:

1 = Fluxo de funil;

2 = Fluxo de massa;

3 = Fluxo de massa ou funil;

β = Ângulo de inclinação da tremonha;

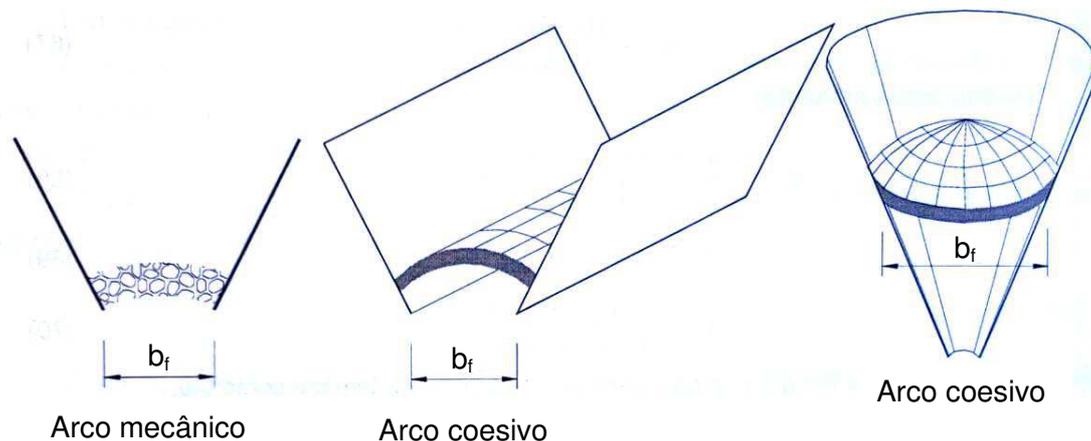
μ_h = Coeficiente de atrito.

Fonte: Adaptado de EN 1991-4 (2006).

3.5. Obstruções do fluxo

O principal objetivo no projeto de células de armazenamento é assegurar que o sólido armazenado fluirá por gravidade sem a ocorrência de obstruções do fluxo. No entanto, estes indesejáveis distúrbios de fluxo podem ocorrer e os dois principais tipos de bloqueios são o arco coesivo (ou abóbada) e o arco mecânico, representados na Figura 13, conforme relatado por Calil Jr. e Cheung (2007).

Figura 13 - Formação de arcos na boca da tremonha.



Fonte: Calil Jr. e Cheung (2007).

Nota-se que um arco coesivo é aquele formado como resultado da consolidação e resistência do sólido armazenado pela influência da coesão do produto. Pode ser distinguido do arco mecânico, pois neste o entrosamento das partículas do sólido ocorre quando a média das dimensões das partículas é grande comparada com a abertura da boca da tremonha.

Para a formação de um arco estável ou tubo, o sólido armazenado adquiriu, dentro do contorno da célula de armazenamento, resistência suficiente para suportá-lo. A resistência é função do grau de consolidação, pois um sólido "fofo" não tem resistência, mas a adquire sob compressão (GOMES, 2000).

A função fluxo (FF; adimensional) serve para estimar a capacidade dos sólidos em fluir por gravidade e se define como sendo a relação entre a tensão principal de consolidação (σ_1) *versus* a tensão inconfina de ruptura (σ_{ic}), mostrada na Equação 1, sendo uma importante propriedade do produto estocado para a avaliação de sua capacidade de fluxo, já que descreve seu comportamento de consolidação.

$$FF = \frac{\sigma_1}{\sigma_{ic}} \quad (1)$$

A função fluxo é diretamente influenciada pelo tempo de armazenamento. Todavia, tanto o seu grau de consolidação quanto sua resistência são influenciados, também, pela umidade e temperatura do sólido.

Jenike (1964) cita que a função fluxo (FF) pode ser avaliada conforme descrito na Tabela 2, a seguir, sendo a caracterização quanto ao fluxo definida a partir de certos limites desse índice.

Tabela 2 - Caracterização dos materiais armazenados quanto à função fluxo (FF).

Limites da FF	Caracterização quanto ao fluxo
FF < 2	Muito coesivo
2 < FF < 4	Coesivo
4 < FF < 10	Fluxo fácil
10 < FF	Fluxo livre

Fonte: Adaptado de Jenike (1964).

Portanto, para que não ocorra obstrução de fluxo, a boca de saída da tremonha (boca de descarga) deve ser dimensionada com base nessa característica.

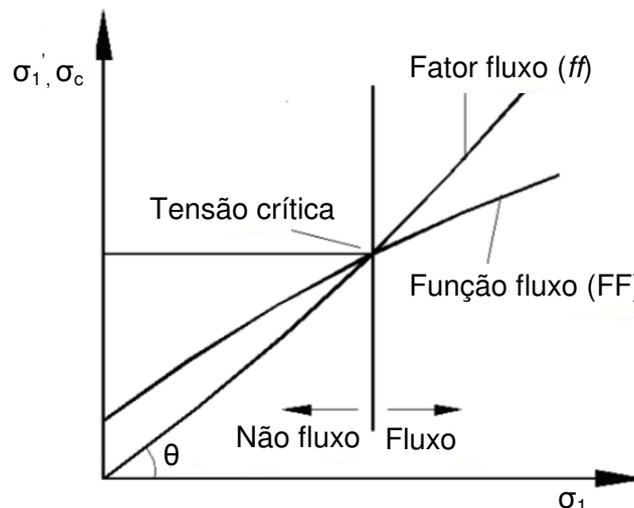
Ainda, para o correto descarregamento de um silo, outro parâmetro importante é considerado: o fator fluxo da tremonha (ff). Este indicador de fluidez dos produtos armazenados é uma propriedade dependente tanto do silo quanto do produto, sendo necessário conhecer o ângulo efetivo de atrito interno do produto (θ_e), o ângulo de atrito do produto com a parede (θ_w), a geometria e a inclinação das paredes da tremonha (α). Observa-se que, ao contrário da função fluxo (FF), quanto mais baixo o valor do fator fluxo da tremonha (ff), melhor será a fluidez do material ensilado.

O fator fluxo da tremonha é definido como a relação da tensão de consolidação (σ_1) pela tensão confinada (σ_1') atuante em um arco estável imaginário formado por partículas do produto e sustentado pelas paredes da tremonha, conforme expresso na Equação 2:

$$ff = \frac{\sigma_1}{\sigma_1'} \quad (2)$$

Na Figura 14, observa-se a relação entre FF e ff , onde situações abaixo da tensão crítica indicam a ausência de fluxo (formação de obstruções). A tensão crítica, nesse caso, serve também para o cálculo da mínima dimensão da boca de abertura da tremonha (PALMA, 2005).

Figura 14 - Função fluxo do produto armazenado e fator fluxo da tremonha.



Onde

σ_1 = tensão de consolidação;

σ_1' = tensão inconfiada;

σ_c = tensão inconfiada de ruptura;

$\theta = \text{invtg}(1/ff)$.

Fonte: Palma (2005).

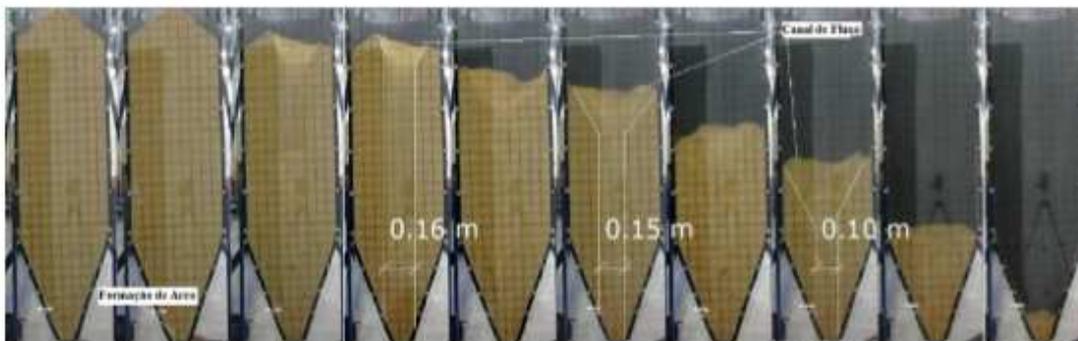
Sendo assim, para que ocorra descarga por gravidade, sem obstruções, a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$FF = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} > ff = \frac{\sigma_1}{\sigma_1'} \quad (3)$$

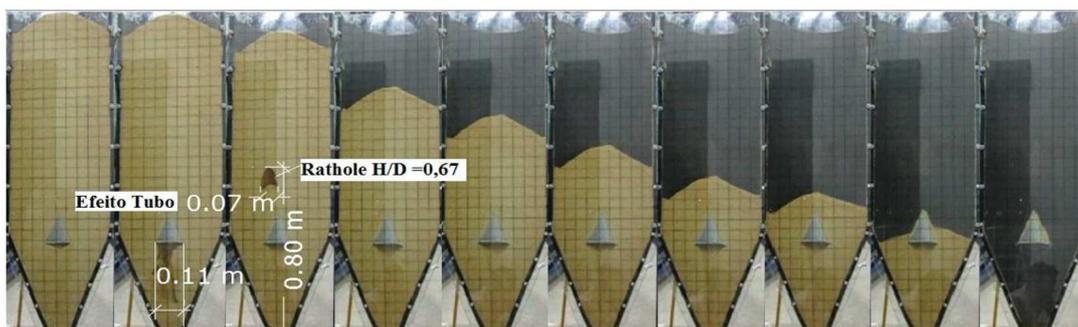
No intuito de avaliar as condições de fluxo de silos para que não haja obstrução no processo de descarregamento, Nascimento e Bandeira (2017) desenvolveram um estudo sobre a utilização de *inserts* em tremonhas durante a descarga de ração avícola armazenada. Dessa forma, a inserção deste dispositivo apresentou-se como uma boa solução ao problema de formação de abóbadas sobre o orifício de descarga em silos verticais. Isto se deve pelas mudanças proporcionadas nos estados tensões ativo e passivo e, por consequência, a promoção do fluxo de massa, como pode ser observado na Figura 15.

De acordo com o relatado, o emprego de *insert* nesta zona mostrou-se eficaz pela não formação de arcos coesivos e a promoção de descarga uniforme e ininterrupta.

Figura 15 – Sequência fotográfica da descarga do silo com e sem uso de *inserts*.



(a) Descarregamento do silo sem emprego de *insert* na tremonha.



(b) Descarregamento do silo com emprego de *insert* na tremonha.

Fonte: Nascimento e Bandeira (2017).

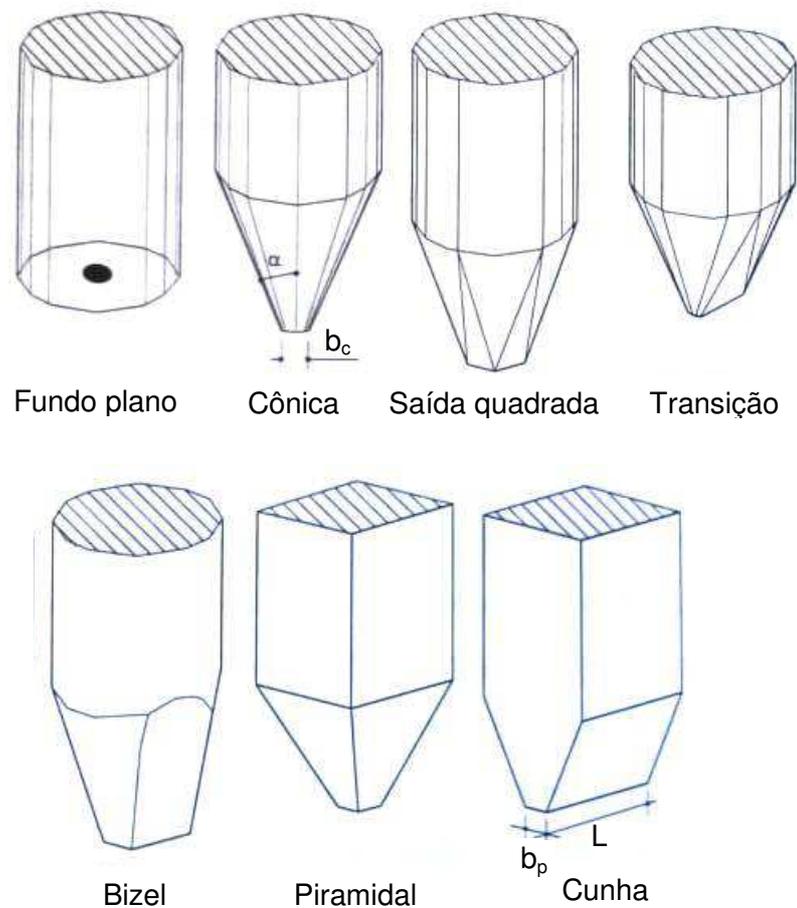
3.6. Projeto de tremonhas

Diversos fatores influem no dimensionamento de tremonhas, dentre eles, as propriedades físicas dos produtos armazenados. Tendo essas características sido ensaiadas em laboratório ou adotadas de estudos e normas existentes, os itens que se seguem são determinantes na definição geométrica e estrutural desses sistemas de descarga dos silos.

3.6.1. Geometria e inclinação das paredes

A forma e o material empregado na construção da tremonha de um silo definem, numa primeira análise, o tipo de fluxo que irá ocorrer. As inclinações das paredes juntamente com o tipo de superfície permitem avaliar o comportamento do produto dentro da célula armazenadora. Dessa forma, vários tipos de tremonha são empregados e escolhidos em função das características do produto. Entre as formas principais podem ser citadas as cônicas, as tronco-piramidais, em bixel, as de cunha, e são geralmente empregadas em sistemas de armazenamento verticais e horizontais (Figura 16).

Figura 16 - Tipos de tremonhas.



Fonte: Calil Jr. e Cheung (2007).

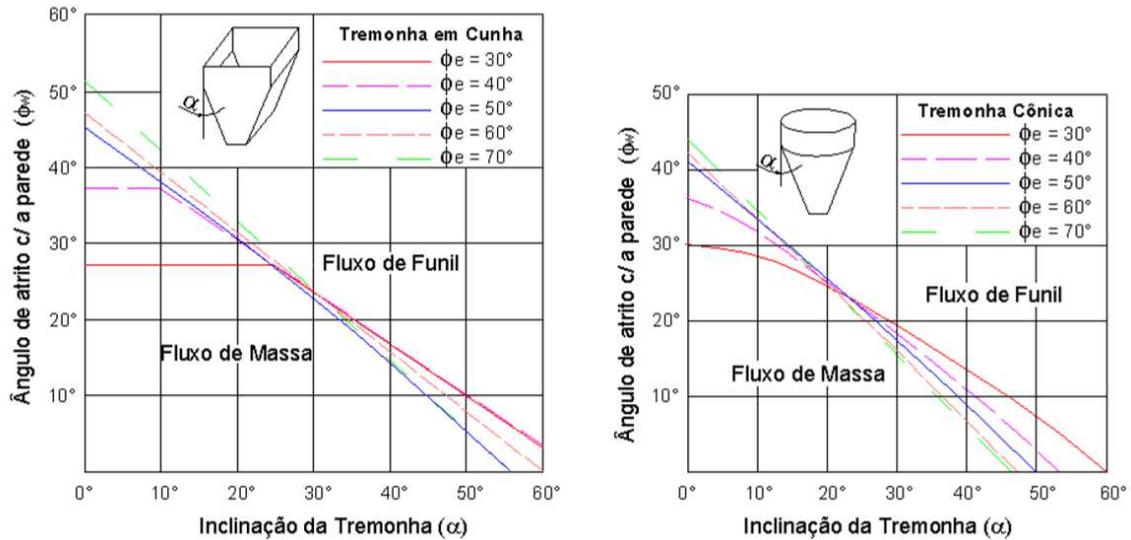
Geralmente, tremonhas em cunha necessitam de menor altura quando comparados a tremonhas cônicas, por permitirem inclinações maiores e ainda apresentarem fluxo de massa (para produtos com as mesmas propriedades) (JENIKE, 1964). No caso de fluxo de funil, as tremonhas têm ângulos de inclinação maiores com a vertical e, portanto, menores alturas. Isso permite a utilização do silo em locais onde há limitação da altura da estrutura, mas exige que dispositivos sejam instalados para promover o total esvaziamento do sistema de armazenamento.

Muitos autores desenvolveram estudos para definir o melhor ângulo de inclinação de tremonhas (α), prevendo o tipo de fluxo baseado no ângulo de atrito do produto com a parede do silo (θ_w) e no ângulo de atrito interno do produto armazenado (θ_e).

No trabalho de Schulze (1996), citado por Palma (2005), foram apresentados diagramas para a definição da inclinação das tremonhas em cunha e cônicas para diversos ângulos de inclinação de sua parede (Figura 17). Sendo assim, o dimensionamento da estrutura de acordo com esses diagramas garante o tipo de fluxo

que irá ocorrer na estrutura, desde que os outros parâmetros envolvidos na análise sejam atendidos.

Figura 17 - Diagrama para dimensionamento de tremonhas.



Fonte: Schulze (1996).

Gaylord e Gaylord (1984) sugerem, para o caso específico de fluxo de massa em tremonhas piramidais, que a determinação da inclinação das paredes seja feita segundo a equação a seguir, considerando que α_1 e α_2 são ângulos das paredes de união da tremonha:

$$\tan^2 \alpha = \tan^2 \alpha_1 + \tan^2 \alpha_2 \quad (4)$$

Para as tremonhas em bisel ou em cunha, o equacionamento proposto para a inclinação máxima das paredes da tremonha, buscando o fluxo de massa, é:

$$\alpha \leq 60^\circ - 1,33\phi_w \quad (5)$$

Sendo:

$$\phi_w \leq 0,9\phi_e \quad (6)$$

$$L \geq 6.b_p \quad (7)$$

Sendo:

- α = ângulo de inclinação da tremonha, em graus;
 ϕ_w = ângulo de atrito do produto com a parede, em graus;
 ϕ_e = efetivo ângulo de atrito interno do produto, em graus;
 L e b_p = dimensões da boca de descarga, em metros.

Outra proposta de equacionamento para a inclinação de tremonhas foi sugerida por McClein (1986), também para se obter o fluxo de massa, conforme se apresentam na Equação 8 e Equação 9, sendo aplicadas para tremonhas de eixo simétrico e tremonhas em cunha, respectivamente.

$$\alpha_{crít}^{eíxosimétrico} = 0,5 \left\{ 180 - \cos^{-1} \left[\frac{(1 - \text{sen}\phi_e)}{2\text{sen}\phi_e} \right] - \left[\phi_w + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}\phi_w}{\text{sen}\phi_e} \right) \right] \right\} \quad (8)$$

$$\alpha_{crít}^{cunha} = \frac{e^{3,75 \cdot (1,01)^{(\phi_e - 30)/10}} - \phi_w}{0,725 \cdot (\text{tg}\phi_e)^{0,2}} \quad (9)$$

Sendo:

- $\alpha_{crít}$ = máximo ângulo de inclinação com a vertical da tremonha, em graus;
 ϕ_w = ângulo de atrito do produto com a parede, em graus;
 ϕ_e = efetivo ângulo de atrito interno do produto, em graus.

3.6.2. Cálculo do fator fluxo da tremonha

Walker (1966) propõe que o fator fluxo da tremonha (ff) seja determinado pelas seguintes equações:

$$ff = \frac{1 + \text{sen}\phi_e}{\Delta}; \text{ na situação em que } \alpha + \phi_w \geq 45^\circ \quad (10)$$

$$ff = \frac{1 + \text{sen}\phi_e}{\Delta} \cdot \text{sen}2(\alpha + \phi_w); \text{ na situação em que } \alpha + \phi_w < 45^\circ \quad (11)$$

Em que:

$$\Delta = 2 \cdot \text{sen}\phi_e \cdot \text{sen}2(\alpha + \epsilon) - \tan \alpha \cdot [1 - \text{sen}\phi_e \cdot \cos 2(\alpha + \epsilon)] \quad (12)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(\phi_w + \text{sen}^{-1} \frac{\text{sen}\phi_w}{\text{sen}\phi_e} \right) \quad (13)$$

Sendo:

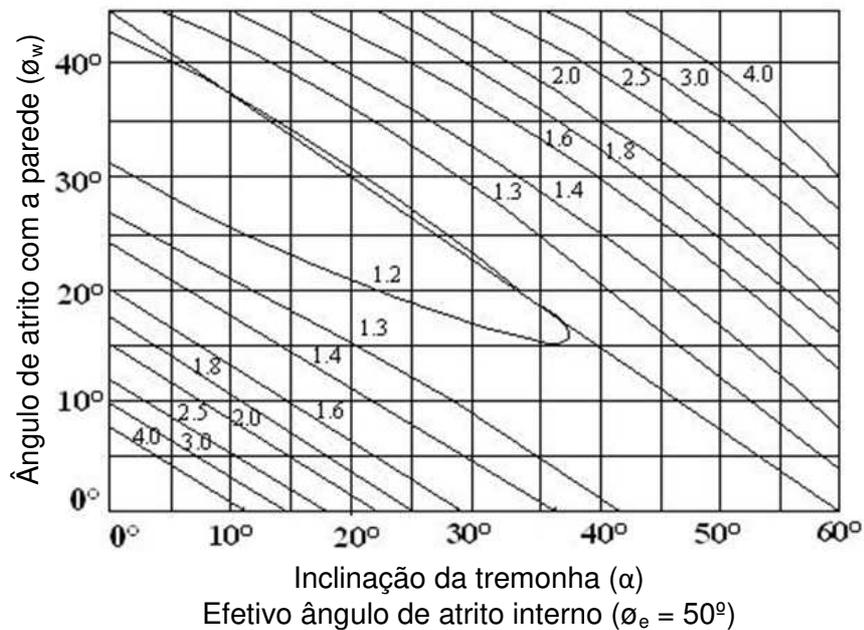
α = ângulo de inclinação da tremonha, em graus;

ϕ_w = ângulo de atrito do produto com a parede, em graus;

ϕ_e = efetivo ângulo de atrito interno do produto, em graus.

A metodologia proposta por Jenike (1964) determina o fator fluxo da tremonha (ff) utilizando gráficos formulados a partir do ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w) e da inclinação da tremonha (α), para diversos ângulos efetivos de atrito interno (ϕ_e). A Figura 18 ilustra um destes gráficos, específico para o ângulo de atrito interno $\phi_e = 50^\circ$.

Figura 18 - Gráfico para determinação do fator fluxo (ff) de tremonhas em cunha.



Fonte: Jenike e Johanson (1979).

Enstad (1975) propôs que o fator fluxo seja calculado pelas Equações 14 a 19, que seguem:

$$ff = \frac{Y(1 + \text{sen}\phi_{es})}{2(X - 1) \cdot F(\alpha) \cdot \cos(90 - \alpha)} \quad (14)$$

Sendo que:

$$F(\alpha) = \left(\frac{65}{130 + \alpha} \right)^m \left(\frac{200}{200 + \alpha} \right)^{1-m} \quad (15)$$

$$2\beta = \phi_{ws} + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}\phi_{ws}}{\text{sen}\phi_{es}} \right) \quad (16)$$

$$\theta = \beta + \alpha \quad (17)$$

$$X = \frac{2^m \text{sen}\phi_{es}}{1 - \text{sen}\phi_{es}} \left[\frac{\text{sen}(\beta + \theta)}{\cos(90 - \alpha)} + 1 \right] \quad (18)$$

$$Y = \frac{\left[2(1 - \cos\theta) \right]^m \cdot \theta^{(1-m)} \cdot \cos(90 - \alpha) + \text{sen}\beta \cdot (\text{sen}\theta)^{(1+m)}}{(1 - \text{sen}\phi_{es})(\text{sen}\theta)^{(2+m)}} \quad (19)$$

Sendo :

α = ângulo de inclinação da tremonha, em graus;

ϕ_{es} = valor superior do efetivo ângulo de atrito interno, em graus;

ϕ_{ws} = valor superior do ângulo de atrito com a parede, em graus;

$m = 0$ para tremonhas retangulares, onde $L \geq 30$;

$m = 1$ para tremonhas de eixo simétrico;

Para tremonhas retangulares com $L \leq 30$, o valor de “m” deve ser estimado por interpolação entre 0 e 1.

3.6.3. Cálculo da tensão crítica (σ_{crit})

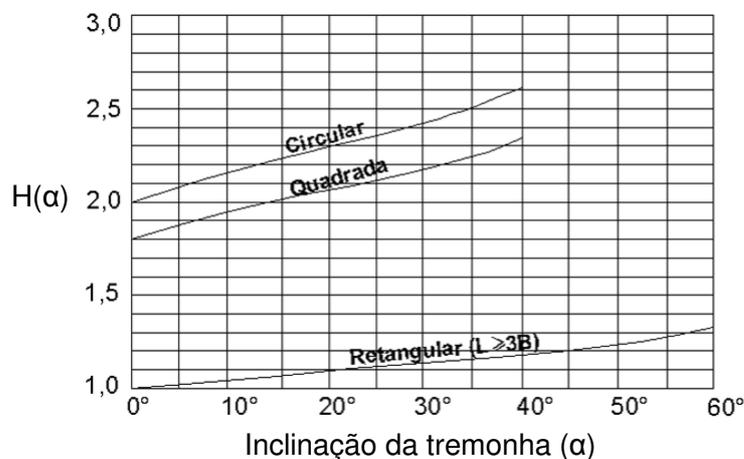
Conforme já discutido anteriormente, a tensão crítica é um parâmetro importante de ser estudado, pois dela infere-se a mínima dimensão da boca de descarga, assim como a possibilidade de obstruções de fluxo. Diante do exposto, tem-se que uma forma de se determinar a referida tensão crítica é representar a curva da função fluxo do produto (FF), num gráfico de tensão de consolidação (σ_1) versus tensão inconfina (σ_1'). No mesmo, também se faz a representação do fator fluxo da tremonha (ff), traçando através da origem uma reta com inclinação igual à

$inv\ tg(1/ff)$. A tensão crítica, então, será dada pelo ponto de interseção dessas duas retas (FF e ff).

3.6.4. Cálculo da função $H(\alpha)$

O dimensionamento geométrico da boca de saída da tremonha pode ser realizado, também, pela adoção da função $H(\alpha)$. Esse parâmetro é dependente da forma geométrica e da inclinação da tremonha. A Figura 19 apresenta o gráfico proposto por Jenike (1964) para a determinação do valor de $H(\alpha)$ para tremonhas cônicas e em cunha.

Figura 19 - Determinação da função $H(\alpha)$ para tremonhas cônicas e em cunha.



Fonte: Jenike (1964).

Esse parâmetro também pode ser calculado conforme mostrado a seguir:

$$\sigma_1' = \frac{\gamma \cdot b}{H(\alpha)} \quad (20)$$

Em que:

σ_1' = tensão principal atuando em um arco estável hipotético que pode formar-se dentro do silo, em kN.m^{-2} ;

γ = peso específico do produto (valor inferior), em kN.m^{-3} ;

b = largura da boca de saída da tremonha, em metros;

$H(\alpha)$ = função dependente da forma geométrica e da inclinação da tremonha.

Para que não haja formação de arco estável na tremonha, e sua conseqüente interrupção de fluxo de produto, Calil Jr. e Cheung (2007) citaram que o valor de

abertura de saída crítica ($b_{f,min}$) pode ser calculado pela equação anterior utilizando-se a tensão crítica, ficando assim definida:

$$b_{f,min} = \frac{\sigma_{ic,crít} \cdot H(\alpha)}{\gamma} \quad (21)$$

Sendo:

$\sigma_{ic,crít}$ = resistência inconfiada do produto (dependente da tensão de consolidação σ_1), em kN.m^{-2} ;

γ = peso específico do produto armazenado, em kN.m^{-3} .

Com o intuito de evitar instabilidades que alterem o tipo de fluxo, Jenike (1964) recomenda que a dimensão mínima da boca de descarga dada pela equação anterior seja majorada em 20%.

Com boa aproximação, Jenike & Johanson (1968) citado por Gaylord & Gaylord (1984), sugeriram as seguintes expressões para o cálculo da mínima dimensão da boca de descarga de tremonhas:

$$b_{min} \geq \frac{2,2 \cdot \sigma_{crít}}{\gamma_{inf}}, \text{ para bocas de descarga circulares;} \quad (22)$$

$$b_{min} \geq \frac{1,3 \cdot \sigma_{crít}}{\gamma_{inf}}, \text{ para bocas de descarga retangulares.} \quad (23)$$

Sendo:

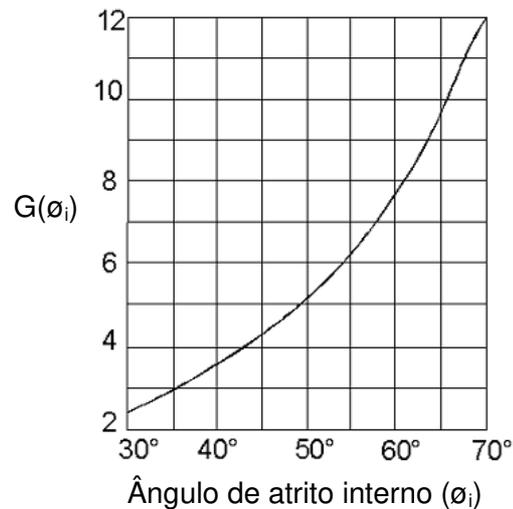
b_{min} = dimensão mínima da boca de descarga, em metros;

$\sigma_{crít}$ = resistência inconfiada do produto (dependente da tensão de consolidação σ_1), em kN.m^{-2} ;

γ_{inf} = valor efetivo inferior do peso específico do produto armazenado, em kN.m^{-3} .

3.6.5. Cálculo da função $G(\phi_i)$

A função $G(\phi_i)$ é denominada fator de tubo e, conforme proposta por Jenike (1964), pode ser determinada em função do ângulo de atrito interno do produto armazenado (Figura 20).

Figura 20 - Determinação da função $G(\phi_i)$.

Fonte: Jenike (1964).

Em se tratando de bocas de descarga circulares ou quadradas de silos com fluxo de funil, a determinação de b_f é suficiente para garantir que não haja formação de obstruções em arco e em tubo, sendo sua mínima dimensão dada pela seguinte expressão matemática:

$$b_{f,\min} = \frac{G(\phi_i) \cdot \sigma_{\text{crít}}}{\gamma_{\text{inf}}} \quad (24)$$

Sendo:

$b_{f,\min}$ = dimensão mínima da boca de descarga, em metros;

$\sigma_{\text{crít}}$ = resistência inconfiada do produto (dependente da tensão de consolidação σ_1), em kN.m^{-2} ;

γ_{inf} = valor efetivo inferior do peso específico do produto armazenado, em kN.m^{-3} .

Por sua vez, para bocas de descarga retangulares, torna-se necessário a determinação da outra dimensão desta geometria, b_p , para evitar a obstrução em arco. Roberts (1987) recomendou um fator de fluxo de $ff = 1,7$ para determinação de b_p . Para tanto, o maior valor do efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_i) será determinado com o ângulo de inclinação da tremonha $\alpha = 30^\circ$. Portanto, simplificando a anterior para $\alpha = 30^\circ$ e utilizando o valor de $\sigma_{\text{crít}}$ obtido com $ff = 1,7$, ter-se-á:

$$b_p = \frac{1,15 \cdot \sigma_{\text{crít}}}{\gamma_i} \quad (25)$$

3.7. Pressões nas paredes e no fundo dos silos esbeltos

A estimativa das pressões nas paredes dos silos tem sido objeto de pesquisa por muitos anos. Enquanto existe uma variedade muito grande de aproximações para o problema, uma questão é consenso: as pressões exercidas nas paredes dos silos durante condições de operação são diretamente relacionadas com o tipo de fluxo que aparece no silo carregado e, mais importante, quando em fase de descarga.

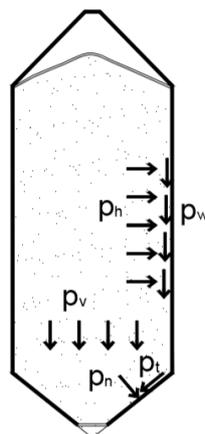
De um modo geral, a predição das pressões nas paredes dos silos que apresentam fluxo de funil é mais difícil e incerta do que para silos que apresentam fluxo de massa (CALIL,1985). Este é especialmente o caso para silos com saídas múltiplas ou excêntricas e ou carregamento excêntrico. Devido à dificuldade de precisão na predição dos tipos de fluxo, há muito para se estudar sobre as formas geométricas dos silos, configurações de carga e descarga e tipos de tremonhas. A maioria das limitações conduz a estimativas de cargas que são conservativas, levando à não ocorrência dos desvios extremos.

As normas internacionais existentes para a estimativa das sobrepressões nas paredes dos silos são basicamente apoiadas em duas teorias: a teoria de Janssen (1895), para as estimativas das cargas iniciais ou de carregamento no silo, e a teoria de Jenike (1968, 1973), para a estimativa das cargas de fluxo em silos com fluxo de massa e fluxo de funil.

Os procedimentos utilizados pelas normas na estimativa das pressões na parede são bastante variáveis. As mais importantes normas existentes no mundo adotam coeficientes de sobrepressão para atender os efeitos durante a descarga, podendo-se citar: a canadense (*Canadian Farm Building Code* – CFBC:1983), a americana (*American Concrete Institute* - ACI 313:1991), a australiana (*Australian Standard* - AS 3774:1996), a alemã (*Deutsche Norm* - DIN 1055-6:2005) e a *International Organization for Standardization* - ISO 11698:2012.

O produto armazenado exerce pressões nas paredes verticais e no fundo do silo. Na parede vertical atuam forças perpendiculares, denominadas pressões horizontais (p_h), e forças paralelas devidas ao atrito do produto com a parede, denominadas de pressões de atrito (p_w). No fundo do silo atuam forças denominadas pressões verticais (p_v), que podem ser decompostas em pressões normais e tangenciais à parede da tremonha, sendo representadas por p_n e p_t , respectivamente (Figura 21).

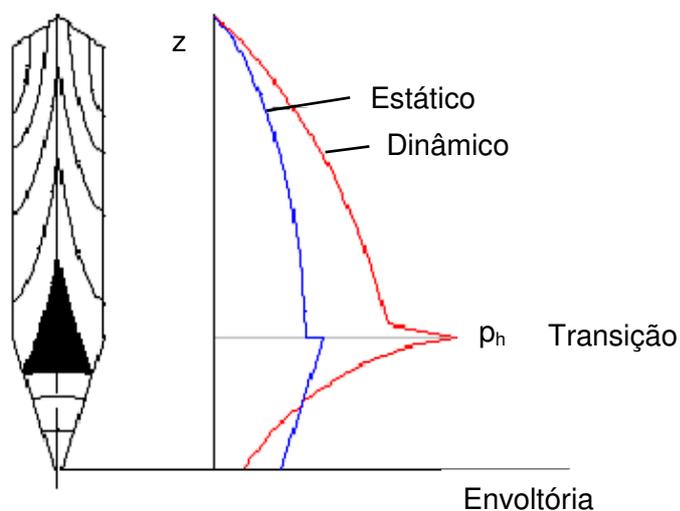
Figura 21 – Pressões atuantes nas paredes de um silo.



Fonte: Madrona (2008).

Cabe salientar que o campo de tensões iniciais, que atua enquanto o silo está sendo carregado na condição inicialmente vazio e com a boca de saída fechada, é totalmente diferente do campo de tensões dinâmicas, que atua quando é realizada alguma descarga do produto armazenado, como pode ser observado na Figura 22. Esta diferença nos campos de tensões, entre as situações de carregamento e descarga, leva à formação de sobrepressões consideráveis que atuam nas paredes do silo quando a situação de fluxo é obtida (PALMA, 2005). No entanto, o percentual deste aumento em relação à fase de carregamento ainda é alvo de discussões e pesquisas.

Figura 22 – Campo de tensões de um silo (fluxo de massa).



Fonte: Palma, 2005.

As pressões são geradas em consequência de processos induzidos no silo, como o carregamento, armazenamento e descarga. Como para cada uma dessas

etapas existe um comportamento estrutural diferente para o silo, faz-se necessário separar as etapas para se efetuar as análises estruturais.

Muitos pesquisadores estudaram pressões em silos, consagrando algumas formulações. Janssen (1895), Airy (1897), Jamieson (1903), Reimbert *et al.* (1943), Zakrzewski (1959), Lenczner (1963) e Jenike e Johanson (1968) são alguns dos pesquisadores que contribuíram historicamente para o estudo das pressões laterais, desenvolvendo diversas metodologias para avaliar distribuições de pressões, comparando estes valores com os valores obtidos experimentalmente.

Um dos trabalhos que se destacou neste campo de pesquisas foi de Nielsen & Kristiansen (1980), que investigaram as distribuições de pressões em um silo carregado com cevada, sendo um estudo realizado em um silo piloto com 46m de altura e 7m de diâmetro e outro, em um silo modelo construído com 5m de altura e 0,7m de diâmetro. Do trabalho, os autores concluíram que a distribuição de pressões em um silo carregado com cevada por uma entrada excêntrica não é descrita pela formulação de Janssen (1895).

Uma das maneiras encontradas para solucionar os problemas de incompatibilidade das pressões teóricas e experimentais vem sendo adotar coeficientes parciais de sobrepressão para cada condição de carregamento e descarga. Calil Jr. (1985) desenvolveu um trabalho experimental a fim de verificar o comportamento das pressões laterais de carregamento e descarga. Foi utilizado um silo modelo onde as pressões foram determinadas em função da relação altura do carregamento e lado do silo, e do tipo de descarga (centrada e excêntrica). O produto armazenado foi o alpiste. Com base nos experimentos, o autor apresentou valores máximos e mínimos para os valores de coeficientes de sobrepressão a serem aplicados às pressões obtidas pela formulação de Janssen (1895).

Wilms (1985) apresentou um procedimento de cálculo para estabelecer o campo de tensões no interior e nas paredes de um silo, utilizando para isso o Método das Características que, segundo o autor, possibilita resolver equações diferenciais que descrevem o campo de tensões sem lançar mão de hipóteses simplificadoras sobre as distribuições de pressões, como acontece nos métodos clássicos.

Rotter *et al.* (1986 citado por Silva, 1993) discutiram sobre deficiências dos vários métodos propostos para cálculo de pressões em silos, podendo-se citar algumas causas:

- Utilização de tratamentos teóricos que assumem um comportamento isotrópico e homogêneo do produto e uma geometria perfeita dos silos;
- Não inclusão de considerações estatísticas ou probabilísticas;

- Pouca atenção dada ao controle de considerações de projeto estrutural e aos modos de ruptura de estruturas de silos e reservatórios.

Stoffers (1988; citado por Silva, 1993) relatou o caráter estocástico da resistência e das cargas em silos. Expôs sobre a necessidade de se utilizar um processo probabilístico para a análise desses dois fatores que permita verificar a importância das várias variáveis envolvidas. Especificamente em relação às cargas, o autor observou que seu comportamento é hoje apenas parcialmente conhecido devido a diversos fatores, tais como: a complexidade do comportamento do fluxo do produto a ser armazenado, a enorme variedade de produtos existentes, a natureza estocástica das cargas exercidas pelo produto, equipamentos de medição não apropriados para a obtenção dos valores de pressão durante a descarga, etc.

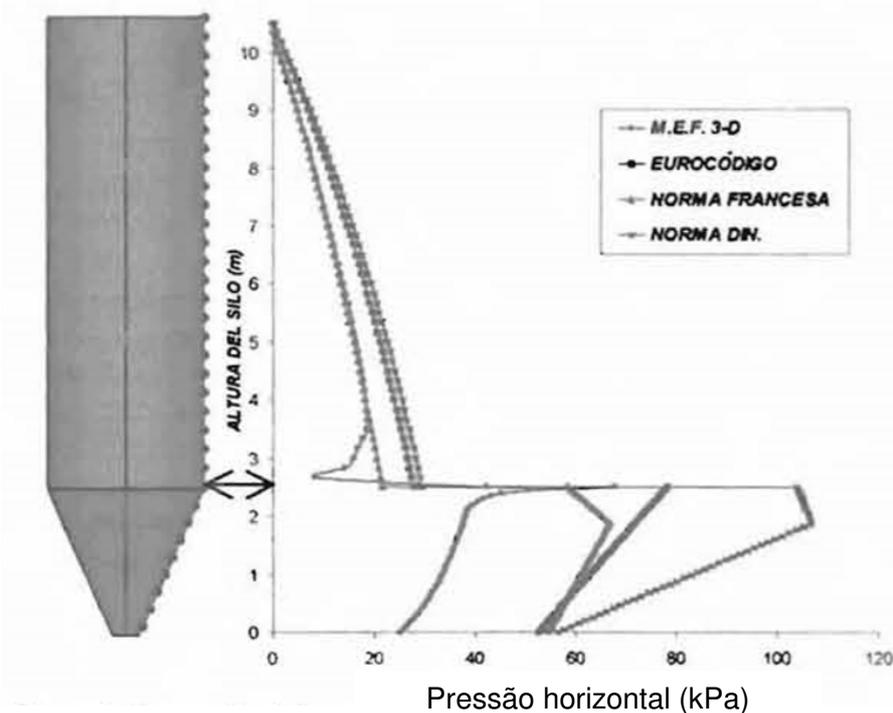
Ooi, Phame e Rotter (1990) desenvolveram uma análise estatística a partir de um conjunto de oito experimentos em um silo piloto de concreto armado para armazenamento de cevada. Esses experimentos incluíram fases de carregamento, armazenamento e descargas concêntricas e excêntricas. Os dados experimentais, considerados como observações amostrais de uma população estocástica, foram sujeitos a uma regressão harmônica. Segundo os autores, a pressão para cada ponto pode ser entendida como tendo dois componentes: um sistemático e outro aleatório. O componente sistemático está relacionado com o produto armazenado, com a geometria do silo, com as imperfeições geométricas na parede do silo, com a excentricidade de carregamento e de descarga e com o padrão de fluxo. Já o componente aleatório se relaciona com as variações de pressão em função do tempo, normalmente ignoradas no projeto. Para todos os experimentos, foram ajustados valores para o coeficiente de atrito com a parede μ' e para o coeficiente K, a partir das distribuições de pressões de Janssen. Segundo os autores, esses ajustes mostraram que há pouca diferença entre armazenamento e descarga, indicando que altas pressões em um ponto são sempre balanceadas por baixas pressões em algum outro ponto. Observaram também que os valores ajustados diferiam significativamente entre os valores obtidos em normas. Segundo os autores, a tendência é “resumir” os resultados de um grande número de experimentos e traçar uma envoltória com as pressões máximas obtidas em cada nível, ignorando-se todos os demais dados que permitiriam descrever o comportamento não simétrico das pressões.

Pham (1985) discutiu em seu trabalho a natureza das ações em silos e definiu que as cargas têm um comportamento com uma pressão média e uma flutuação aleatória, mostrando a importância do estudo visando à confiabilidade estrutural. Sendo assim, faz-se necessário um tratamento probabilístico de cargas em silos, tendo em vista que uma avaliação racional da segurança estrutural e que a

determinação de fatores de carga para uso em projeto estrutural somente podem ser alcançadas quando métodos probabilísticos são usados na definição das cargas.

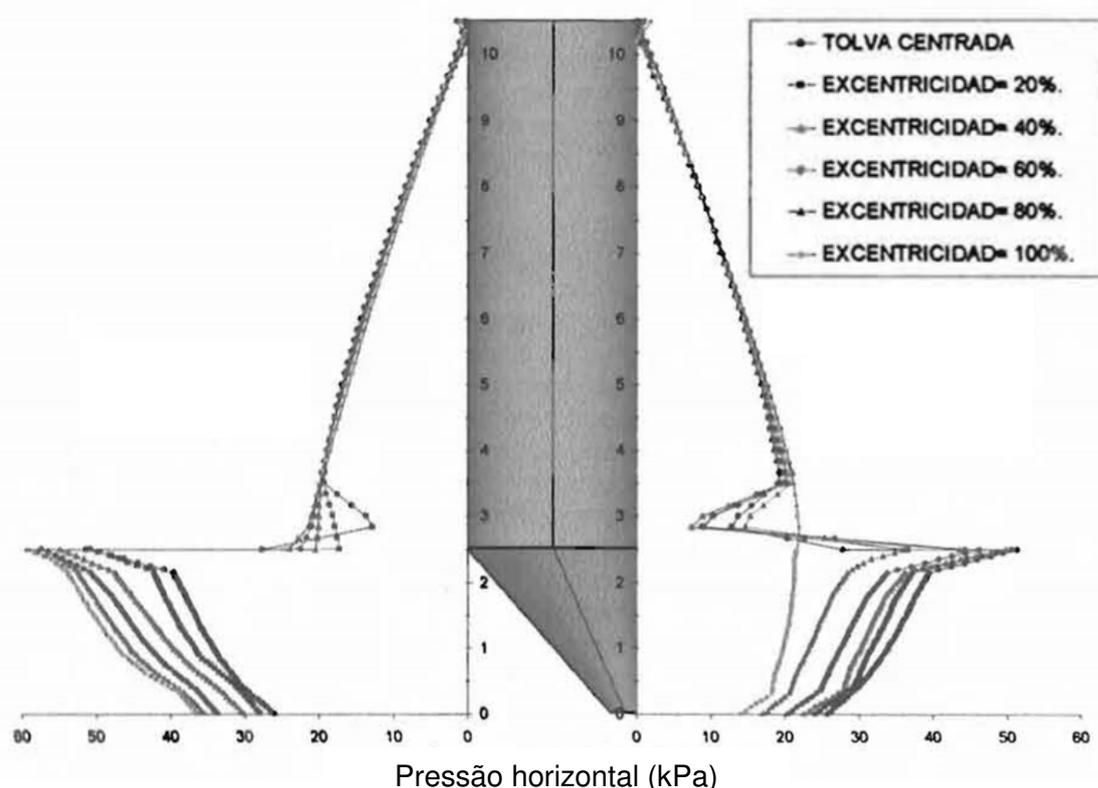
Yáñez, Guaita e Lopez (2001) realizaram um trabalho numérico para avaliação das tensões em silos com descarga excêntrica, validando seu modelo computacional com um modelo de silo cilíndrico com tremonha centrada, cujo comportamento estrutural é conhecido e bem definido. Para tal trabalho, foi necessário escolher elementos finitos que simulassem o material da silagem, bem como o atrito existente entre a parede do silo e os grãos. Alguns resultados do referido trabalho podem ser observados nas Figura 23 e Figura 24, onde se notam as divergências nas pressões horizontais entre o MEF e diversas normas de cálculo (Figura 23) e as diferenças entre pressões horizontais no lado anterior e posterior ao deslocamento da boca de descarga (Figura 24), as quais são esperadas, demonstrando a eficácia deste método na simulação do comportamento estrutural de silos.

Figura 23 – Comparação das pressões horizontais em tremonha centrada segundo o MEF e algumas normas existentes.



Fonte: Yáñez, Guaita e Lopez (2001).

Figura 24 – Variação das pressões horizontais com a alteração da excentricidade da tremonha.

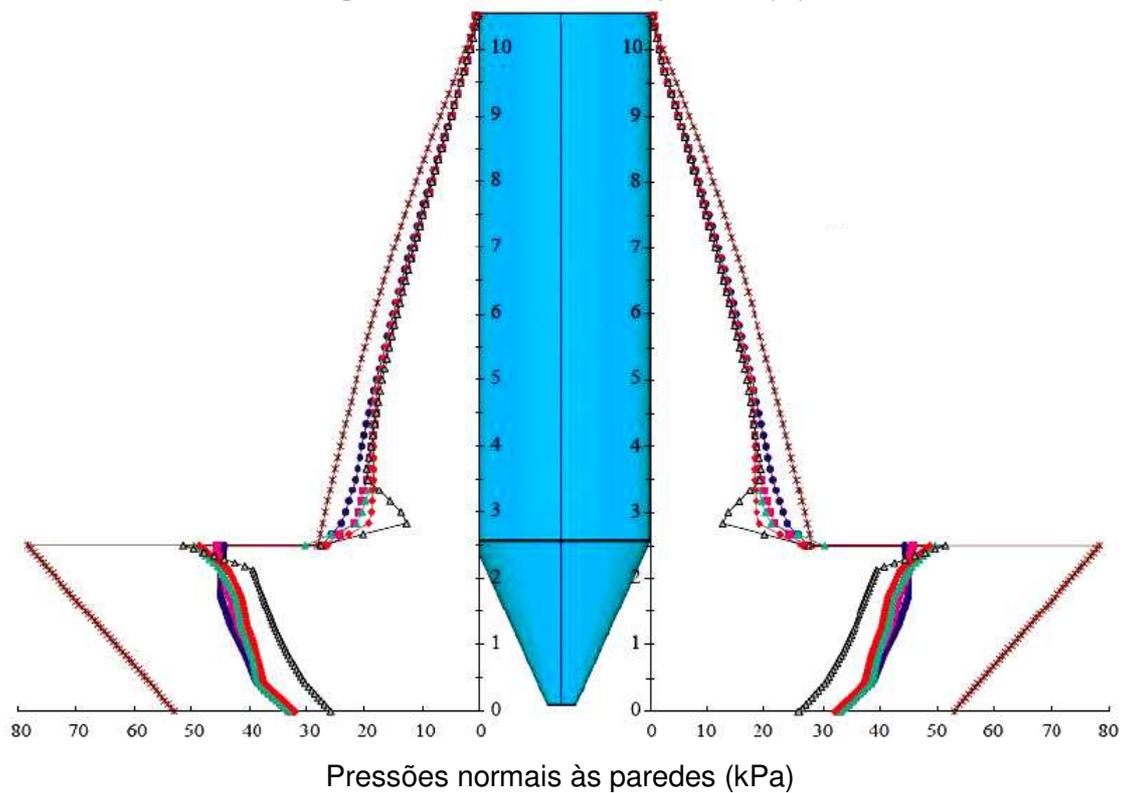


Observação: tolva centrada é o termo equivalente a tremonha centrada, em português.
 Fonte: Yáñez, Guaita e Lopez (2001).

Outro interessante trabalho sobre as pressões em silo foi o apresentado por Guaita, Couto e Ayuga (2003), onde se demonstrou a variabilidade das pressões normais às paredes de silos cilíndricos com tremonhas concêntricas e excêntricas, durante a descarga do material granular. Neste trabalho de simulação numérica de silos via método dos elementos finitos foi considerado o comportamento elastoplástico do material armazenado, através do critério de Druker-Prager (DRUKER e PRAGER, 1952), sendo utilizado o elemento finito “SOLID-45” do *software* Ansys®. As paredes do silo foram consideradas como rígidas. As Figura 25, Figura 26 e Figura 27 ilustram os resultados do trabalho, onde se observam que as pressões aumentam no lado oposto à excentricidade da boca de descarga (representado por L2). Porém, quando se avaliam os ângulos de atrito interno em uma mesma configuração de silo, as pressões normais à parede aumentam com a diminuição desta propriedade do produto.

Pelos resultados observados, observa-se a ocorrência do aumento nas pressões horizontais na descarga do material ao longo de toda a largura do silo e, conseqüentemente, um pico de pressão ao longo da parede devida à constrição repentina na transição do fluxo (parede vertical e tremonha).

Figura 25 – Pressões normais às paredes de um silo: tremonha centrada e variação do ângulo de atrito interno do produto (ϕ_i).

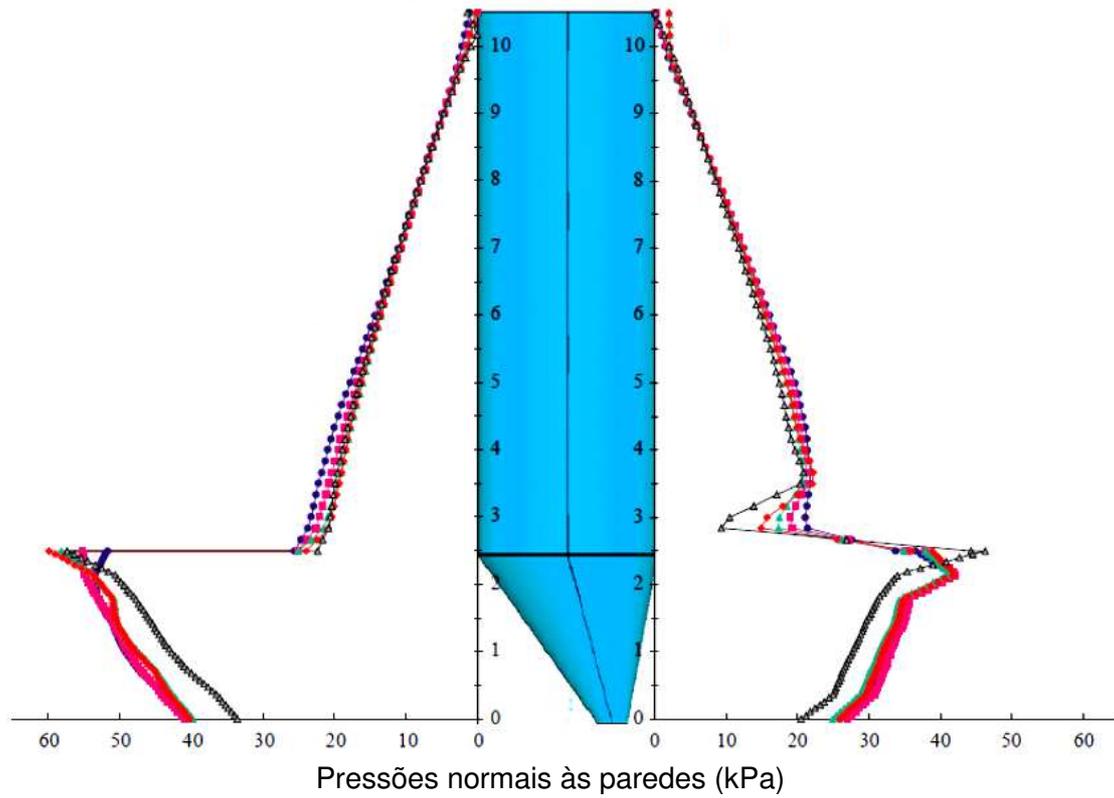


Legenda:

- $\phi_i = 22^\circ$; ■ $\phi_i = 25^\circ$; ▲ $\phi_i = 28^\circ$; ◆ $\phi_i = 30^\circ$;
- * Eurocode, L₁, L₂; ▲ modelo elástico.

Fonte: Guaita, Couto e Ayuga (2003).

Figura 26 – Pressões normais às paredes de um silo: tremonha com 60% de excentricidade e variação do ângulo de atrito interno do produto (ϕ_i).

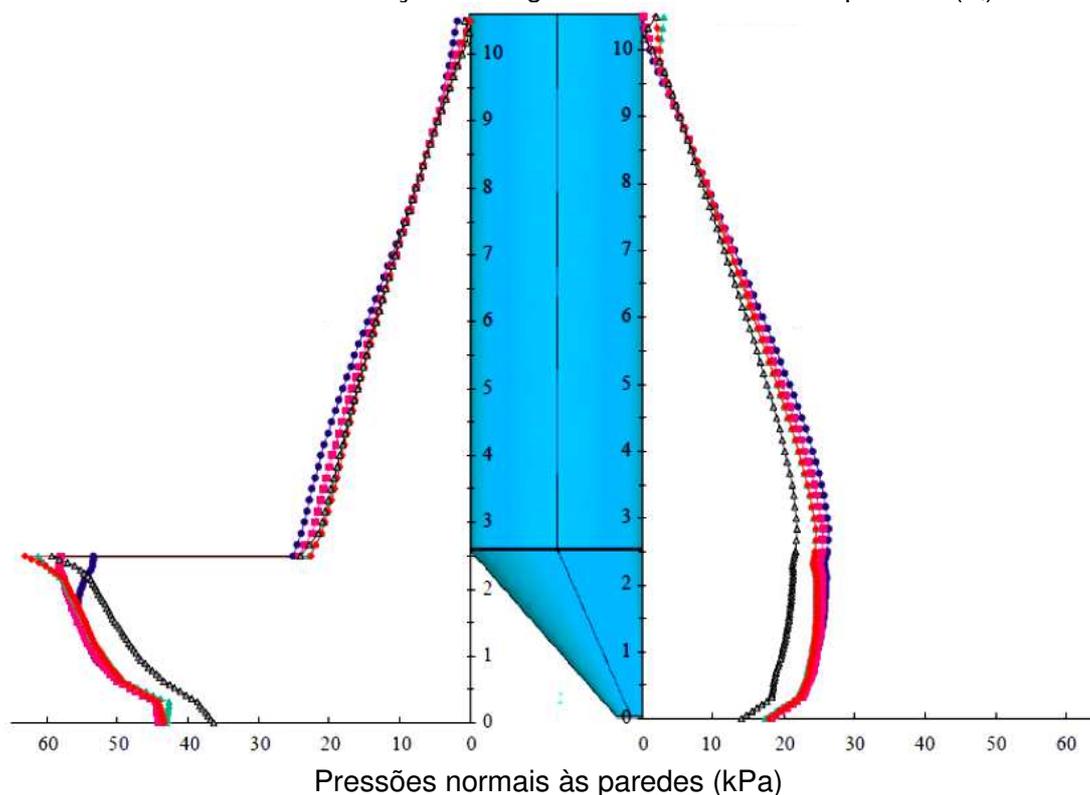


Legenda:

- $\phi_i = 22^\circ$; ■ $\phi_i = 25^\circ$; ▲ $\phi_i = 28^\circ$; ◆ $\phi_i = 30^\circ$;
- * Eurocode, L₁, L₂; ▲ modelo elástico.

Fonte: Guaita, Couto e Ayuga (2003).

Figura 27 – Pressões normais às paredes de um silo: tremonha com 100% de excentricidade e variação do ângulo de atrito interno do produto (ϕ_i).



Legenda:

- $\phi_i = 22^\circ$; ■ $\phi_i = 25^\circ$; ▲ $\phi_i = 28^\circ$; ◆ $\phi_i = 30^\circ$;
- * Eurocode, L₁, L₂; ▲ modelo elástico.

Fonte: Guaita, Couto e Ayuga (2003).

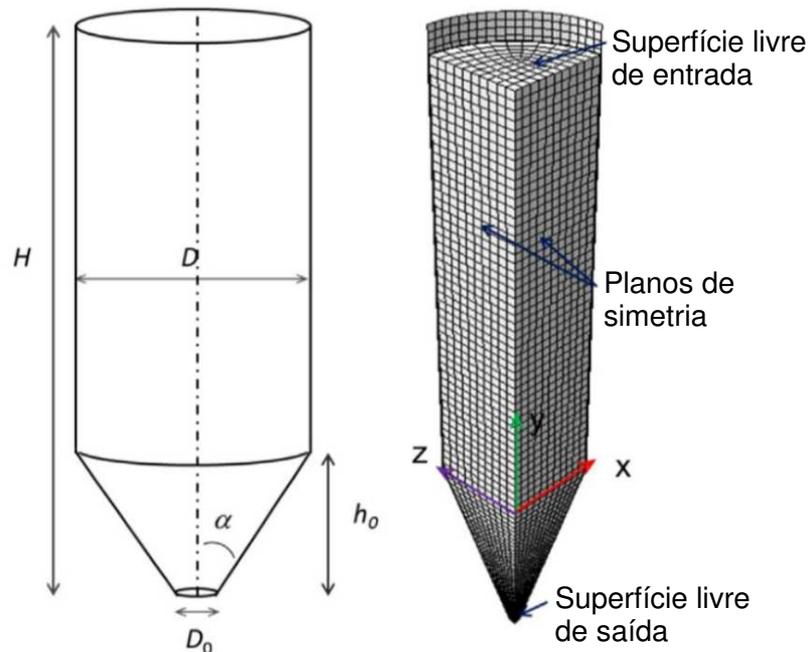
Madrona (2008) relata que os resultados obtidos na maioria dos casos estudados, com as configurações adotadas para a modelagem numérica de silos, foram satisfatórios e comparáveis aos cálculos baseados nas normas EN 1991-4 (2006) e DIN 1055-6 (2005).

Em outro trabalho, Madrona (2009) afirma que a validade da teoria de Janssen é comprovada pelos estudos realizados via método dos elementos finitos, sendo que as pressões estáticas no corpo do silo obtidas por tal método concordam muito bem com as obtidas a partir da teoria de Janssen, desde que o efeito da variabilidade das propriedades físicas dos produtos seja excluído. Estabelece, ainda, uma proposta de determinação de pressões devido ao armazenamento de produtos de fluxo livre em silos esbeltos com descarga excêntrica a partir da comparação entre resultados teóricos e numéricos mediante método dos elementos finitos.

Zheng e Yu (2015) avaliaram o modo de fluxo do material granular armazenado e a pressão horizontal nas paredes durante a descarga com uma tremonha cônica, baseados no método de elementos finitos de formulação Euleriana. O material

granular foi representado como um sólido elastoplástico descrito pelo modelo tradicional de Mohr-Coulomb. Como mostrado na Figura 28, para otimização da eficiência computacional, optou-se pela modelagem na simulação de apenas $\frac{1}{4}$ da estrutural, devido à simetria axial do silo.

Figura 28 – Configuração do silo e discretização da malha de elementos finitos.



Legenda:

H = altura total do silo;

h_0 = altura da tremonha;

D = diâmetro do corpo do silo;

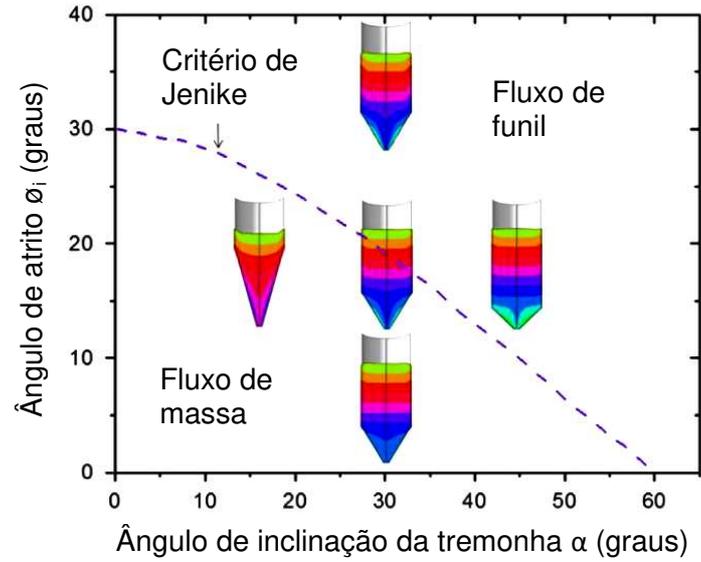
D_0 = diâmetro da abertura da boca de descarga;

α = ângulo de inclinação das paredes da tremonha com a vertical.

Fonte: Zheng e Yu (2015).

De acordo com os autores, o modelo Mohr-Coulomb, como uma tradicional forma de descrição constitutiva do material granulado, descreve os comportamentos de fluxo e tensão do material granular em uma tremonha. Demonstrado na Figura 29, tanto o fluxo de massa como os regimes de fluxo de funil foram passíveis por simulação numérica e considerados satisfatoriamente comparáveis à proposta teórica de Jenike (1964). Nesta figura, observam-se os movimentos de diferentes camadas de material durante o processo de descarga, dependentes dos ângulos de inclinação das paredes da tremonha e do ângulo de atrito do produto com a parede.

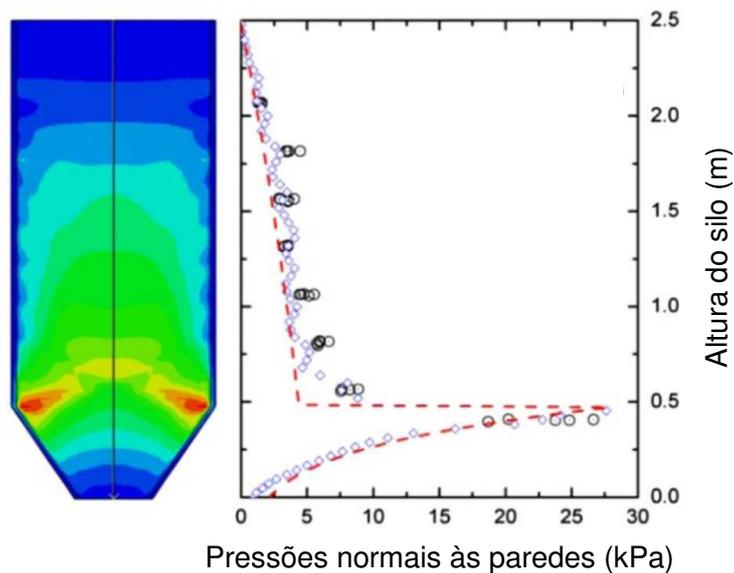
Figura 29 – Modos de fluxo em tremonhas cônicas obtidos via MEF.



Fonte: Zheng e Yu (2015).

Na Figura 30, tem-se a pressão horizontal na parede do silo calculada pelo método dos elementos finitos representada de forma satisfatória em comparação com uma medição experimental em um silo em escala laboratorial (COUTO, RUIZ E AGUADO, 2013) e por expressões teóricas (NEDDERMAN, 1992).

Figura 30 – Comparação das pressões horizontais no silo.



Legenda:

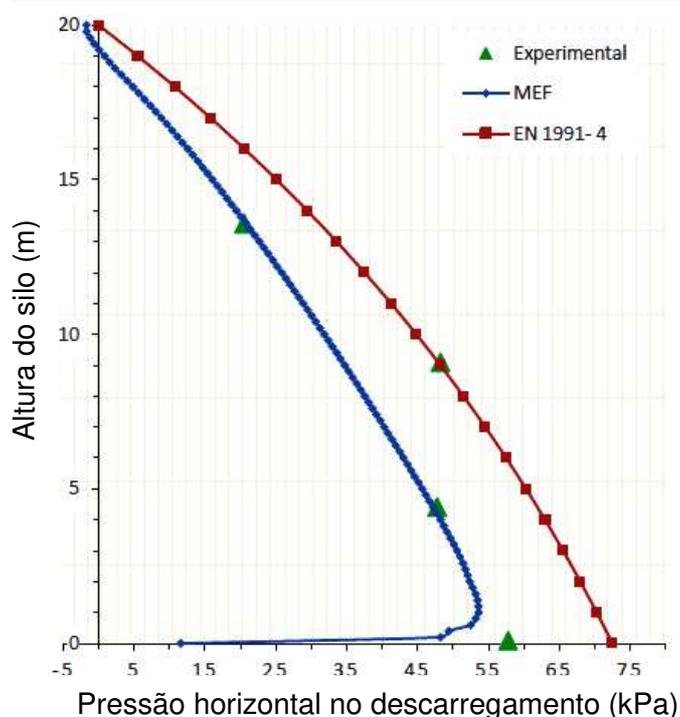
- Experimento prático realizado em um silo por Couto, Ruiz e Aguado (2013)
- Método dos elementos finitos
- Equações propostas por Nedderman (1992)

Fonte: Zheng e Yu (2015).

Portanto, como ressaltam os autores, as três abordagens de estudo de silos (método dos elementos finitos, experimental e teórica) podem desempenhar um papel significativo na prática da engenharia, pois são eficientes e não restringida pela geometria do silo ou método de descarga. No caso da simulação numérica, esta pode servir como um simulador em tempo real para auxiliar no projeto e avaliação de silos ou tremonhas em aplicações industriais.

Anjos (2018) desenvolveu um estudo numérico para a determinação das pressões e deformações em silos, avaliando a influência das variáveis espessura da parede e esbeltez. O autor optou pela análise elástica e linear e posterior verificação da necessidade de uma análise do efeito de segunda ordem, contemplando os efeitos da não-linearidade física e geométrica do material. Na Figura 31 observa-se o resultado de uma das simulações, onde se comparam as pressões horizontais com as obtidas experimentalmente e com as calculadas segundo as diretrizes da EN 1991-4 (2002), para a mesma configuração do silo. Portanto, o modelo numérico representou bem a descarga dos produtos armazenados, já que as pressões se assemelharam às experimentais e foram inferiores, embora a curva seguindo a mesma tendência, às teóricas calculadas pela EN 1991-4 (2002) (valores obtidos por meio de normas tendem a ser mais conservativos).

Figura 31 – Pressões horizontais ao longo da altura do silo.



Fonte: Anjos (2018).

3.8. Teoria de Janssen (1895)

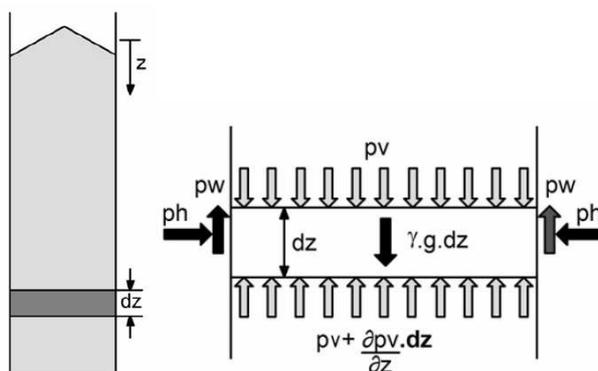
Tendo desenvolvido estudos em silos considerando que parte do peso do produto armazenado era transmitida por atrito às paredes, Janssen (1895) publicou as expressões para o cálculo das pressões nas paredes e no fundo dos silos, as quais serviram como base para as primeiras normas de cálculo das ações nessas estruturas. Sua teoria tem as seguintes considerações:

- As pressões horizontais que ocorrem no material ensilado são constantes num mesmo plano horizontal;
- O valor do ângulo de atrito do produto com a parede (θ_w) e do peso específico do produto (γ) são constantes;
- As paredes do silo são totalmente rígidas (indeformáveis);
- A relação entre as pressões horizontais e verticais (parâmetro K) é constante em toda a altura do silo.

A referida teoria considera o equilíbrio estático de uma camada infinitesimal do produto armazenado no silo, conforme demonstrado na Figura 32, na qual se tem atuando nessa camada as pressões horizontais (p_h) e de atrito do produto com a parede (p_w), além das pressões verticais acima (p_v) e abaixo da referida camada

$$(p_v + \frac{\partial p_v}{\partial z} dz).$$

Figura 32 – Forças atuantes em uma camada infinitesimal no material ensilado.



Sendo:

z é a ordenada com base na camada infinitesimal, em m;

γ é o peso específico do produto ensilado, em kN.m^{-3} ;

g é a aceleração da gravidade, em m/s^2 .

Fonte: Madrona (2008).

O equilíbrio das forças verticais atuantes nessa camada infinitesimal de altura dz e peso específico γ é dado por:

$$p_{hf} \cdot \mu_w \cdot dz \cdot U + (p_{vf} + p d_{vf} - p_{vf}) A - \gamma \cdot A \cdot dz = 0 \quad (26)$$

Considerando a condição de contorno $p_{vf}(0)=0$, substituindo $K \cdot dp_{vf}$ por dp_{hf} e rearranjando os termos na equação anterior, obtém-se a equação de Janssen:

$$p_{hf}(z) = \frac{\gamma}{\mu_w} \cdot \frac{A}{U} \left(1 - e^{-z \cdot K \cdot \mu_w \cdot \frac{U}{A}} \right) \quad (27)$$

Sendo:

p_{hf} a pressão horizontal estática após o enchimento do silo, em $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$;

γ o peso específico do produto ensilado, em $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$;

μ_w o coeficiente de atrito do produto com a parede ($\mu_w = \tan \theta_w$), adimensional;

A é a área da seção transversal do silo, em m^2 ;

U é o perímetro da seção transversal do silo, em m ;

Z é a ordenada com base na camada infinitesimal, em m ;

K é a relação entre as pressões horizontais e verticais do silo (adimensional).

A expressão anterior também permite o cálculo da pressão vertical estática após o enchimento do silo, já que $p_{vf} = \frac{p_{hf}}{K}$, logo:

$$p_{vf}(z) = \frac{\gamma}{K \cdot \mu_w} \cdot \frac{A}{U} \left(1 - e^{-z \cdot K \cdot \mu_w \cdot \frac{U}{A}} \right) \quad (28)$$

Como a pressão de atrito nas paredes se expressa por $p_{wf}(z) = \mu_w \cdot p_{hf}(z)$, pode-se representar a pressão de atrito por metro quadrado de superfície de parede do silo por:

$$p_{wf} = \gamma \cdot \frac{A}{U} \left(1 - e^{-z \cdot K \cdot \mu_w \cdot \frac{U}{A}} \right) \quad (29)$$

Ressalta-se que é a pressão de atrito nas paredes (p_{wf}) a responsável por causar compressão nas paredes do silo e equilibrar parte do peso produto armazenado. Isto faz com que as pressões horizontais não aumentem linearmente

com a profundidade, tal qual aconteceria em um reservatório submetido a uma carga hidrostática.

Muitas normas internacionais de dimensionamento de silos também utiliza a teoria de Janssen para a determinação das pressões que ocorrem devidas à descarga, multiplicando as pressões estáticas por coeficientes de majoração.

3.9. Teoria de Walker (1966)

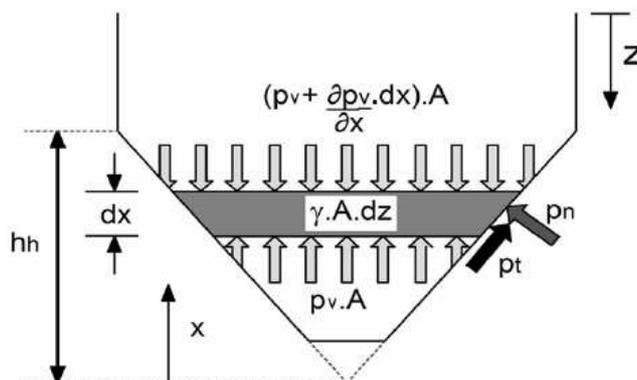
A teoria de Walker (1966) é bastante utilizada para a predição dos esforços nas paredes das tremonhas concêntricas, na condição de descarregamento do silo. No entanto, também se aplica à condição estática dos produtos armazenados na estrutura.

Sua teoria baseia-se nas seguintes hipóteses simplificadoras:

- As direções das tensões principais, maior e menor, estão no plano vertical próximo à seção da parede e estas definem o escoamento do produto, independente da terceira tensão principal, perpendicular a este plano;
- O produto deve escorregar e ser capaz de se deslocar independentemente das variações de seções transversais da tremonha;
- O produto terá características de fluxo de massa;
- Supõe-se que as pressões verticais sobre um mesmo plano horizontal são constantes.

A Figura 33 ilustra a análise de uma massa de produto armazenado em um silo pelo equilíbrio de forças verticais que atuam em uma camada de espessura dx , horizontal, dentro da tremonha, considerando-a localizada a uma distância x a partir do ápice desta.

Figura 33 – Forças atuantes em uma camada infinitesimal de produto na tremonha.



Em que:

p_n é a pressão normal à parede da tremonha, em kN.m^{-2} ;

p_t é a pressão de atrito vertical, por unidade de perímetro da tremonha, em kN.m^{-2} ;

p_v é a pressão vertical, em kN.m^{-2} ;

z é a ordenada abaixo da superfície equivalente do sólido para a condição de enchimento máximo do silo, em m;
 x é a ordenada a partir do vértice da tremonha, em m;
 γ o peso específico do produto ensilado, em $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$;
 h_h é a altura da tremonha, medida do seu vértice à zona de transição, em m;
 A é a área da seção transversal de uma camada de espessura infinitesimal dentro da tremonha, em m^2 .

Fonte: Madrona (2008).

Walker (1966), considerando uniformemente distribuída a pressão vertical atuante na massa de produto armazenada, desenvolveu a expressão para o cômputo das pressões verticais de descarga na tremonha, sendo dada por:

$$P_v = \left(\frac{\gamma \cdot h_h}{n-1} \right) \left[\left(\frac{x}{h_h} \right) - \left(\frac{x}{h_h} \right)^n \right] + P_{vft} \left(\frac{x}{h_h} \right)^n \quad (30)$$

Sendo:

$$n = S \left(F \cdot \mu_{heff} \cdot \cot \beta + F - 1 \right) \quad (31)$$

Sendo que:

p_{vft} é a pressão vertical na transição, em $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$;

x é a ordenada a partir do vértice da tremonha, em m;

γ o peso específico do produto ensilado, em $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$;

h_h é a altura da tremonha, medida do seu vértice à zona de transição, em m;

β é o ângulo de inclinação com a vertical da parede da tremonha, em graus;

μ_{heff} é o coeficiente de atrito do material ensilado com a parede da tremonha (adimensional);

F é a razão entre a pressão normal e a tensão vertical atuantes na parede da tremonha (parâmetro K), adimensional;

S = 1 para tremonhas em cunha ou S = 2 para tremonhas cônicas ou piramidais.

Logo, podem-se calcular as pressões estáticas, normal à parede e de atrito, na tremonha através das seguintes relações:

$$P_{nf} = F_f \cdot P_v \quad (32)$$

$$p_{tf} = \mu_{heff} \cdot p_{nf} \quad (33)$$

Para o cálculo destas pressões estáticas supracitadas, emprega-se o valor de $F = F_f$, sendo dado por:

$$F_f = \frac{tg \beta}{tg \beta + \mu_{heff}} \quad (34)$$

As pressões dinâmicas serão dadas por:

$$p_{ne} = F_e \cdot p_v \quad (35)$$

$$p_{te} = \mu_{heff} \cdot p_{ne} \quad (36)$$

Neste caso, sendo o valor de F_e definido por:

$$F_e = \frac{1 + sen \phi_e \cdot \cos(2\varepsilon_2)}{1 - sen \phi_e \cdot \cos[2[\beta + \varepsilon_2]]} \quad (37)$$

Sendo:

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2} \left[\phi_w + sen^{-1} \left(\frac{sen \phi_w}{sen \phi_e} \right) \right] \quad (38)$$

Walker (1966) propôs que o parâmetro K seja definido pela seguinte expressão:

$$K = \frac{1 + sen^2 \phi_i - 2\sqrt{sen^2 \phi_i - \mu^2 \cos^2 \phi_i}}{4\mu^2 + \cos^2 \phi_i} \quad (39)$$

As normas internacionais de cálculo de silos AS 3774 (1996) e DIN 1055-6 (2005) utilizam-se desta metodologia para determinar as pressões nas tremonhas.

3.10. Medições das pressões em silos

A medição das pressões de forma direta tem sido objeto de pesquisa de vários autores durante as últimas décadas. Muitos ensaios foram conduzidos na expectativa de avaliar os valores das pressões através de métodos indiretos e a utilização de modelos reduzidos, onde os dados observados pudessem ser extrapolados para os silos em escala real. Nos ensaios conduzidos, os métodos indiretos correspondem à instrumentação no material da parede do silo. Os resultados obtidos agregam algumas incertezas provenientes da variabilidade dos fatores envolvidos e limitações na condução dos ensaios, como módulo de elasticidade dos produtos armazenados, materiais da parede e rigidez parcial e global dos elementos estruturais.

A instrumentação dos silos por meio de células de pressão tem possibilitado o estudo do comportamento das pressões devidas aos produtos armazenados nas condições estáticas e dinâmicas. Estes sensores encontraram grande aplicação no estudo do comportamento dos meios granulares e pulverulentos, tais como solos e produtos destinados ao armazenamento agrícola e industrial.

A adequação de teorias para o cálculo das estruturas de armazenamento, a avaliação da segurança estrutural, bem como o estudo de protótipos de novos tipos de silos têm sido os principais objetos de estudo de pesquisadores e projetistas no Brasil e no mundo. Muitos resultados importantes estão sendo obtidos através de ensaios, entretanto, grandes dispersões ainda são verificadas devido às técnicas experimentais utilizadas e à variabilidade das pressões e das propriedades dos produtos armazenados, definindo, assim, as condições de contorno envolvidas no estudo. Para orientação dos critérios de dimensionamento, várias teorias de cálculo das pressões foram aplicadas nas normas estrangeiras, podendo-se citar a *American Concrete Institute* (ACI 313:1991), a *Australian Standard* (AS 3774:1996), a *Deutsche Norm* (DIN 1055:2005), a *European Committee of Standardization* (EN 1991-4:2006) e a *International Organization for Standardization* (ISO 11697:2012).

Alguns ensaios conduzidos no Brasil já evidenciaram a aplicabilidade das teorias e normas para o cálculo das pressões.

GOMES (2000) estabeleceu a relação entre as pressões horizontais e verticais a partir de ensaios em modelos e silos horizontais em escala real, propondo a adoção dos limites inferiores e superiores para o valor de K , sendo $0,25 \leq K \leq 0,55$ no corpo do silo e $0,60 \leq K \leq 0,80$ para a tremonha. Estes intervalos abrangem, também, as sobrepensões devidas ao fluxo do produto durante a descarga. Para as pressões nas paredes dos silos horizontais, o mencionado autor recomendou utilizar a expressão matemática $p_h = \gamma \cdot h \cdot K$, sendo γ definido como o peso específico do produto, h a altura de produto armazenado na estrutura e os valores de K definidos anteriormente a partir

do modelo empírico. Para o cálculo das pressões estáticas e dinâmicas, na tremonha, propôs a aplicação do método de Walker (1966) em função dos valores máximos observados. Para a condição dinâmica, devem-se considerar os valores máximos a uma altura igual a $h/4$ do vértice da tremonha.

Freitas (2001), estudando silos com relação entre a altura da estrutura e o seu diâmetro (ou lado) variando entre 0,75 a 1,5, sendo silo com fundo plano, enfatizou a análise comparativa das principais teorias e normas estrangeiras. Na parte experimental, foram feitos ensaios diretos em um silo protótipo com relação $h/d=0,98$ e um silo piloto para relações $h/d=0,98$, 1,25 e 1,49, ambos de chapa de aço ondulada, para obtenção das pressões horizontais atuantes nas paredes verticais e no fundo plano. Com base nos resultados experimentais propôs modelos empíricos para a determinação das pressões horizontais e verticais no fundo plano do silo para esse tipo de unidade armazenadora. Também determinou experimentalmente o valor do parâmetro K.

Palma (2005), avaliando as pressões de carregamento em silos esbeltos, adotou a equação de Janssen (1895), confirmando o que muitos pesquisadores no mundo verificaram sobre a sua adequação. Para as pressões de descarga, verifica-se que ainda não há um consenso. O único ponto em comum é a influência do tipo de fluxo. Várias normas adotam coeficientes de majoração para a descarga e pressões adicionais que ocorrem de forma assimétrica, o que resulta em valores bastante diferenciados entre elas. A influência das propriedades dos produtos armazenados é considerada e, devido à sua variabilidade, algumas normas estabelecem determinadas combinações, obtendo o máximo de carregamento de projeto, compensando esses efeitos.

A maioria das normas internacionais de cálculo adota o método semi-empírico, o que denota que a ocorrência das pressões, nas tremonhas, ainda é um fenômeno pouco estudado. As normas de cálculo em silos resolvem de forma prática os problemas derivados da aplicação das teorias clássicas de cálculo.

3.11. Normas internacionais para projeto de silos

Para a determinação das pressões exercidas pelos produtos armazenados sobre as paredes laterais e no fundo de silos, algumas normas internacionais merecem destaque:

- Norma ISO 11697 (2012);
- Norma europeia: EN 1991-4 (2006);
- Norma australiana: AS 3774 (1996);
- Norma alemã: DIN 1055-6 (2005).

Existem várias discordâncias no tratamento do assunto entre essas referidas normas. A primeira diz respeito à classificação quanto à geometria, abordando a relação entre a altura da estrutura e seu diâmetro (h/d), classificando os silos como esbeltos, medianamente esbeltos e baixos, conforme já apresentado na Tabela 1 deste trabalho. No tocante às pressões estáticas, iniciais ou de carregamento, todas adotam a formulação proposta por Janssen (1895), para o cálculo das pressões horizontais, verticais e de atrito com a parede. As principais variações ocorrem no cálculo das pressões verticais na base dos silos de fundo plano (inclinação $\leq 20^\circ$). A norma australiana, por exemplo, propõe equações diferenciadas considerando o tipo de seção transversal do silo.

Em relação às pressões dinâmicas, as normas em geral adotam coeficientes de majoração para as pressões estáticas. A norma ISO 11697 (2012), por exemplo, adota dois coeficientes de sobrepressão, C_w e C_h . Estes coeficientes são de 1,35 para silos esbeltos, para os produtos listados em tabela própria. Para os não listados, fornece uma equação para o seu cálculo. A norma AS 3774 (1996) recomenda o uso de um coeficiente de sobrepressão levando em consideração o tipo de fluxo que ocorrerá na descarga, fluxo simétrico e fluxo planar, e faz considerações sobre o fluxo de funil. A norma DIN 1055-6 (2005) sugere o uso de coeficientes de sobrepressão C_w e C_h , relacionando-os com o produto armazenado através de valores listados em tabela própria.

As pressões normais na tremonha são calculadas pela soma dos carregamentos devidos ao enchimento da tremonha e aos carregamentos resultantes da sobrecarga vertical diretamente acima da transição. Para silos com fluxo de massa, uma pressão normal uniforme é aplicada na região de transição entre o corpo do silo e a tremonha. No cálculo das pressões, as normas sugerem a aplicação de equações variadas próprias.

As pressões adicionais devem ser consideradas, pois sua ocorrência é inevitável. Mesmo em silos com carregamento centrado e eixo simétrico elas ocorrem devido às imperfeições na geometria das paredes da tremonha e do silo. Também chamadas de pressões assimétricas, elas contribuem para a ocorrência de momentos de flexão. A norma ISO 11697 (2012) considera as pressões adicionais atuando sobre qualquer parte da parede do silo e faz considerações sobre a descarga excêntrica. A norma EN 1991-4 (2006) propõe uma equação para as pressões localizadas atuando sobre qualquer parte do silo, no carregamento e na descarga. Para silos com diâmetro menor que 5,0m, esta norma adota equações simplificadoras. A norma AS 3774 (1996) prevê o aumento de pressão em várias situações, destacando-se a situação mais desfavorável que é a descarga excêntrica. A norma DIN 1055-6 (2005) adota o

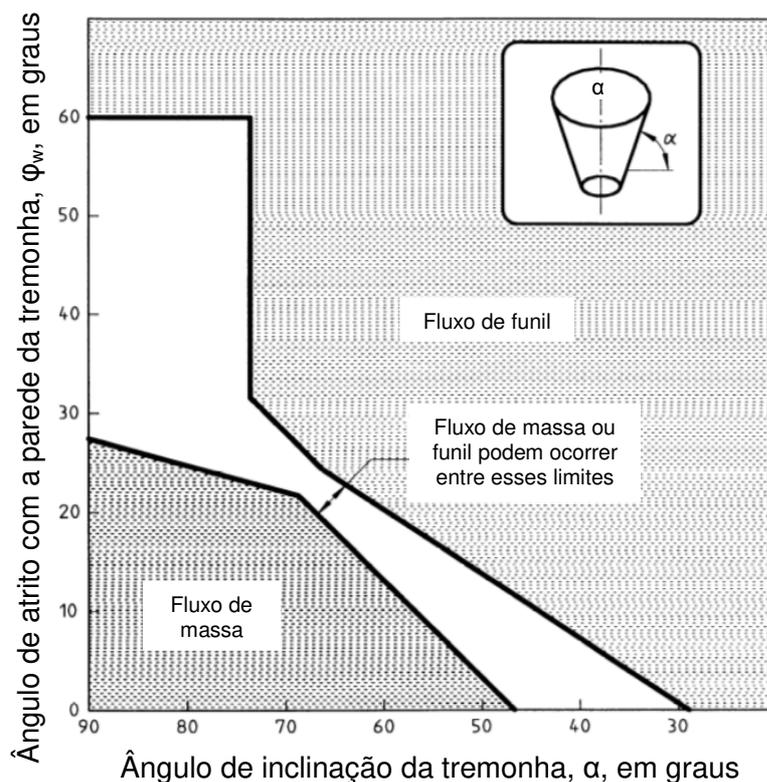
mesmo procedimento do EN 1991-4 (2006), não fazendo menção à seção do silo e adotando coeficientes de ponderação diferenciados.

A seguir são apresentados detalhes das referidas normas com ênfase no cálculo de tremonhas.

3.11.1. *International Organization for Standardization - ISO 11697 (2012)*

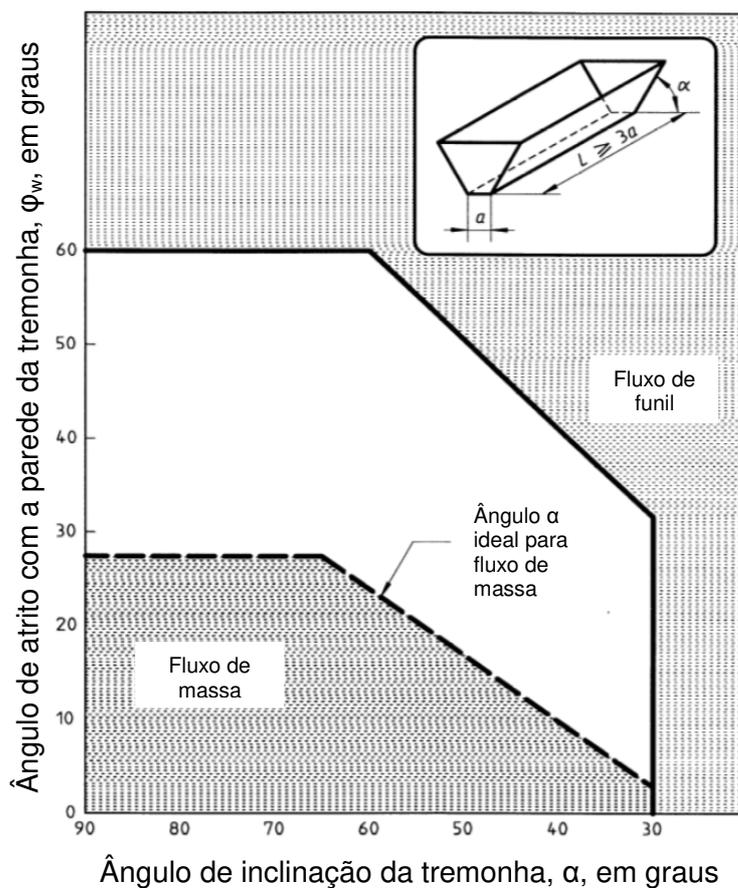
A referida norma cita que o padrão de fluxo é dependente de algumas condições, tais como inclinação da parede da tremonha e coeficiente de atrito com a parede. Sendo assim, é proposto que a inclinação da tremonha (seu projeto geométrico) seja definida através dos ábacos a seguir (Figura 34 e Figura 35), para tremonhas cônicas e em cunha, respectivamente, conforme o tipo de fluxo que se espera obter dentro do silo.

Figura 34 - Inclinação de tremonha cônica em função do padrão de fluxo.



Fonte: ISO 11697 (2012).

Figura 35 – Inclinação de tremonha em cunha em função do padrão de fluxo.



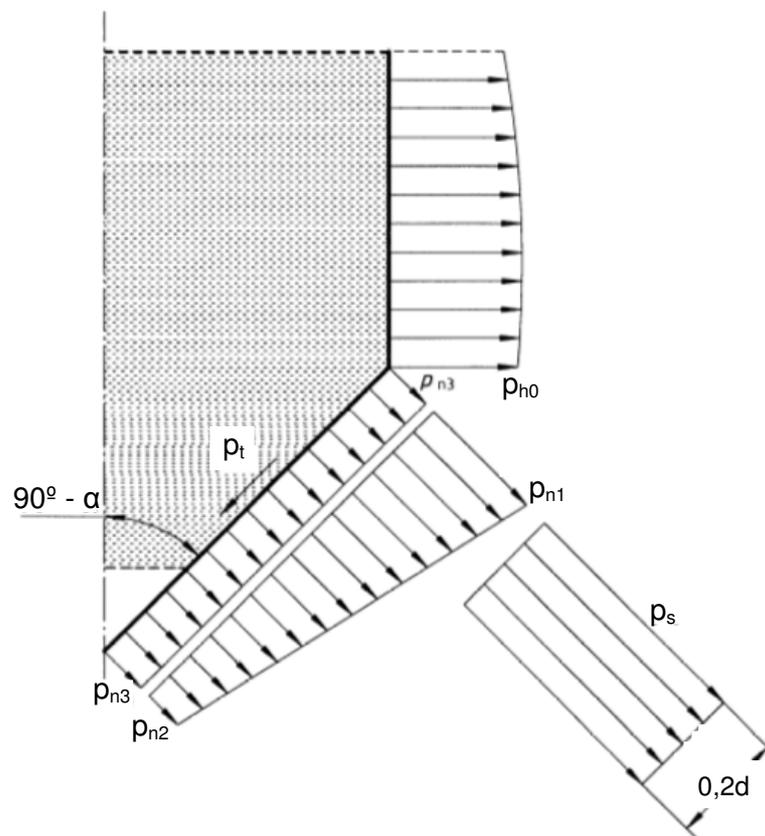
Fonte: ISO 11697 (2012).

A região entre "fluxo de massa" e "fluxo de funil", mostrada em ambos os ábacos da Figura 34, configura a situação de dimensionamento em que o padrão de fluxo pode mudar abruptamente entre a massa e o fluxo de funil. Dessa forma, uma descarga com fluxo instável poderá ocorrer, ocasionando oscilações de pressão e, nesse caso, o silo deverá ser projetado para ambos os tipos de fluxo, massa e funil, na pior condição de esforços e deformações.

O cálculo das pressões na tremonha é realizado de forma análoga às normas EN 1991-4 (2006) e DIN 1055-6 (2005), não considerando descarga em tremonhas excêntricas, ou seja, se limita a casos em que a excentricidade da descarga não exceda 25% do diâmetro do silo.

As cargas consideradas para cálculo da pressão normal à parede da tremonha, p_n , são ilustradas na Figura 36.

Figura 36 - Cargas na tremonha.



Fonte: ISO 11697 (2012).

Para condições de carregamento e descarregamento do silo, considerando a inclinação das paredes com a horizontal $\alpha \geq 20^\circ$, a pressão normal pode ser calculada pela soma das cargas durante o enchimento (p_{n3}) e por aquelas resultantes das sobrecargas verticais acima da transição (p_{n1} e p_{n2}), conforme equações a seguir:

$$p_n = p_{n1} + p_{n2} + p_{n3} \quad (40)$$

Sendo que:

$$p_{n1} = 1,5 p_{h0} \left(\frac{1}{\lambda} \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \right) \quad (41)$$

$$p_{n2} = \frac{1,5}{\lambda} p_{h0} \cos^2 \alpha \quad (42)$$

$$p_{n3} = 3,0 \frac{A}{U} \frac{\gamma \lambda}{\sqrt{\mu}} \operatorname{sen}^2 \alpha \quad (43)$$

Em que:

p_{h0} = pressão horizontal na parede vertical do silo, na região de transição com a tremonha, kN.m^{-2} ;

λ = relação entre a pressão horizontal e vertical, adimensional;

α = ângulo de inclinação da tremonha com a horizontal, em graus;

μ = coeficiente de atrito entre a parede do silo e o material armazenado, adimensional;

A = área da seção transversal do silo, em m^2 ;

U = perímetro da seção transversal do silo, em metros;

γ = peso específico do material, em kN.m^{-3} .

Na região de transição entre a parede vertical do silo e sua tremonha, para fluxos de massa, a pressão normal na descarga supera consideravelmente aquela que ocorre durante o enchimento. Nesse caso, à carga atuante na tremonha é somada uma terceira componente, p_s , dada por:

$$p_s = 2 \cdot p_{h0} \quad (44)$$

Essa componente de sobrecarga que ocorre na descarga do silo é considerada em um comprimento igual a $0,2d$ na tremonha, a partir da região de transição, sendo “ d ” a medida do diâmetro interno do silo, conforme demonstrado na Figura 36.

Para ângulos rasos da tremonha ($\alpha \leq 20^\circ$), ou seja, tremonhas praticamente de fundo reto, a pressão normal à parede será a pressão vertical e deve ser estimada considerando um fator de majoração de 1,35.

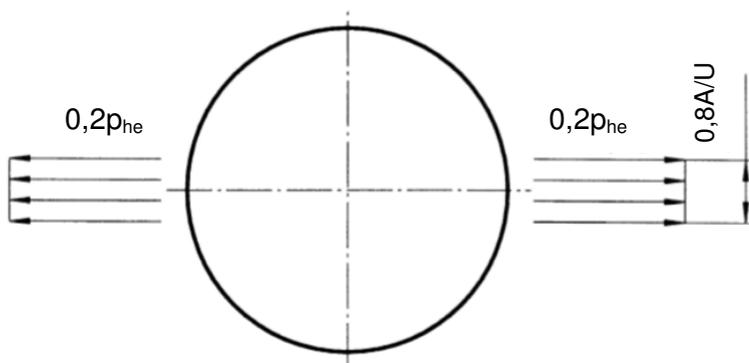
A pressão de atrito (p_t) que atua na tremonha é dada pela Equação 45, sendo o valor de p_n definido pela soma das parcelas p_{n1} , p_{n2} e p_{n3} , conforme ilustrado na Figura 36.

$$p_t = \mu \cdot p_n \quad (45)$$

A referida norma cita que pressões assimétricas na estrutura são inevitáveis, ainda que o enchimento do silo aconteça de forma concêntrica, e estas pressões geram momentos de flexão nas paredes e tremonha. Portanto, deve-se considerar

uma carga adicional igual a $0,2p_{he}$, sendo p_{he} o valor da pressão lateral durante a descarga, atuando em qualquer parte da parede do silo sobre uma área quadrada com comprimento de $s = 0,8 \frac{A}{\mu}$, tal como ilustrado na Figura 37. Estas pressões são dependentes, além da excentricidade da descarga, das características do produto armazenado e de sua heterogeneidade probabilística, assim como das imperfeições geométricas das paredes da tremonha e do silo.

Figura 37 – Carga adicional.



Fonte: ISO 11697 (2012).

A norma ISO 11697 (2012) não faz menção de cálculo para silos com tremonhas com grandes excentricidades, se limitando a casos cuja excentricidade de descarga (e) não exceda 25% do diâmetro do silo, conforme pode ser observado na Figura 38. No entanto, para silos com tremonhas cuja excentricidade seja menor que $0,25d$, no caso de silos circulares, ou menor que $0,25a$, para silos retangulares, a carga adicional (Figura 37) deve ser aumentada por um fator β , dado pela Equação 46:

$$\beta = 1,0 + 4 \frac{e}{d} \quad (46)$$

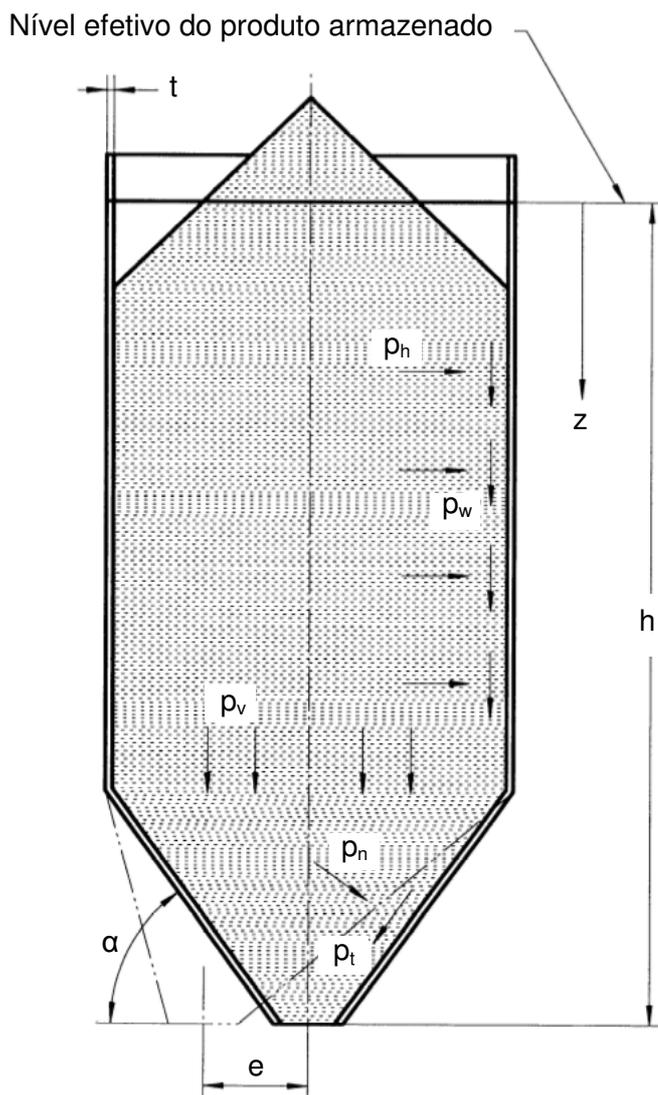
Sendo:

a = menor lado da seção transversal do silo retangular, em metros;

e = excentricidade da boca de descarga, em metros;

d = diâmetro do silo, em metros.

Figura 38 - Representação da excentricidade limite de silos considerada pela norma.



Em que:

p_v é a pressão vertical devido ao material armazenamento, em kN.m^{-2} ;

p_h é a pressão lateral (horizontal) devido ao material armazenamento, em kN.m^{-2} ;

p_w é a pressão de atrito do produto com a parede vertical do silo, em kN.m^{-2} ;

p_n é a pressão normal à parede da tremonha, em kN.m^{-2} ;

p_t é a pressão de atrito do produto com a parede da tremonha, em kN.m^{-2} ;

α é o ângulo de inclinação da parede da tremonha com a horizontal, em graus;

z é a ordenada abaixo da superfície equivalente do sólido para a condição de enchimento máximo do silo, em metros;

h é a altura total do silo, em metros;

e é a excentricidade da boca de descarga, em metros.

Fonte: ISO 11697 (2012).

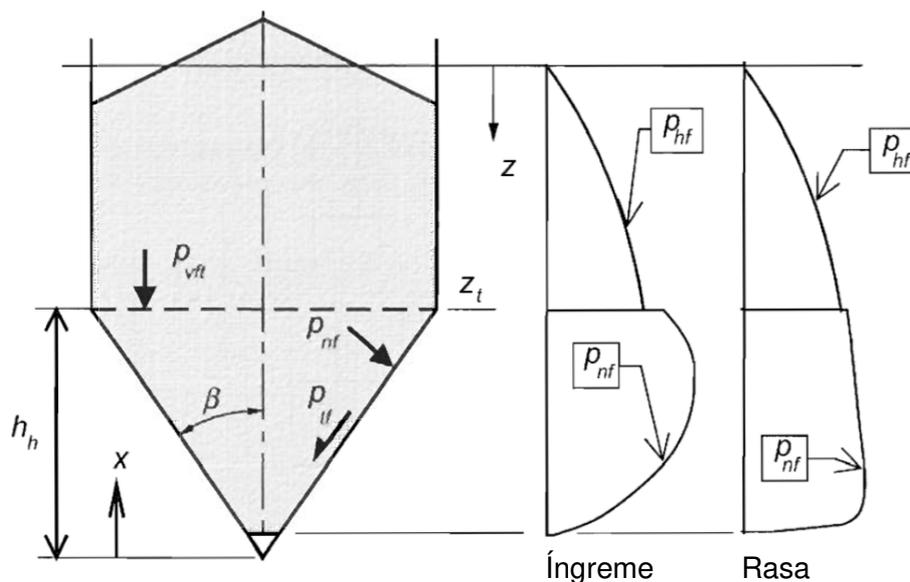
3.11.2. European Committee of Standardization - EN 1991-4 (2006)

Para a avaliação das cargas e esforços nas tremonhas, a norma EN 1991-4 (2006) distingue os casos de silos com tremonhas íngremes e de silos com fundo plano.

Para tremonhas com grandes inclinações de suas paredes, nas condições de enchimento e descarga, o coeficiente de atrito do material ensilado com a parede é o menor valor característico deste parâmetro, sendo denominado de μ_{heff} .

De acordo com esta norma, as pressões atuantes na tremonha podem ser decompostas, para efeito de cálculo, conforme demonstrado na Figura 39.

Figura 39 - Distribuições de pressões de enchimento em tremonhas.



Sendo:

p_{vft} é a pressão vertical média no sólido na região de transição, após o preenchimento do silo, na condição de enchimento e armazenamento, em kN.m^{-2} ;

p_{nf} é a pressão normal à parede da tremonha, na condição de enchimento e armazenamento, em kN.m^{-2} ;

p_{tf} é a pressão de atrito do produto com a parede da tremonha, na condição de enchimento e armazenamento, em kN.m^{-2} ;

β é o ângulo de inclinação da tremonha com a vertical, em metros;

z é a ordenada abaixo da superfície equivalente do sólido para a condição de enchimento máximo do silo, em metros;

x é a ordenada a partir do vértice da tremonha, em metros;

γ o peso específico do produto ensilado, em kN.m^{-3} ;

h_h é a altura da tremonha, medida do seu vértice à zona de transição, em metros.

Fonte: EN 1991-4 (2006).

Durante o enchimento, a pressão vertical média, p_v , no sólido armazenado em qualquer nível da tremonha é calculado pelas expressões mostradas a seguir, com referência na Figura 39.

$$p_v = \left(\frac{\gamma \cdot h_h}{n-1} \right) \left[\left(\frac{x}{h_h} \right) - \left(\frac{x}{h_h} \right)^n \right] + p_{vft} \left(\frac{x}{h_h} \right)^n \quad (47)$$

No qual:

$$n = S(1-b)\mu_{heff} \cot \beta \quad (48)$$

$$F_f = 1 - \frac{b}{1 + \frac{\tan \beta}{\mu_{heff}}} \quad (49)$$

Sendo:

S = coeficiente de forma da tremonha:

S = 2 para tremonhas cônicas e piramidais quadradas (adimensional);

S = 1 para tremonhas em cunha (adimensional);

S = (1 + b/a) tremonhas com formato retangular, onde se define “a” como o comprimento da tremonha retangular e “b” como sua largura, sendo ambos dados em metros e o parâmetro S é adimensional;

b = 0,2 (coeficiente empírico);

γ = valor característico superior do peso específico do material ensilado, em kN.m⁻³;

h_h = altura vertical entre o ápice da tremonha e a região de transição, em metros;

x = coordenada acima do ápice da tremonha, em metros;

μ_{heff} = coeficiente de atrito do material ensilado com a parede da tremonha (adimensional);

F = valor característico da razão entre as pressões na tremonha, sendo diferenciado para os casos de enchimento (F_i) e esvaziamento (F_e) do silo (adimensional);

β = inclinação da parede da tremonha com a vertical, em graus;

p_{vit}=p_v = pressão vertical média no sólido na região de transição, após o preenchimento do silo, em kN.m⁻².

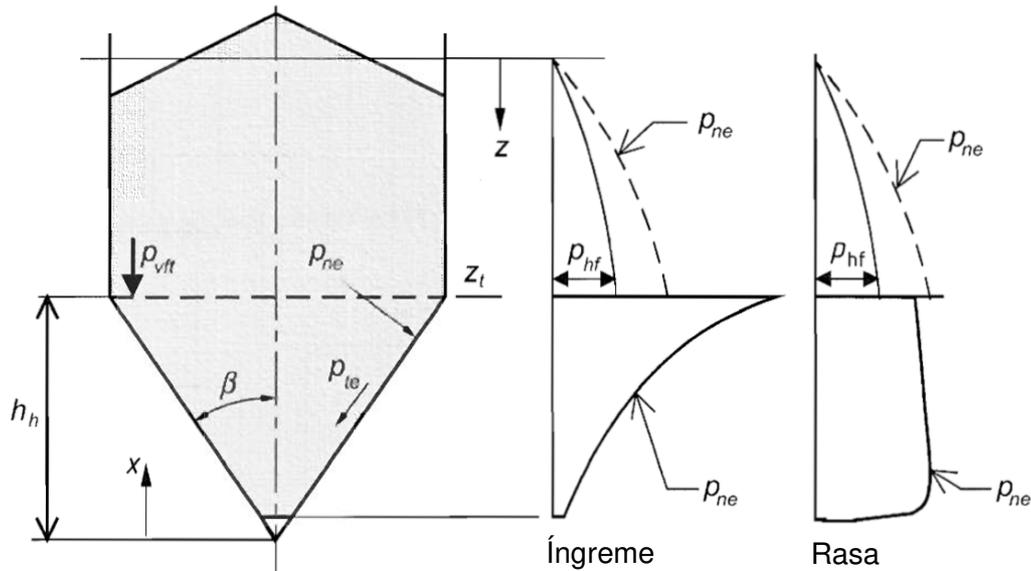
A pressão normal, p_{nf}, e a pressão de atrito com a parede, p_{tf}, em qualquer ponto da tremonha, após o enchimento são dadas pelas seguintes expressões:

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

$$p_{tf} = \mu_{heff} F_f p_v \quad (51)$$

Na condição de esvaziamento do silo, as pressões na estrutura são ilustradas qualitativamente na Figura 40.

Figura 40 - Distribuições de pressões de descarga em tremonhas.



Em que:

p_{vft} é a pressão vertical média no sólido na região de transição, em kN.m^{-2} ;

p_{ne} é a pressão normal à parede da tremonha, na condição de descarga do silo, em kN.m^{-2} ;

p_{te} é a pressão de atrito do produto com a parede da tremonha, na condição de descarga do silo, em kN.m^{-2} ;

β é o ângulo de inclinação da tremonha com a vertical, em graus;

z é a ordenada abaixo da superfície equivalente do sólido para a condição de enchimento máximo do silo, em metros;

x é a ordenada a partir do vértice da tremonha, em metros;

γ o peso específico do produto ensilado, em kN.m^{-3} ;

h_h é a altura da tremonha, medida do seu vértice à zona de transição, em metros.

Fonte: EN 1991-4 (2006).

Nesta situação, pressão vertical média (p_v) no sólido armazenado em qualquer nível em uma tremonha íngreme deve ser determinada também pela Equação 47, porém, utilizando-se o coeficiente $F = F_e$, conforme mostrado a seguir:

$$F_e = \frac{1 + \text{sen}\phi_i \cos \varepsilon}{1 - \text{sen}\phi_i \cos(2\beta + \varepsilon)} \quad (52)$$

No qual:

$$\varepsilon = \phi_{wh} + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}\phi_{wh}}{\text{sen}\phi_i} \right) \quad (53)$$

$$\phi_{wh} = \tan^{-1} \mu_{heff} \quad (54)$$

Sendo:

β é o ângulo de inclinação da tremonha com a vertical, em graus;

μ_{heff} = coeficiente de atrito do material ensilado com a parede da tremonha (adimensional);

ϕ_i = ângulo de atrito interno do material armazenado, em graus.

Também para a situação de esvaziamento do silo, a pressão normal, p_{ne} , e a pressão de atrito com a parede, p_{te} , em qualquer ponto da tremonha, são dadas por:

$$p_{ne} = F_e p_v \quad (55)$$

$$p_{te} = \mu_{\text{heff}} F_e p_v \quad (56)$$

Nos silos que apresentam tremonhas baixas, o atrito do material com a parede não é totalmente mobilizado, portanto, o efetivo coeficiente de atrito do material ensilado com a parede da tremonha é dado por:

$$\mu_{\text{heff}} = \frac{1 - K}{2 \tan \beta} \quad (57)$$

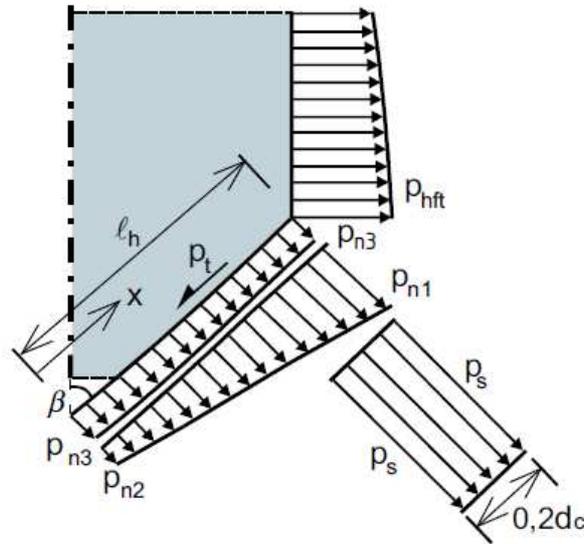
sendo K o valor característico inferior da relação de pressão horizontal com a pressão vertical.

Com relação ao citado parâmetro K, a norma o define para alguns tipos de produtos armazenados, para silos com paredes lisas ou rugosas. Para produtos não citados, sugere-se a determinação do valor de K de forma experimental ou pela Equação 58:

$$K = 1,1(1 - \text{sen} \phi_i) \quad (58)$$

Alternativamente, para a determinação dos valores das pressões de enchimento segundo a norma EN 1991-4 (2006), pode-se calcular o valor da pressão normal à parede da tremonha pelas parcelas decompostas em p_{n1} , p_{n2} , p_{n3} e p_s , tal como mostrado na Figura 41.

Figura 41 – Forma alternativa de decomposição das pressões.



Fonte: EN 1991-4 (2006).

Sendo assim, para casos em que a inclinação das paredes da tremonha com a horizontal seja maior do que 20° , a pressão normal à superfície pode ser calculada segundo as equações que seguem:

$$p_n = p_{n3} + p_{n2} + (p_{n1} - p_{n2}) \frac{x}{l_h} \quad (59)$$

Em que:

$$p_{n3} = 3,0 \frac{A}{U} \frac{\gamma K}{\sqrt{\mu_h}} \cos^2 \beta \quad (60)$$

$$p_{n2} = p_{vft} C_b \sin^2 \beta \quad (61)$$

$$p_{n1} = p_{vft} (C_b \sin^2 \beta + \cos^2 \beta) \quad (62)$$

Sendo:

β = inclinação da parede da tremonha com a vertical, em graus;

l_h = comprimento da parede da tremonha, em metros;

x = altura relativa na tremonha entre 0 e l_h , em metros;

p_{n1} e p_{n2} = definem as pressões da tremonha devidas à pressão vertical do material armazenado na região de transição, em kN.m^{-2} ;

p_{n3} = pressão na tremonha devido ao sólido armazenado em seu interior, em kN.m^{-2} ;
 p_{vft} = pressão vertical atuando na região de transição após o enchimento, em kN.m^{-2} ;
 μ_h = menor valor característico do coeficiente de atrito da parede da tremonha (adimensional);
 k = relação entre pressões horizontais e verticais (adimensional);
 A = área da seção transversal do corpo do silo, em m^2 ;
 U = perímetro interno da seção transversal do corpo do silo, em metros;
 C_b = coeficiente de majoração = 1,3 (estado estático) ou 1,6 (estado dinâmico).

Ainda, o valor da pressão de atrito na parede da tremonha é dado por:

$$p_t = p_n \mu_h \quad (63)$$

sendo que p_n é calculado pela Equação 59.

Para silos de fundos planos ($\beta \geq 70^\circ$), a pressão de descarga (p_{vfb}) pode ser calculada utilizando a seguinte equação:

$$p_{vfb} = C_b p_{vf} \quad (64)$$

Para silos de fluxo de funil, a norma cita que as cargas de descarga nas tremonhas podem ser calculadas usando a orientação para o enchimento de cargas, como mostrado na Figura 41. Já para o caso de silos com fluxo de massa, uma pressão normal adicional é considerada no cálculo, denominada p_s (apresentada na mesma figura). Esta carga é aplicada ao longo de um comprimento de $0,2d_c$ abaixo da região de transição da tremonha e ao redor de todo o perímetro, sendo definida pela expressão a seguir:

$$p_s = 2Kp_{vft} \quad (65)$$

sendo p_{vft} é a pressão vertical atuando na região de transição após o enchimento.

Para a determinação da tensão vertical média no sólido armazenado em qualquer nível em uma tremonha íngreme (p_v), a norma apresenta uma forma alternativa para o cálculo do parâmetro F_e (valor característico da razão entre as pressões na tremonha na situação de descarga), conforme explicitado a seguir:

$$F_e = \left(\frac{1}{1 + \mu \cot \beta} \right) \left\{ 1 + 2 \left[1 + \left(\frac{\text{sen} \phi_i}{1 + \text{sen} \phi_i} \right) \left(\frac{\cos \varepsilon \text{sen}(\varepsilon - \beta)}{\text{sen} \beta} \right) \right] \right\} \quad (66)$$

Em que:

$$\varepsilon = \beta + \frac{1}{2} \left[\phi_{wh} + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen} \phi_{wh}}{\text{sen} \phi_i} \right) \right] \quad (67)$$

$$\phi_{wh} = \tan^{-1} \mu_h \quad (68)$$

Onde:

μ_h = valor característico inferior do coeficiente de atrito da parede na tremonha (adimensional);

ϕ_i = ângulo de atrito interno do sólido armazenado, em graus.

3.11.3. Australian Standard - AS 3774 (1996)

Em se tratando de normas para recomendações de cálculo das pressões em paredes de tremonha, destaca-se a norma AS 3774 (1996), intitulada “Loads on Bulk Solids Containers”, por abordar o assunto de uma maneira bastante completa.

Assim como diversas outras normas internacionais de cálculo de silos, a australiana também adota faixas de variação das propriedades dos produtos ensilados para prever as piores condições de pressões que irão ocorrer na estrutura. Portanto, denominando essas propriedades em limites superior e inferior, definem-se os valores apropriados para os cálculos, conforme listado na Tabela 3.

Tabela 3 – Limites superior e inferior das propriedades físicas dos produtos.

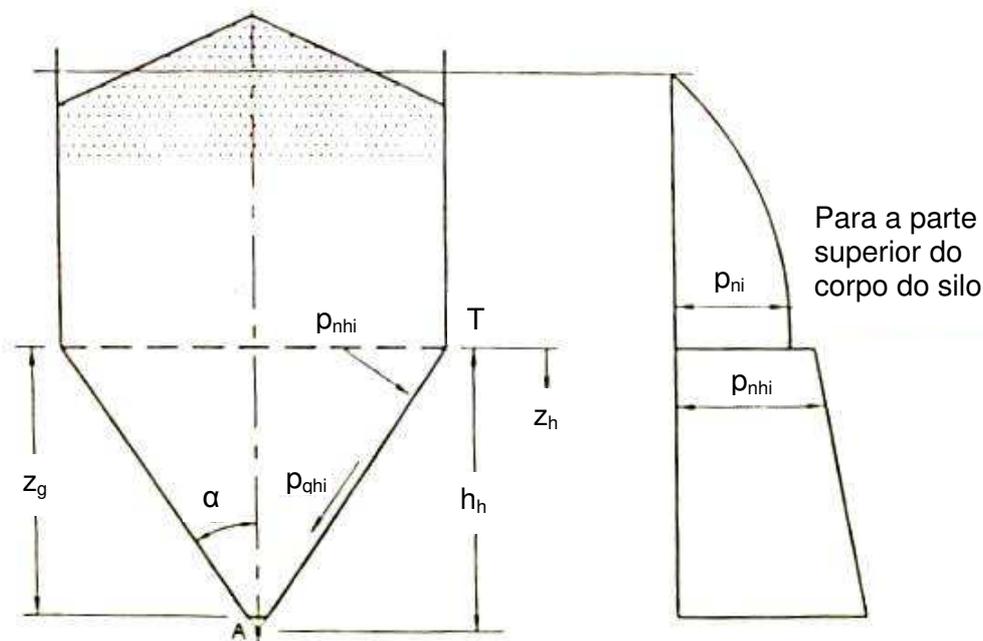
Objetivo	Coeficiente de atrito na parede (μ)	Parâmetros K e K'	Ângulo de atrito interno (ϕ_i)
Máxima pressão horizontal na parede vertical	Inferior	Superior	Inferior
Máxima pressão de atrito na parede vertical	Superior	Superior	Inferior
Máxima pressão vertical	Inferior	Inferior	Superior
Máxima pressão estática na tremonha	Valor superior para a tremonha	Inferior	Inferior
Máxima pressão dinâmica na tremonha	Valor inferior para a tremonha	Superior	Superior

Fonte: AS 3774 (1996).

Assim como outras normas, a australiana também utiliza ábacos para direcionar o projeto geométrico das tremonhas, baseados no ângulo de inclinação das suas paredes e no coeficiente de atrito do produto armazenado com a parede (Figura 11). Nesse caso, as tremonhas podem ter formato cônico ou em cunha.

As pressões iniciais nas paredes da tremonha, ou seja, aquelas de enchimento e armazenamento do silo, em uma dada profundidade z_h abaixo da região de transição entre a parede vertical e a tremonha, são demonstradas na Figura 42.

Figura 42 - Distribuições das pressões estáticas nas paredes de tremonhas de silos.



Em que:

p_{nhi} = pressão normal inicial (estática) na parede da tremonha, em uma profundidade z_h , em kN.m^{-2} ;

p_{qhi} = pressão de atrito na parede da tremonha (estática), em kN.m^{-2} ;

p_{ni} = pressão normal inicial (estática) na parede vertical do silo, em kN.m^{-2} ;

α = ângulo de inclinação da parede da tremonha com a vertical, em graus;

z_g = profundidade efetiva da tremonha, em metros;

z_h = profundidade da tremonha abaixo da região de transição (parede vertical do silo), em metros;

h_h = altura da tremonha desde a região de transição até o ápice (ponto A), em metros;

T = ponto de transição da tremonha com o corpo do silo (parede vertical).

Fonte: AS 3774 (1996).

O procedimento para determinação da pressão normal inicial (estática) na parede da tremonha, p_{nhi} , pode ser estimada conforme as expressões a seguir, baseadas nas decomposições das pressões representadas na Figura 42.

$$p_{nhi} = k_h (\gamma z_h + p_{vit}) \quad (69)$$

Sendo:

$$k_h = \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha + \mu_h} \quad (70)$$

Em que:

k_h = relação das pressões horizontais e verticais (adimensional);

μ_h = coeficiente de atrito da parede da tremonha = $\tan \phi_w$ (adimensional);

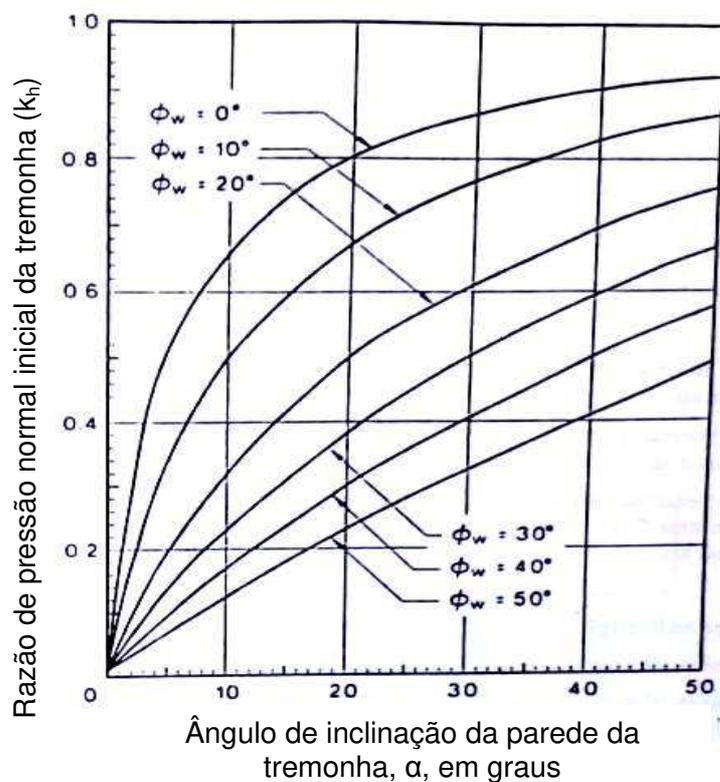
ϕ_w = ângulo de atrito do produto armazenado com a parede da tremonha, em graus;

γ = peso específico do produto armazenado (valor superior), em kN.m^{-3} ;

p_{vit} = pressão vertical média no produto ensilado na região de transição, em kN.m^{-2} .

Para o cálculo do fator k_h , também é proposta a utilização de ábaco, relacionando o ângulo de inclinação da tremonha (α) e o ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w), como pode ser observado na Figura 43.

Figura 43 - Razão de pressão normal inicial (k_h) para pressões iniciais na tremonha.



Fonte: AS 3774 (1996).

A pressão de atrito estática nas paredes da tremonha, p_{qhi} , pode ser determinada para fins de projeto dos materiais de revestimento e fixações da tremonha conforme a seguinte equação:

$$P_{qhi} = \mu_h P_{nhi} \quad (71)$$

Sendo:

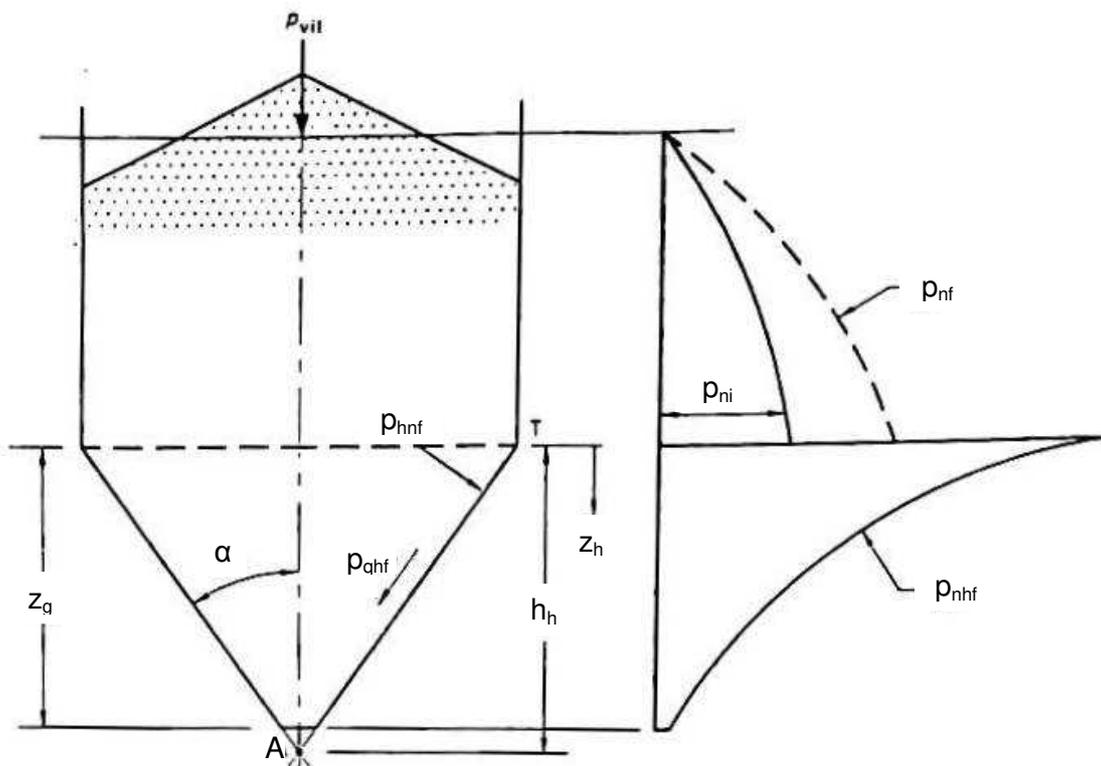
μ_h = coeficiente de atrito da parede da tremonha = $\tan \varnothing_w$ (adimensional);

\varnothing_w = ângulo de atrito do produto armazenado com a parede da tremonha, em graus;

p_{nhi} = pressão normal inicial (estática) na parede da tremonha, em uma profundidade z_h , em kN.m^{-2} .

A situação de descarga simétrica do silo provoca uma reconfiguração de pressões nas paredes das tremonhas em relação àquelas que ocorrem no enchimento ou armazenamento (Figura 44).

Figura 44 - Distribuições das pressões dinâmicas nas paredes de tremonhas.



Em que:

p_{nhf} = pressão normal final (dinâmica) na parede da tremonha, em uma profundidade z_h , em kN.m^{-2} ;

p_{qhf} = pressão de atrito na parede da tremonha (dinâmica), em kN.m^{-2} ;

p_{nfi} = pressão normal final (dinâmica) na parede vertical do silo, em kN.m^{-2} ;

α = ângulo de inclinação da parede da tremonha com a vertical, em graus;
 z_g = profundidade efetiva da tremonha, em metros;
 z_h = profundidade da tremonha abaixo da região de transição (parede vertical do silo), em metros;
 h_h = altura da tremonha desde a região de transição até o ápice (ponto A), em metros;
 T = ponto de transição da tremonha com o corpo do silo (parede vertical).
 Fonte: AS 3774 (1996).

A pressão normal dinâmica na tremonha, p_{nhf} , pode, então, ser definida como:

$$p_{nhf} = k_{hf} p_{vhf} \quad (72)$$

Sendo que:

$$k_{hf} = \frac{1 + \text{sen}\phi_i \cos(2\eta)}{1 - \text{sen}\phi_i \cos[2(\alpha + \eta)]} \quad (73)$$

$$p_{vhf} = \frac{\gamma(h_h - z_h)}{j-1} + \left(p_{vit} - \frac{\gamma h_h}{j-1} \right) \left(\frac{h_h - z_h}{h_b} \right)^j \quad (74)$$

$$\eta = 0,5 \left[\phi_w + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}\phi_w}{\text{sen}\phi_i} \right) \right] \leq 90^\circ \quad (75)$$

$$J = C_h \left[k_{hf} (\mu_h \cot \alpha + 1) - 1 \right] \quad (76)$$

Em que:

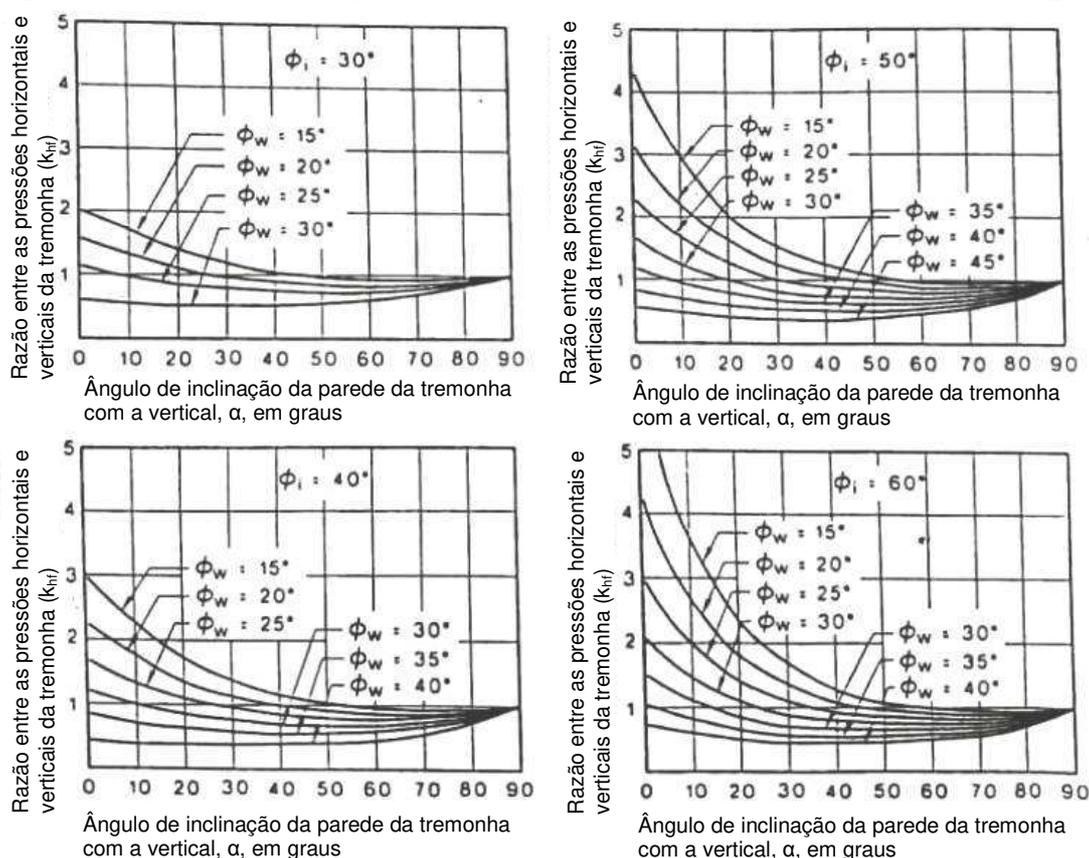
k_{hf} = razão entre as pressões horizontal e vertical da tremonha (adimensional);
 p_{vhf} = pressão vertical na tremonha durante a descarga em uma dada profundidade z_h abaixo da região de transição, em kN.m^{-2} ;
 ϕ_i = menor valor característico do efetivo ângulo de atrito interno, em graus;
 ϕ_w = menor valor característico do ângulo de atrito do produto armazenado com a parede da tremonha, em graus;
 α = ângulo de inclinação da parede da tremonha com a vertical, em graus;
 γ = peso específico do produto armazenado, em kN.m^{-3} ;
 z_h = profundidade da tremonha abaixo da região de transição, em metros;
 h_h = altura da tremonha desde a região de transição até o ápice (ponto A), em metros;
 j = coeficiente da tremonha (adimensional);
 p_{vit} = pressão vertical média no produto ensilado na região de transição, em kN.m^{-2} ;

C_h = coeficiente geométrico adimensional da tremonha, sendo $C_h = 2$ para tremonhas piramidais ou cônicas ou $C_h = 1$ para tremonhas em cunha;

μ_h = menor valor característico do coeficiente de atrito da parede da tremonha (adimensional).

O cálculo do parâmetro k_{hf} , para situações de descarga do silo, também é proposto pela norma AS 3774 (1996) por meio de ábacos. Nestes estão relacionados o ângulo de inclinação das paredes da tremonha com a vertical (α) e o ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w), para diversos valores do efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_i), como pode ser observado na Figura 45.

Figura 45 - Razão entre as pressões horizontal e vertical da tremonha na descarga.



Fonte: AS 3774 (1996).

A pressão de atrito dinâmica nas tremonhas, p_{qhf} , pode ser calculada pela Equação 77.

$$P_{qhf} = \mu_h P_{nhf} \quad (77)$$

Sendo:

μ_h = maior valor característico do coeficiente de atrito da parede da tremonha = $\tan\theta_w$;

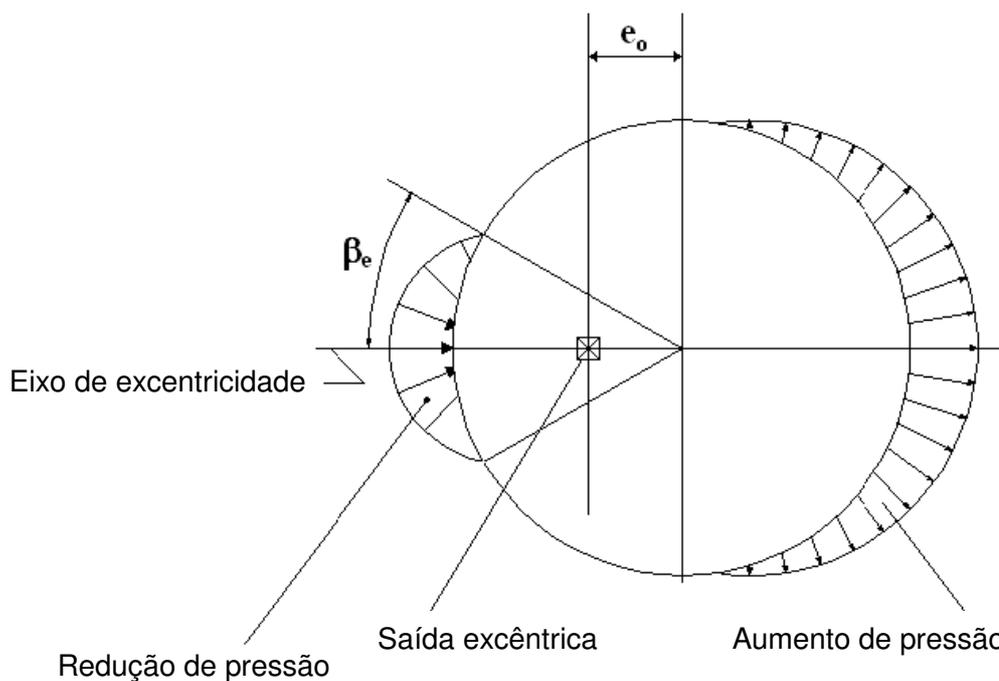
θ_w = ângulo de atrito do produto armazenado com a parede da tremonha;

p_{nhf} = pressão normal durante o fluxo (dinâmica) na parede da tremonha, em kPa.

As pressões em tremonhas excêntricas podem ser calculadas, segundo critérios da AS 3774 (1996), considerando as pressões normais em paredes verticais. As pressões de projeto dependerão da excentricidade de saída (e_o), como mostrado na Figura 46, e da dimensão característica do silo (d_c). Excentricidades menores que $0,1d_c$ não são consideradas como excentricidade efetiva.

De acordo com a Figura 46, nos pontos da parede da estrutura, em um eixo horizontal normal ao eixo de excentricidade e passando pelo eixo vertical de silo, o aumento de pressão deve ser zero.

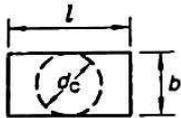
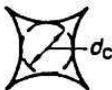
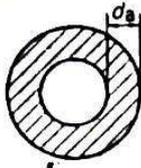
Figura 46 – Variação das pressões circunferenciais na parede do silo.



Fonte: AS 3774 (1996).

O parâmetro denominado dimensão característica (d_c), citado anteriormente, relaciona-se ao formato da seção transversal do corpo do silo e pode ser calculado de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 – Designação do formato da seção transversal do silo.

Tipo	Seção transversal	Característica dimensional (d_c)	Diagrama
G1	Circular	$0,25d_c$	
G2	Quadrada	$0,25d_c$	
G3	Retangular		
	Para cálculos referentes ao menor lado:		
	Para $l/b = 1,0$	$0,25d_c$	
	Para $l/b = 1,5$	$0,27d_c$	
	Para $l/b = 2,0$	$0,30d_c$	
	Para $l/b = 4,0$	$0,33d_c$	
Para $l/b = 5,0$	$0,35d_c$		
	Para cálculos referentes ao maior lado:		
	Para $l/b = 1,5$	$0,30d_c$	
	Para $l/b = 2,0$	$0,33d_c$	
	Para $l/b = 4,0$	$0,40d_c$	
	Para $l/b = 5,0$	$0,50d_c$	
G4	Formato de estrela	$0,30d_c$	
G5	Poligonal	$0,27d_c$	
G6	Formato de anel	$0,35d_c$	
G7	Irregular	$0,30d_c$	

Fonte: Adaptado AS 3774 (1996).

Na superfície da parede mais afastada (diametralmente oposta à saída excêntrica) é considerado um aumento de pressão a uma altura (h_D) sobre a saída e se estendendo além da altura (d_c). A altura h_D pode ser obtida segundo a equação:

$$h_D = (0,5d_c + e_o) \tan \phi_i \quad (78)$$

Sendo:

h_D = altura acima da saída de descarga, em metros;

d_c = diâmetro do silo ou o maior diâmetro inscrito em outro formato de estrutura, em metros;

e_0 = excentricidade da boca de saída da tremonha, em metros;

\varnothing_i = maior valor característico do efetivo ângulo de atrito interno, em graus.

O máximo aumento de pressão ($P_{ef,max}$) durante a descarga com saída excêntrica pode ser determinado segundo a equação:

$$P_{ef,max} = P_{nf} \left(\frac{e_0}{d_c} - 0.1 \right) \geq 0 \quad (79)$$

Em que:

P_{nf} é a pressão normal na parede vertical do silo durante o fluxo, em kN.m^{-2} ;

d_c é o diâmetro do silo ou o maior diâmetro inscrito em outro formato de estrutura, em metros;

e_0 é a excentricidade da boca de saída da tremonha, em metros.

A origem da coordenada circunferencial β deve ser tomada no eixo de excentricidade no lado mais próximo, sendo a variação de pressão definida da seguinte maneira:

- Para β entre 90° e 270° : $P_{ef} = P_{ef,máx} (-\cos \beta)$;
- Para β entre -90° e 90° : $P_{ef} = 0$;

Sendo que:

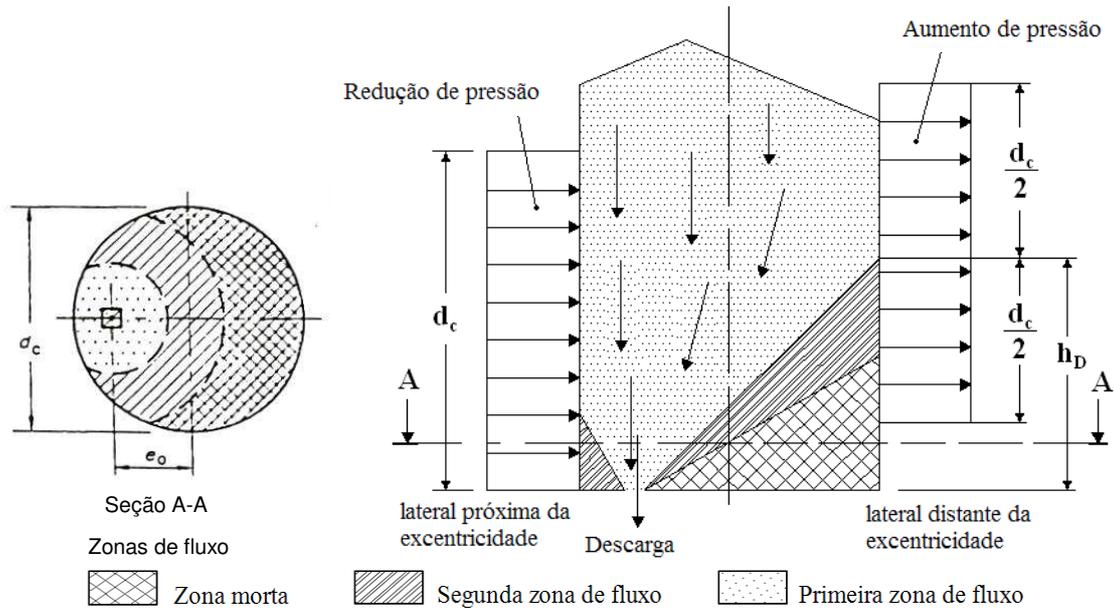
P_{ef} = aumento de pressão normal durante a descarga excêntrica, em kPa;

$P_{ef,máx}$ = aumento de pressão normal máxima durante a descarga excêntrica, em kPa;

β = coordenada circunferencial, em graus.

De acordo com a AS 3774 (1996), para sistemas de armazenamento circulares, o aumento de pressão deve se estender por metade da circunferência da estrutura. No ponto do eixo de excentricidade e no lado mais distante, o aumento de pressão deve estar no seu valor máximo ($P_{ef,máx}$), conforme mostrado na Figura 47. Também se pode observar nesta as zonas de fluxo formadas durante a descarga de um silo com tremonha excêntrica, as regiões de redução e aumento de pressão e dimensões consideradas para o cálculo destas pressões.

Figura 47 - Distribuição das pressões de excentricidade.



Fonte: AS 3774 (1996).

Próximo à superfície da parede lateral (perto da saída) é considerado uma redução de pressão começando no nível da boca de descarga e se estendendo a uma altura d_c (Figura 47). Para tremonhas cônicas, a redução de pressão será constante e se estenderá ao redor da circunferência a uma distância $d_e/2$ no lado próximo ao eixo de excentricidade, sendo:

$$d_e = 1,83d_c \left(1 - 1,43 \frac{e_o}{d_c} \right) \quad (80)$$

Sendo:

d_c é o diâmetro do silo ou o maior diâmetro inscrito em outro formato de estrutura, em metros;

e_o é a excentricidade da boca de saída da tremonha, em metros.

A redução de pressão ($P_{ef,red}$) pode ser determinada segundo a equação:

$$P_{ef,red} = 1,5P_{nf} \left(\frac{e_o}{d_c} - 0,1 \right) \quad (81)$$

Em que:

d_c é o diâmetro do silo ou o maior diâmetro inscrito em outro formato de estrutura, em metros;

e_0 é a excentricidade da boca de saída da tremonha, em metros;

P_{nf} é a pressão normal na parede vertical do silo durante o fluxo, em kN.m^{-2} .

Para tremonhas cônicas, a origem da coordenada circunferencial (β) é tomada no eixo de excentricidade próximo ao lado da menor parede da tremonha. A região de redução de pressão pode, então, ser redefinida em termos de sua extensão angular. Para tal, determina-se um novo ângulo circunferencial (β_e) a partir do eixo central em direção ao eixo de excentricidade próximo ao menor lado da tremonha (Figura 46). O valor de β_e é determinado segundo a equação:

$$\beta_e = 105 - 150 \left(\frac{e_0}{d_c} \right) \quad (82)$$

4. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho científico, técnico e aplicado foi composto por duas atividades principais desenvolvidas paralelamente, sendo elas o experimento com o silo piloto para mensuração das pressões atuantes em diferentes geometrias de tremonhas, executado no Centro de Processamento e Pesquisa dos Produtos Armazenados, e a determinação das propriedades físicas do milho utilizado na pesquisa, por meio do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Para o experimento no silo piloto foi utilizado milho em grãos. Estes ensaios foram conduzidos de tal forma que a classificação do silo se mantivesse como esbelta, ou seja, a relação altura/diâmetro do sistema de armazenamento foi de 7,96, o que corresponde ao enchimento do silo a uma altura de 5,5m (diâmetro de 0,691m). A abertura da boca de descarga todas as tremonhas é de 0,2m de diâmetro.

Foram realizadas quatro repetições para cada tipo de tremonha ensaiada, em combinação com dois tipos de geometria de parede do corpo do silo, sendo lisa ou ondulada, sendo, ao final, um total de 64 ensaios, conforme descrito na Tabela 5.

Tabela 5 - Resumo dos ensaios realizados no silo piloto.

Tipo de tremonha	Tipo de análise	Produto	Número de ensaios
Fundo plano	Estática	Milho (em grãos)	4
	Dinâmica		4
Concêntrica $\alpha = 15^\circ$	Estática		4
	Dinâmica		4
Concêntrica $\alpha = 30^\circ$	Estática		4
	Dinâmica		4
Concêntrica $\alpha = 45^\circ$	Estática		4
	Dinâmica		4
Concêntrica $\alpha = 60^\circ$	Estática		4
	Dinâmica		4
Excêntrica $\alpha = 15^\circ$	Estática		4
	Dinâmica		4
Excêntrica $\alpha = 30^\circ$	Estática		4
	Dinâmica		4
Excêntrica $\alpha = 45^\circ$	Estática		4
	Dinâmica		4
Total de ensaios no silo piloto			64

Fonte: Do autor (2019).

Para cada tipo tremonha a ser analisada no silo piloto, num total de oito tipos, as pressões de enchimento e descarga foram distintamente medidas e comparadas com o que preconiza as seguintes normas internacionais de cálculo de unidades armazenadoras:

- Norma ISO 11697 (2012);
- Norma europeia: EN 1991-4 (2006);
- Norma australiana: AS 3774 (1996).

Ainda, avaliaram-se as pressões atuantes nas tremonhas, sob as mesmas condições dos ensaios acima descritos, segundo as teorias de Janssen (1895) e Walker (1966), de acordo com o detalhado nos Itens 3.8 e 3.9.

Todos os resultados destas análises (experimentais, teóricas e pelas normas internacionais) foram confrontados entre si e, a partir deles, foi desenvolvida uma discussão objetivando um melhor entendimento a respeito do comportamento estrutural de tremonhas e da influência de sua geometria em silos verticais esbeltos. Os dados foram interpretados apenas com base em estatísticas descritivas observadas nos resultados dos experimentos, tais como média e desvio padrão.

4.1. Propriedades físicas dos produtos ensilados analisados

Para a avaliação teórica e normativa das pressões devidas ao produto ensilado, foi realizado o ensaio de cisalhamento direto (por translação) do milho no equipamento conhecido como “Jenike Shear Cell”. Deste ensaio, foram obtidos o ângulo de atrito interno (ϕ_i), o efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e), o ângulo de atrito entre o produto e a parede (ϕ_w) e a coesão dos grãos de duas amostras de milho utilizadas nos ensaios, sendo uma representativa dos grãos no início da pesquisa e outra, no estágio final dos ensaios. Tendo em conta que durante os ensaios os grãos vão se danificando, com intensa formação de pós e fragmentação, propôs-se estudar se essa alteração na estrutura dos grãos causaria algum efeito significativo nas análises desenvolvidas. Também se determinou o peso específico do produto e seu teor de umidade.

4.2. Estação experimental de armazenamento

4.2.1. Descrição do silo piloto (modelo de Pieper e Schütz)

O projeto do silo piloto cilíndrico baseia-se no princípio de modelos de Wenzel (1964) apud Pieper e Schütz (1980), utilizado como padrão pela norma alemã DIN 1055-6 (2000).

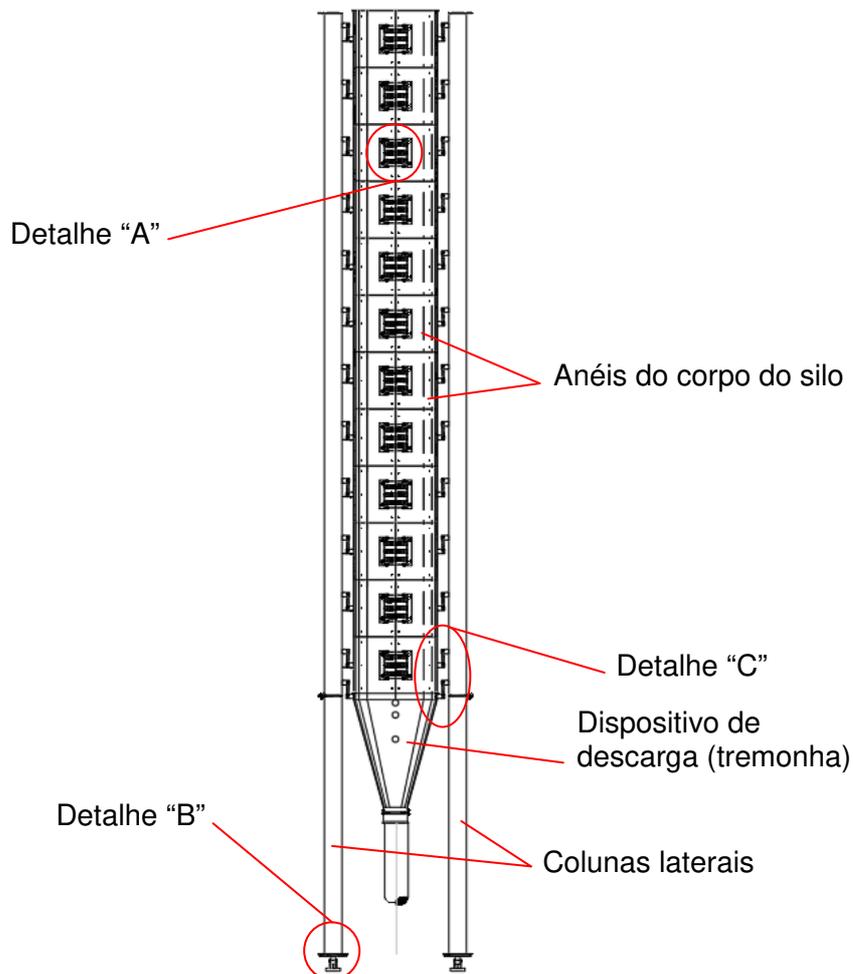
Define-se silo piloto como a estrutura de armazenamento em que a proporção entre suas dimensões e as dimensões dos produtos armazenados são compatíveis

com as estruturas reais, ou seja, os efeitos de escala são insignificantes. Desta forma, tem-se que o comportamento do silo piloto pode ser considerado idêntico (qualitativamente e quantitativamente) ao comportamento em escala real de silos comerciais. Ainda sobre o silo piloto utilizado na pesquisa e sua eficácia na determinação dos esforços na estrutura para comparação com silos comerciais, pode-se afirmar que:

“O silo-piloto construído tem escala geométrica de 1:4 - 1:7, ou seja, superior a 1:10. Se forem consideradas as dimensões usuais de protótipos de células verticais, e respeitado o limite mínimo sugerido de $40 d_{p,máx}$ (quarenta vezes o diâmetro máximo do grão), os resultados obtidos no modelo podem ser extrapolados para escala real. Se for considerado um diâmetro máximo de grãos de 10mm, o diâmetro mínimo do silo seria de aproximadamente 40cm” (Cheung, 2007).

O silo piloto utilizado na pesquisa tem um diâmetro interno de 0,691 m (parede lisa) e uma altura de 600cm, com capacidade de armazenamento de 2,3 m³ para produto granular. Consiste em 12 anéis independentes e suspensos por 3 pilares metálicos, medindo cada anel 49,5 cm de altura (Figura 48). Faz-se necessária uma espessura de parede dos anéis de 10 mm para que a deformação do anel metálico que compõe o corpo vertical do silo permaneça pequena, de tal maneira que não influencie nas medições. Esta condição (paredes indeformáveis do silo) configura o princípio do modelo de Pieper e Schütz (1980).

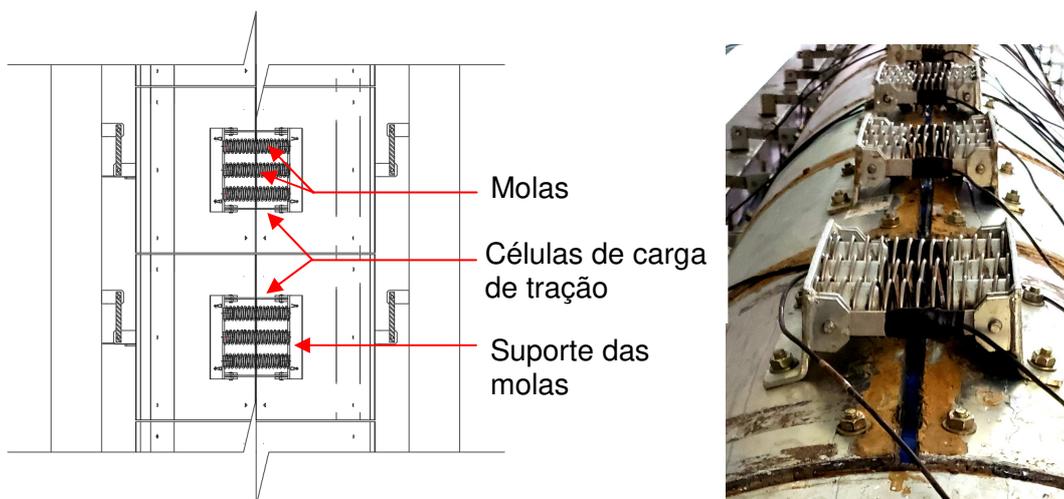
Figura 48 – Vista esquemática geral do silo piloto.



Fonte: Projeto estrutural elaborado pela empresa Kepler Weber Industrial S.A. (2003).

Cada anel do corpo do silo é formado por dois semicilindros soldados verticalmente em um lado e do outro lado unido por duas presilhas horizontais de medição (por meio de células de carga de tração), que são pré-tracionadas por meio de três molas, conforme pode ser observado na Figura 49. Estas células de carga de tração têm capacidade de 8 kN.

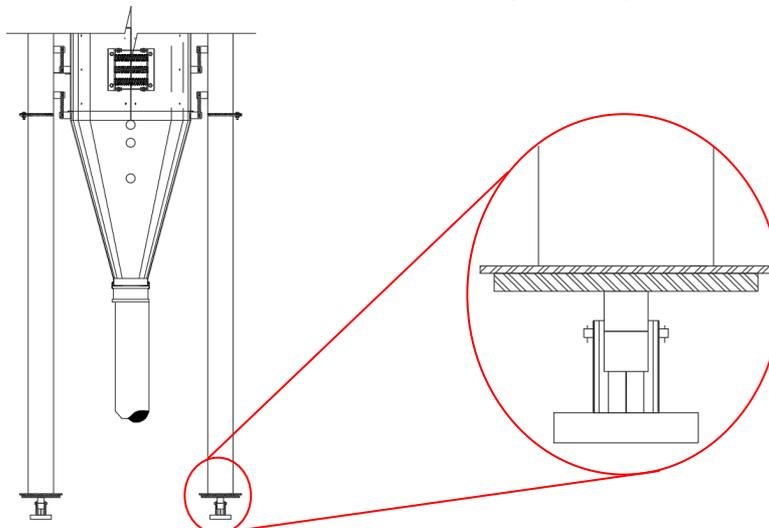
Figura 49 – Detalhe “A”: sistema de medição horizontal.



Fonte: Do autor (2019).

Sob duas colunas do silo estão instaladas células de carga para medição do peso do sistema, ou seja, do silo e do produto armazenado (Figura 50).

Figura 50 - Detalhe “B”: sistema de medição do peso do produto armazenado.



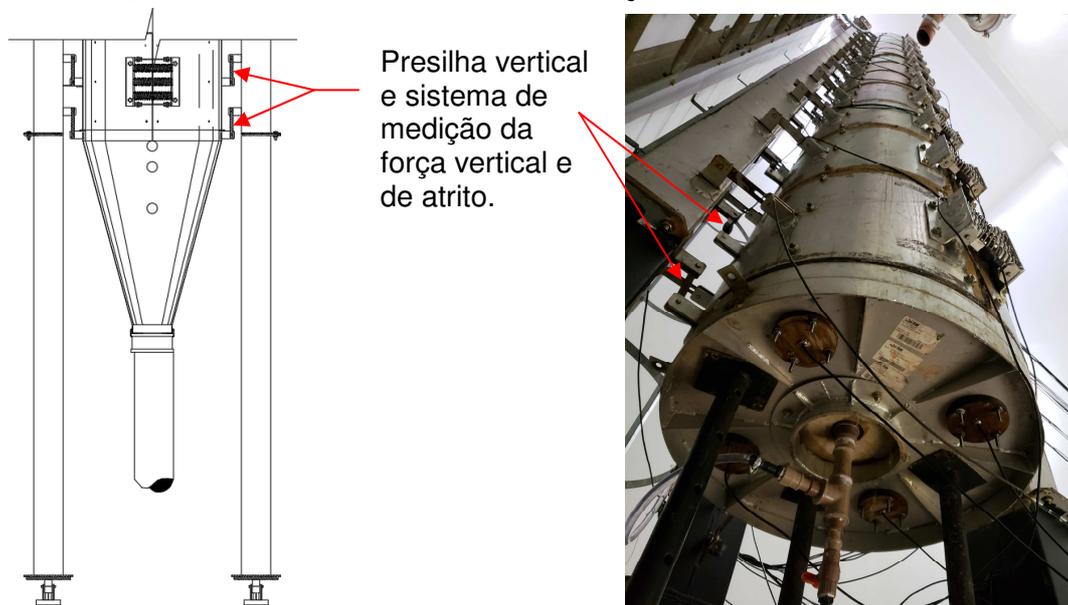
Fonte: Do autor (2019).

Os anéis metálicos que compõem o corpo vertical do silo são suspensos por presilhas verticais de medição, onde estão instaladas células de carga de tração para a determinação da força de atrito nas paredes, como pode ser observado na Figura 51.

Os dispositivos de descarga (tremonhas cônicas e de fundo plano) também são suspensos e parafusados nas colunas de medição, assim como os anéis supracitados. Todas as ligações das presilhas são articuladas nos apoios e anéis, cuja conexão se

dá por meio de pinos de aço inoxidável. Para que os apoios dos anéis sejam estaticamente determinados, são colocadas braçadeiras verticais lateralmente e posteriormente.

Figura 51 – Detalhe “C”: sistema de fixação dos anéis e tremonha.



Fonte: Do autor (2019).

Os anéis do silo podem ser ensaiados diretamente como estão montados (chapa lisa) ou receber um revestimento interno que simula algumas geometrias comuns em silos metálicos, como chapas metálicas onduladas. No estudo que aqui se propôs, o silo piloto foi ensaiado com as duas geometrias descritas. No caso das paredes com revestimento com chapas onduladas, estas são parafusadas internamente nos anéis de aço rugoso, ou seja, na própria parede de chapa lisa do silo (Figura 52).

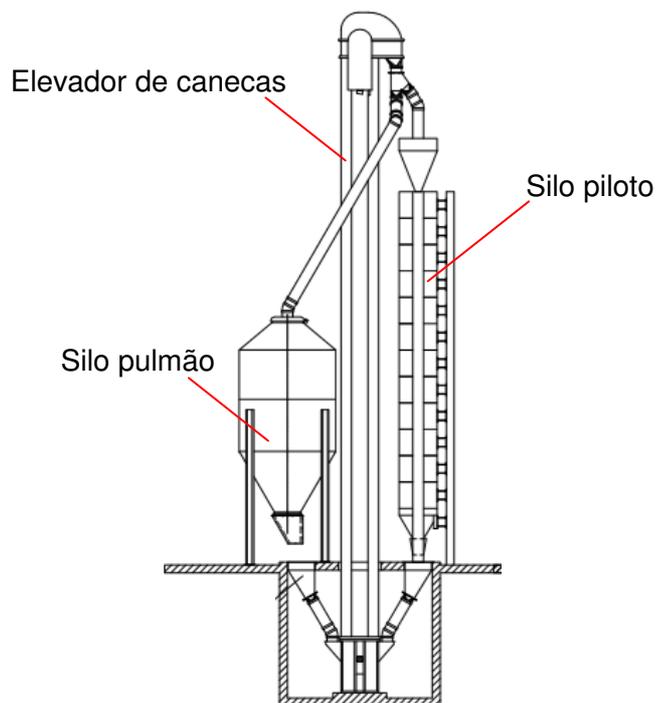
Para possibilitar o carregamento e descarregamento do silo piloto, o sistema de ensaios é composto, além do silo piloto propriamente dito, por um silo auxiliar de armazenamento, denominado de silo pulmão, e um elevador de canecas, o qual possibilita a operação de enchimento de ambos os silos. Este sistema configura a estação experimental de armazenamento do laboratório (Figura 53).

Figura 52 - Vista interna do silo piloto revestido com chapa metálica ondulada.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 53 – Representação esquemática da estação experimental.



Fonte: Projeto estrutural elaborado pela empresa Kepler Weber Industrial S.A. (2003).

4.2.2. Tremonhas

Para o estudo que se propôs foram utilizadas as tremonhas disponíveis e acopláveis no silo piloto, sendo elas:

- Fundo plano (Figura 54);
- Tremonha concêntrica de 15° com a vertical (Figura 55);
- Tremonha excêntrica de 15° com a vertical (Figura 56);

- Tremonha concêntrica de 30° com a vertical (Figura 57-a);
- Tremonha excêntrica de 30° com a vertical (Figura 57-b);
- Tremonha concêntrica de 45° com a vertical (Figura 58-a);
- Tremonha excêntrica de 45° com a vertical (Figura 58-b);
- Tremonha concêntrica de 60° com a vertical (Figura 59).

Com relação às tremonhas excêntricas, a inclinação se refere às paredes perpendiculares ao eixo no qual ocorre o deslocamento da boca de descarga.

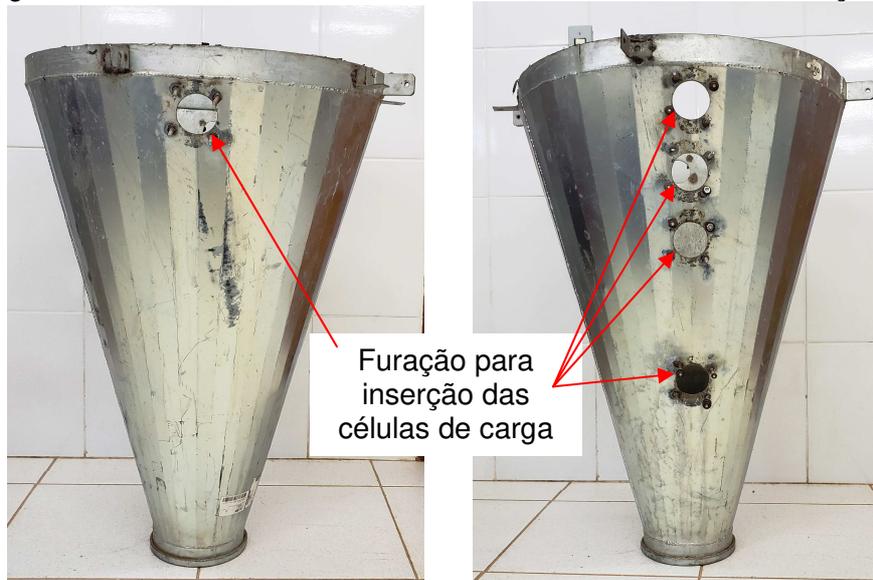
Observa-se que algumas tremonhas estavam sem a furação para inserção das células de pressão quando do início dos estudos, pois ainda não haviam sido anteriormente testadas no silo piloto.

Figura 54 – Fundo plano.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 55 - Tremonha concêntrica de 15° com furações.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 56 - Tremonha excêntrica de 15° com a vertical.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 57 - Tremonha de 30° com a vertical.



(a) Concêntrica



(b) Excêntrica

Fonte: Do autor (2019).

Figura 58 - Tremonha de 45° com a vertical.



(a) Concêntrica



(b) Excêntrica

Fonte: Do autor (2019).

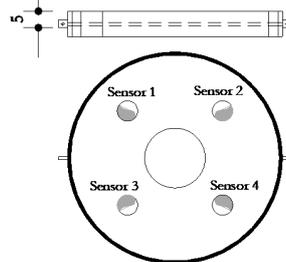
Figura 59 - Tremonha concêntrica de 60° com a vertical.



Fonte: Do autor (2019).

Na representação de fundo plano (Figura 60) tem-se a indicação da localização dos quatro sensores de pressão utilizados para medição das pressões normais atuantes nessa estrutura.

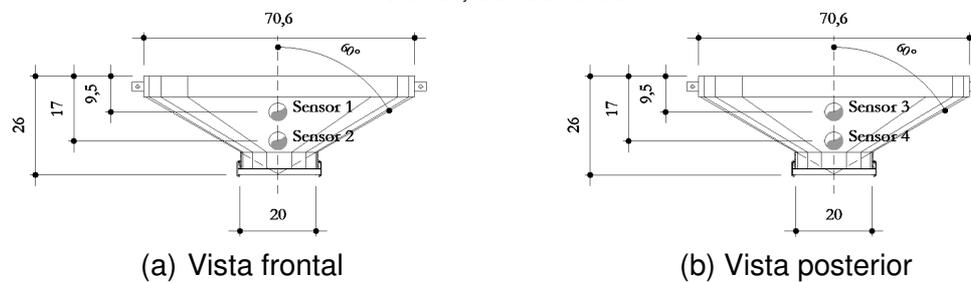
Figura 60 – Vistas frontal e superior da tremonha de fundo plano.



Fonte: Do autor (2019)

A tremonha com inclinação de 60° com a vertical foi instrumentada com quatro células de pressão, sendo estes sensores posicionados aos pares e diametralmente opostos na região de transição e próximos à boca de descarga (Figura 61).

Figura 61 – Vistas frontal e posterior da tremonha com inclinação de 60° com a vertical, concêntrica.



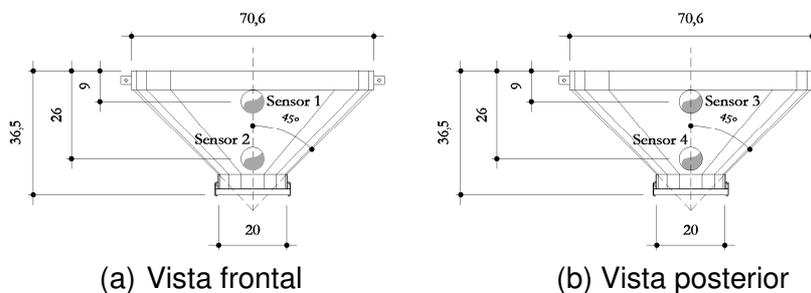
(a) Vista frontal

(b) Vista posterior

Fonte: Do autor (2019).

As análises da tremonha concêntrica com paredes inclinadas de 45° com a vertical foram realizadas com quatro células de pressão, assim como na de 60° . Na Figura 62 estão definidas as posições desses sensores e as dimensões da tremonha.

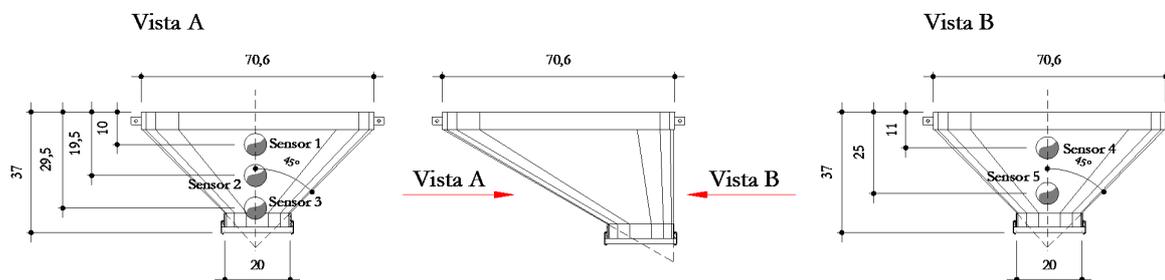
Figura 62 – Vistas frontal e posterior da tremonha de 45° de inclinação com a vertical, concêntrica.



(a) Vista frontal (b) Vista posterior
Fonte: Do autor (2019).

Nos ensaios realizados com a tremonha excêntrica de 45° de inclinação foram fixadas à estrutura cinco células de pressão, sendo três na parede inclinada e duas na parede vertical (oposta à primeira), tal como ilustrado na Figura 63.

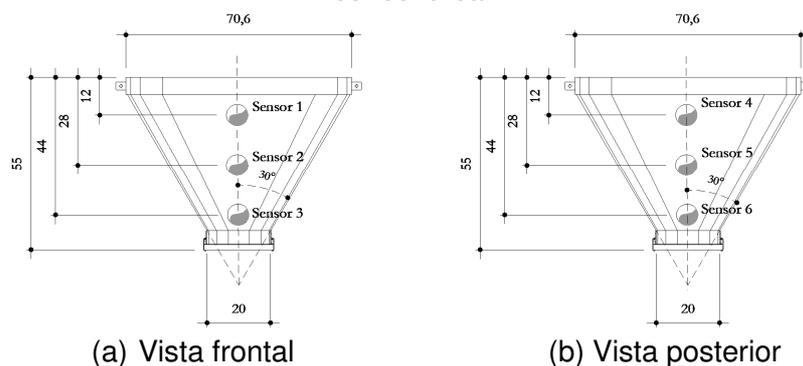
Figura 63 – Vistas laterais esquerda e direita da tremonha de 45° de inclinação com a vertical, excêntrica.



Vista A Vista B
Fonte: Do autor (2019).

A tremonha concêntrica de 30° de inclinação com a vertical foi ensaiada com seis células de pressão, sendo estes sensores posicionados aos pares e diametralmente opostos em três alturas distintas na estrutura: 12cm, 28cm e 44cm, à partir da região de transição (Figura 64).

Figura 64 – Vistas frontal e posterior da tremonha de 30° de inclinação com a vertical, concêntrica.



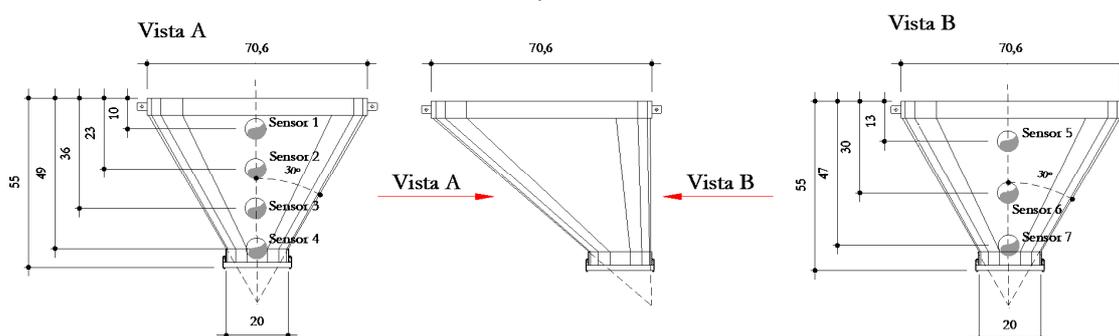
(a) Vista frontal

(b) Vista posterior

Fonte: Do autor (2019).

A tremonha de 30° de inclinação excêntrica foi estudada utilizando-se de sete células de pressão, conforme Figura 65, sendo quatro na parede inclinada e três na parede oposta (vertical).

Figura 65 – Vistas laterais esquerda e direita da tremonha de 30° de inclinação com a vertical, excêntrica.

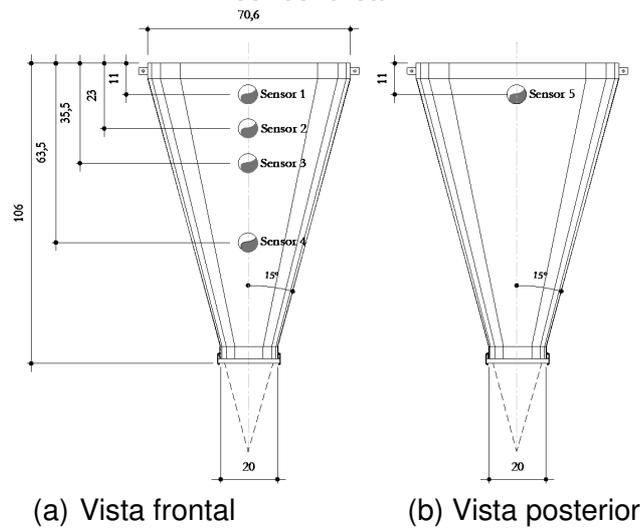


Fonte: Do autor (2019).

A tremonha de 15° de inclinação, concêntrica, foi ensaiada com cinco sensores de pressão, sendo quatro em um dos lados e o quinto, diametralmente oposto ao “Sensor 1”. Na Figura 66 estão ilustradas as dimensões da tremonha e a localização de cada célula de pressão.

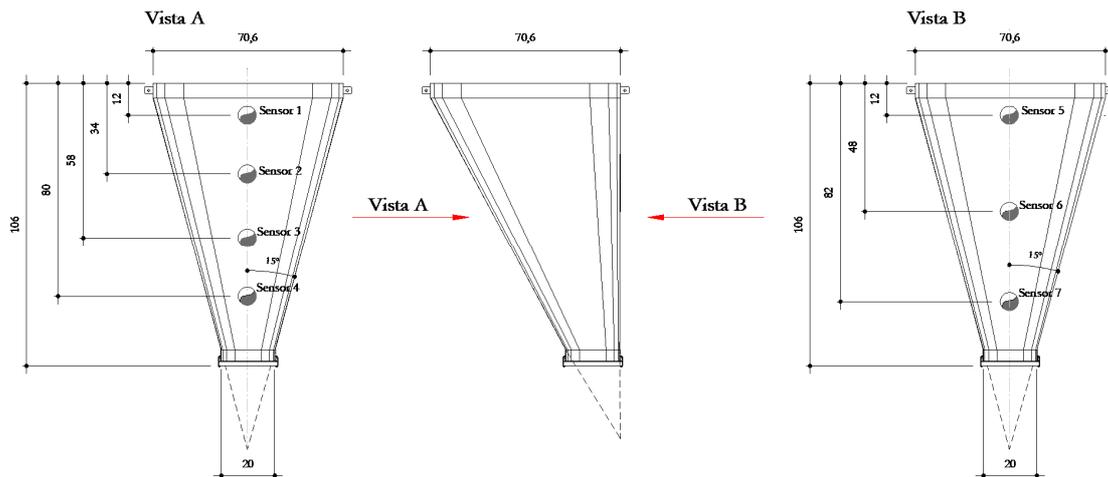
Na análise com a tremonha excêntrica de 15° de inclinação, sete células de pressão foram fixadas à estrutura, sendo quatro na parede inclinada (oposta à excentricidade) e três na parede vertical (próxima à excentricidade), conforme Figura 67.

Figura 66 – Vistas frontal e posterior da tremonha de 15° de inclinação com a vertical, concêntrica.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 67 – Vistas laterais esquerda e direita da tremonha de 15° de inclinação com a vertical, excêntrica.



Fonte: Do autor (2019).

4.2.3. Medição das pressões nas tremonhas analisadas

Para a aferição das pressões de enchimento e descarga nos diferentes tipos de tremonhas acopláveis ao silo piloto, utilizaram-se células de pressão do tipo diafragma, com capacidade nominal de 70 kPa, diâmetro de 53 mm e força total de 160N. Na Figura 68 é ilustrado um destes dispositivos empregados no estudo do silo.

Figura 68 – Célula de pressão do tipo diafragma.



Fonte: Do autor (2019).

Estas células de pressão foram fixadas na própria parede da tremonha com o auxílio de uma base de madeira compensada e parafusos passantes, para o caso das tremonhas com paredes inclinadas.

Nas tremonhas de fundo plano, as células de pressão são apenas apoiadas em furos na própria parede do dispositivo de descarga, conforme pode ser observado na Figura 69, na qual se apresenta a estrutura preparada para a realização do experimento com fundo plano.

Figura 69 – Esquema de fixação das células de pressão na tremonha.



Fonte: Do autor (2019).

A fim de mensurar a força vertical que atua na região de transição, foi instalada uma célula de carga de tração (Figura 70) em cada um dos dois dispositivos de sustentação das tremonhas (presilhas verticais), os quais servem de ligação entre o corpo do silo e o referido dispositivo de descarga, conforme já ilustrado na Figura 51. A célula de carga de tração empregada nesse estudo apresenta capacidade nominal de 80 kN.

Ambos os medidores de esforços são fornecidos pela empresa Micro Sensores Industrial (MSI).

Figura 70 – Célula de carga de tração.



Fonte: Do autor (2019).

4.2.4. Aquisição de dados das tremonhas

Os dados mensurados nas tremonhas do silo piloto são transmitidos a um sistema de aquisição da marca LYNX (AD 2122), constituído de quatro placas de aquisição. Duas dessas placas são do modelo 2160 e as outras duas, do modelo 2161, as quais perfazem um total de 64 canais (Figura 71).

Figura 71 – Sistema de aquisição de dados utilizado.



Fonte: Do autor (2019).

Optou-se pela configuração desse sistema para a frequência de amostragem de 1 Hz e 10 Hz para os ensaios, na condição estática e dinâmica, respectivamente.

4.2.5. Calibração das células de carga de tração do silo (sensores)

As células de carga de tração foram calibradas em uma máquina de ensaios universal, marca Arotec e capacidade máxima de 300 kN de força. Pela aplicação de força de tração nos dois sensores que foram utilizados juntos às presilhas de sustentação das tremonhas no silo piloto, denominadas de célula nº 53101 e célula nº 53151 (Figura 72), obteve-se a relação entre a voltagem atuante no dispositivo e a

tração aplicada, sendo estas informações transferidas ao *software* do sistema de aquisição de dados.

Figura 72 – Calibração das células de carga de tração.



Fonte: Do autor (2019).

Para a calibração das células de pressão do tipo diafragma, fez-se o revestimento interno do próprio silo piloto com uma lona plástica e seu enchimento com água, haja vista que a pressão hidrostática é de fácil determinação e conferência (Figura 73).

Figura 73 – Revestimento do silo piloto com lona plástica e enchimento com água.

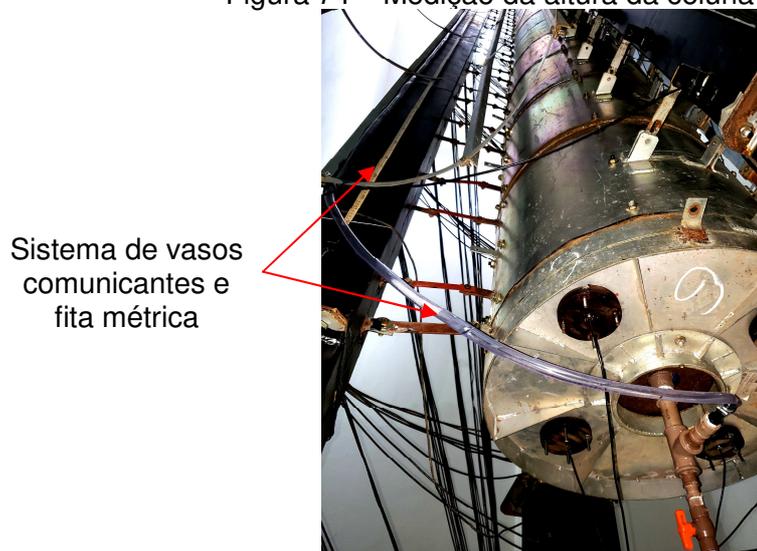


Fonte: Do autor (2019).

Uma mangueira plástica translúcida foi utilizada para a visualização do nível da água e, pela fita métrica instalada em paralelo, aferiram-se as diversas leituras das

alturas correspondentes (Figura 74). Desta forma, pela altura da coluna de água acima das células de pressão tem-se a pressão atuante em cada medidor (kN.m^{-2}) e esta foi fornecida ao *software*, finalizando o processo de calibração.

Figura 74 – Medição da altura da coluna d'água.



Fonte: Do autor (2019).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresentam-se, além dos resultados do processo de ajustes dos sensores, os valores determinados nos ensaios das propriedades físicas e de fluxo do milho, determinados no aparelho de cisalhamento direto por translação, conhecido por *Jenike Shear Cell*, e os de pressões normais às tremonhas, esforços de tração na ligação entre o corpo do silo e a tremonha e esforços normais no pilar.

5.1. Propriedades físicas do milho

Os valores das propriedades físicas do milho utilizado na pesquisa estão listados na Tabela 6. Nesta, apresentam-se os resultados de duas amostras distintas do milho utilizado na pesquisa, denominadas de “Amostra A” e “Amostra B”. A primeira amostra foi coletada assim que os grãos foram depositados no silo pulmão pela primeira vez, para início dos ensaios com o silo piloto, ou seja, sem sofrer os danos causados pelos repetidos ensaios da pesquisa. Por sua vez, a segunda amostra apresentava grande quantidade de grãos quebrados e danificados e considerável quantidade de pós, resultantes das quedas durante o processo de carregamento e descarregamento, do atrito com a parede, dos impactos com o elevador de canecas, etc. A “Amostra B” foi coletada, portanto, quando se concluíram todos os ensaios da presente pesquisa.

Tabela 6 - Propriedades físicas do milho utilizado nos ensaios.

Amostra de milho	Teor de umidade (%)	Peso específico (kN.m ⁻³)		Ângulo de atrito interno (°)		Efetivo ângulo de atrito interno (°)		Coesão	
		$\gamma_{inf.}$	$\gamma_{sup.}$	$\theta_{i,inf.}$	$\theta_{i,sup.}$	$\theta_{e,inf.}$	$\theta_{e,sup.}$	$C_{inf.}$	$C_{sup.}$
“A”	12,7	7,6082	7,9782	23,0	38,0	35,0	48,0	1364,36	1619,33
“B”	12,4	7,7651	8,0627	28,0	35,0	29,0	37,0	539,33	1155,93

Fonte: Do autor (2020).

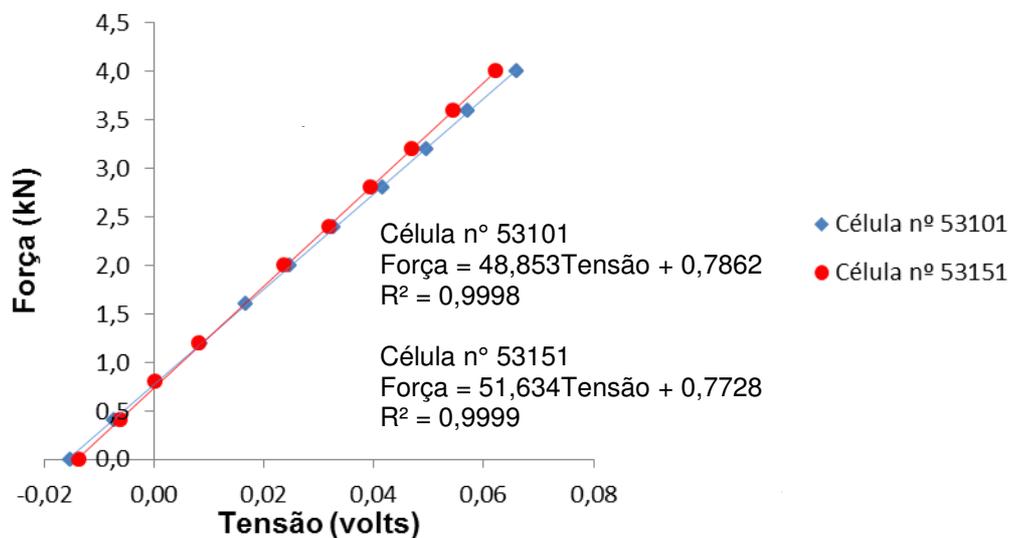
Como a segunda amostra dos grãos (“Amostra B”) apresentou considerável quantidade de grãos danificados e muitos finos (pós), o peso específico do produto aumentou, conforme observado nos resultados dos ensaios.

O ângulo de atrito entre o produto ensilado e a parede também foi determinado com essas duas amostras supracitadas, considerando o silo piloto sendo constituído por aço zincado. Desta forma, obtiveram-se os valores de 10,63° para o valor inferior e 18,18° para o superior, quando analisada a “Amostra A” e de 10,64° para o valor inferior e 16,64° para o superior, com a “Amostra B”.

5.2. Calibração das células de carga de tração que sustentam a tremonha

Os sensores foram calibrados conforme descrito no Item 4.2.5 e têm-se os resultados das curvas de calibração ilustrados na Figura 75. De acordo com informações desta, os valores de R^2 obtidos em função da força aplicada e a respectiva voltagem no sensor são superiores a 0,99, o que denota a precisão adequada desse processo e se valida a utilização como dispositivo para medição de esforços de tração no silo piloto.

Figura 75 – Curvas de calibração das células de carga de tração.



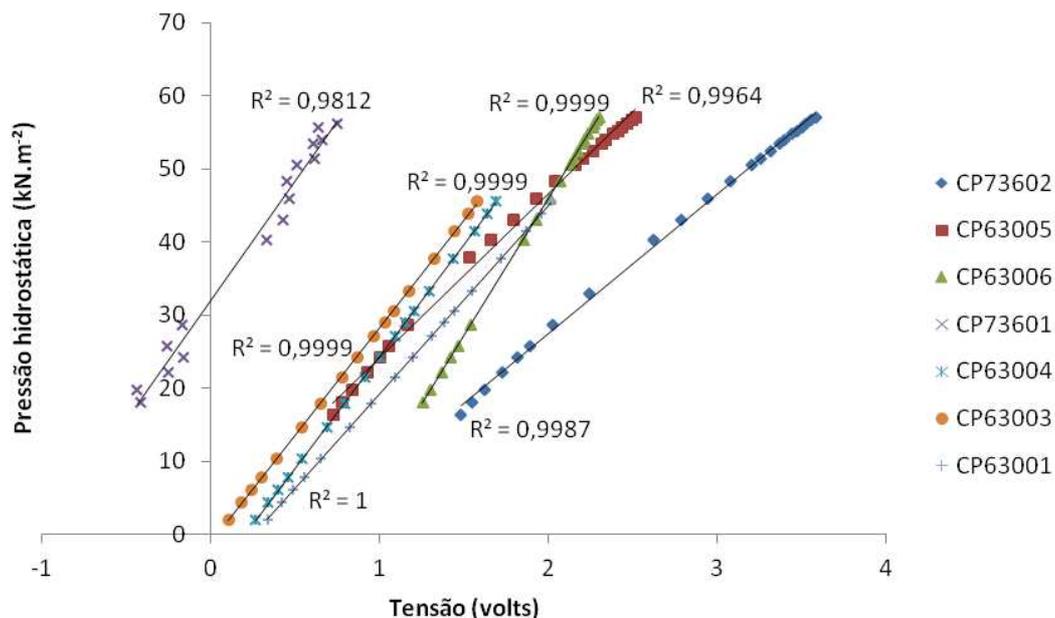
Fonte: Do autor (2019).

5.3. Calibração das células de pressão do tipo diafragma

Os dispositivos de aferição dos esforços normais às paredes das tremonhas foram calibrados com carregamento hidrostático aplicado no próprio silo piloto (por meio do bolsão de lona) e montado com tremonha de fundo plano, conforme descrito no Item 4.2.5). As suas curvas de calibração das células de pressão do tipo diafragma são ilustradas na Figura 76.

Assim como constatado nos ajustes feitos nas células de carga, nestes também se obtiveram resultados satisfatórios na calibração, apresentando valores de coeficiente de correlação das curvas de todos os sensores próximos a um ($R^2 \approx 1$), ou seja, uma relação satisfatória entre as variáveis avaliadas.

Figura 76 – Curvas de calibração das células de pressão do tipo diafragma.



Fonte: Do autor (2019).

5.4. Validação das calibrações (provas de carga)

Para validação de todo o processo de calibração dos sensores instalados no silo piloto, este foi revestido com o bolsão de lona e preenchido com água, sempre utilizando a tremonha de fundo plano, como mostrado nas Figura 73 e Figura 74. Nesse processo foram aferidas as pressões hidrostáticas, as quais são apresentadas na Tabela 7. Nota-se que o erro percentual entre o valor teórico da pressão hidrostática, para a altura de água atingida nos ensaios, e o valor mensurado pelos sensores é adequadamente baixo para o que se propõe, ratificando o uso dos equipamentos de medição.

Tabela 7 - Pressões hidrostáticas obtidas no processo de validação das calibrações dos sensores.

Sensor (célula de pressão)	Altura de água (m)	Pressão hidrostática (kN.m ²)			Erro percentual (%)	
		Enchimento	Esvaziamento	Pressão Teórica*		
CP63004	4,43	42,26	43,10	43,52	-2,90	-0,95
CP63003		43,17	43,10		-0,81	-0,95
CP63001		42,05	43,09		-3,38	-0,97
CP73601		44,41	43,22		2,06	-0,68
CP63006	5,86	57,24	57,38	57,49	-0,43	-0,19
CP63005		58,01	58,55		0,90	1,84
CP73602		55,98	56,12		-2,63	-2,38

*Aceleração da gravidade: $g = 9,81\text{m/s}^2$.

Fonte: Do autor (2019).

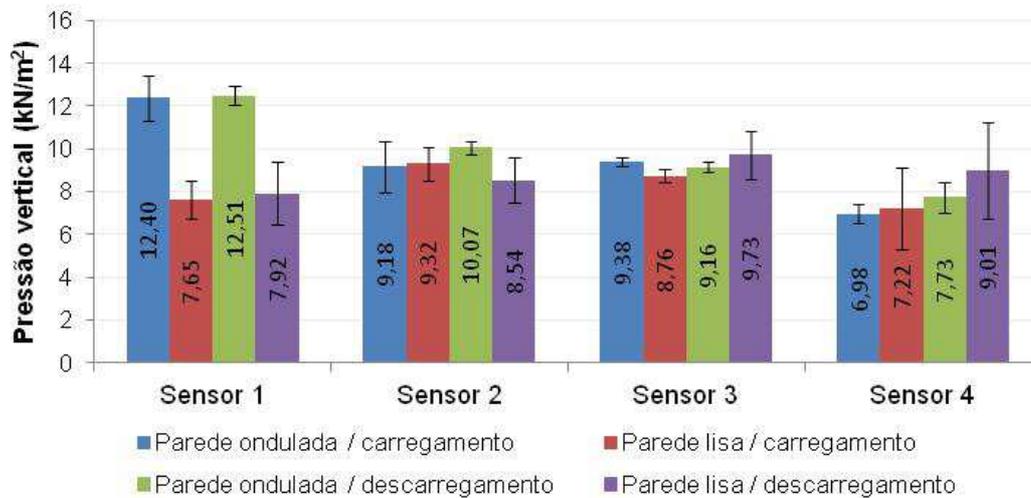
5.5. Resultados das pressões normais nas tremonhas obtidos nos ensaios instantâneos

Nesta seção do trabalho são apresentados e analisados os resultados das pressões obtidos experimentalmente nos ensaios de carregamento e descarregamento do silo piloto, sem considerar qualquer processo de consolidação do material armazenado. Reitera-se que foi realizado um grande número de ensaios (64 ensaios para cada tipo de parede do corpo do silo) com milho em grãos avaliando o enchimento e esvaziamento do silo (mantendo-se a altura de enchimento igual a 5,5m) e ensaiadas oito geometrias de tremonhas distintas (fundo plano e paredes com inclinações de 60°, 45°, 30° e 15°; excêntricas e concêntricas), num total de oito. Para essas mesmas configurações de tremonhas ainda avaliou-se experimentalmente a influência da configuração da parede do corpo do silo, com a parede lisa e a parede ondulada. Esses resultados foram comparados aos valores recomendados pelas normas estrangeiras de análise e dimensionamento de silos (ISO 11697:2012; EN 1991-4:2006 e AS 3774:1996) e às teorias de Janssen (1895) e Walker (1966), utilizando as propriedades físicas do milho apresentadas no Item 5.1.

5.5.1. Fundo plano ($\alpha=90^\circ$)

Como já comentado anteriormente, foram realizados quatro repetições (carregamentos e descargas do silo) para cada geometria de parede do silo avaliada. Os resultados das pressões verticais atuantes na tremonha de fundo plano são mostrados na Figura 77, onde se apresentam as médias dos quatro ensaios, por sensor, com seus respectivos desvios padrões. Vale ressaltar que, no caso particular desta tremonha, a pressão normal coincide com a pressão vertical no fundo do corpo do silo.

Figura 77 – Médias das pressões normais dos quatro carregamentos e descarregamentos, por sensor de pressão.



Fonte: Do autor (2020).

Percebe-se que há diferença estatística (baseada nas médias e desvios padrões) relacionada aos valores medidos entre os quatro sensores, mesmo quando os parâmetros de rugosidade da parede do corpo do silo ou situação estática e dinâmica do carregamento são mantidos. Ao se analisar os resultados de pressão normal estática na tremonha com parede ondulada, por exemplo, os valores extremos obtidos pelas células são $12,40\text{kN.m}^{-2}$ e $6,98\text{kN.m}^{-2}$. Isto pode estar relacionado aos diversos fatores “não controláveis”, como a ocorrência de fluxo de funil (notadamente para este tipo de tremonha), carregamento distribuído, concentrado ou assimétrico, variação no fluxo durante o enchimento ou esvaziamento do silo, alterações de umidade e temperatura do ambiente, mudanças das características físicas dos grãos à medida que se executam os ensaios (como quebra dos grãos e produção de pó), etc.

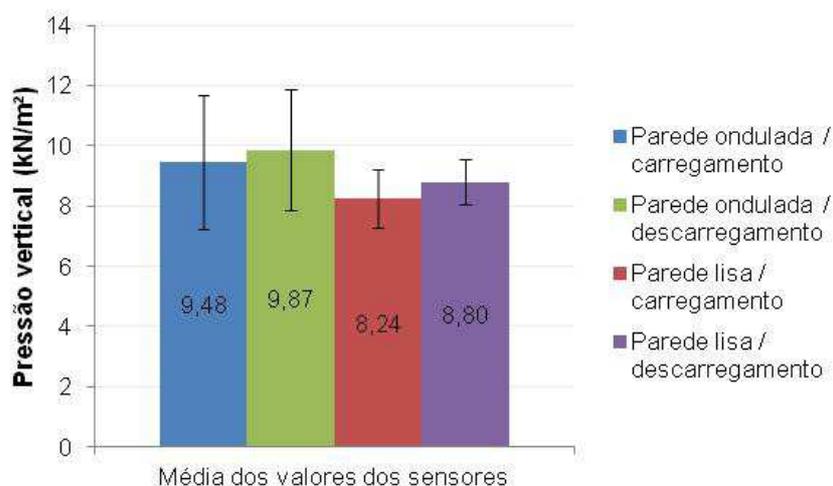
Quanto a esses fatores “não controláveis” supracitados, os quais alteram a disposição e a magnitude das pressões, Zhong, Ooi e Rotter (2001) comentam que pequenas mudanças no processo de enchimento podem ter um efeito considerável no padrão de fluxo de sólidos, mesmo em condições concêntricas. Nesse estudo feito em um silo de alumínio em escala piloto com fundo plano foi observado que o processo de enchimento também interfere nas tensões na parede e fundo da estrutura e, em alguns dos casos avaliados no trabalho, ocorreu grande variação e assimetria acentuada das tensões da parede durante a descarga.

No entanto, as normas recomendam que se considere uma única pressão média vertical atuando no silo de fundo plano (itens 6.2.3.2 da norma AS 3774:1996, 6.2 da norma EN 1991-4:2006 e 3.4 da norma ISO 11697:2012). Considerando esta

recomendação, fez-se a média dos valores apresentados pelos quatro sensores para chegar a esse citado valor homogêneo na tremonha (em kN.m^{-2}), os quais são mostrados na Figura 78 conjuntamente aos seus desvios padrões, nas condições de carregamento e descarregamento e considerando a geometria das paredes do corpo de silo. Infere-se, portanto, que não houve diferença considerável nas pressões normais à tremonha plana, mesmo quando se variou a rugosidade da parede ou quando se promoveu a descarga do silo.

Os resultados reforçam a hipótese de ocorrência de fluxo de funil durante a descarga, já que, neste caso, a transição efetiva ocorre no corpo do silo, deslocando as sobrecargas devidas ao fluxo para esta região. Este fato justifica, por exemplo, a norma EN 1991-4 (2006) preconizar que a pressão vertical que atua sobre o fundo plano de um silo vertical esbelto durante a descarga possa ser considerada idêntica à pressão vertical no final do carregamento, com seus coeficientes de segurança.

Figura 78 – Médias das pressões normais dos quatro carregamentos e descarregamentos, entre os sensores de pressão.

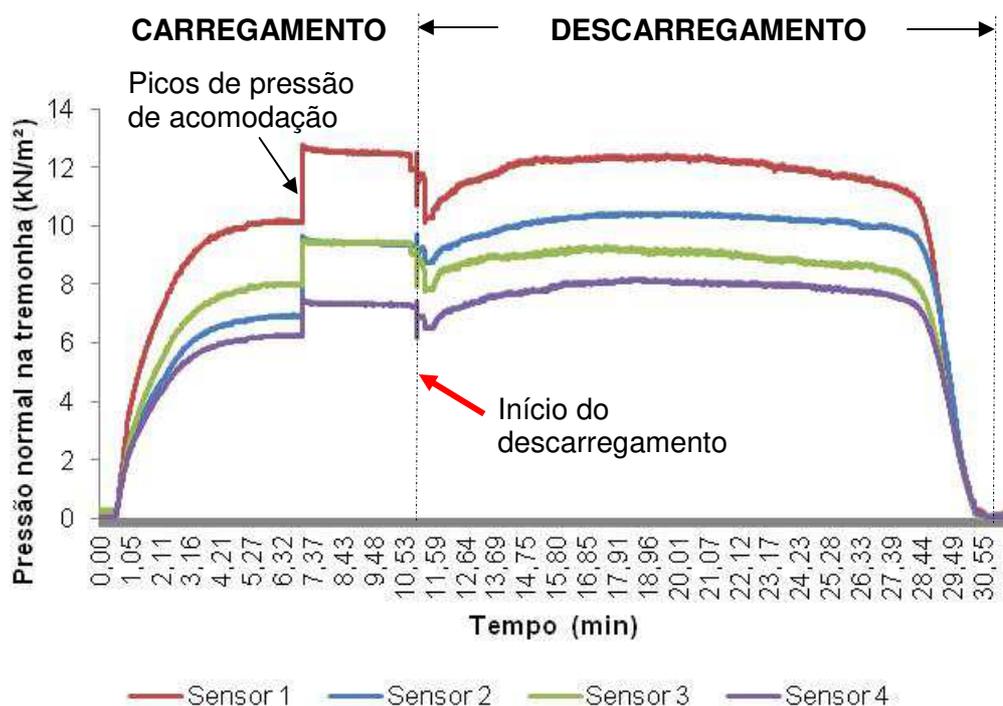


Fonte: Do autor (2020).

Tal fato também pode ser comprovado pelas informações constantes na Figura 79, onde os resultados de pressão normal (ou vertical) no fundo plano são apresentados individualmente, por sensor de pressão, para o experimento no silo com parede ondulada, desde o início do carregamento até o completo esvaziamento do silo. Nesta figura, tem-se que os valores de pressão normal durante a descarga não sofreram acréscimo em relação ao período de carregamento do silo. Além disso, os valores medidos pelos quatro sensores instalados na tremonha de fundo plano mostram a não uniformidade das pressões normais que ocorrem na estrutura.

Outro aspecto a se observar na referida figura é que, durante o enchimento do silo, ocorre um grande salto no valor da pressão normal. Isto se deve à acomodação dos grãos do milho dentro da estrutura durante o enchimento, pois os espaços vazios entre os grãos são reduzidos quando ocorre a acomodação de toda a massa e isto causa aumento no peso específico do produto, fato que é registrado pelas células de pressão.

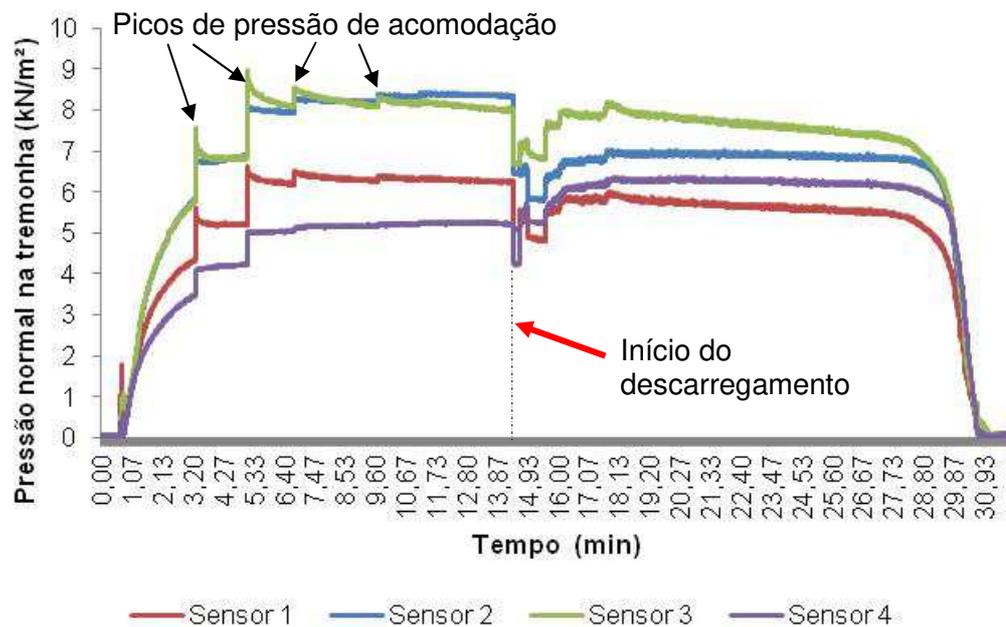
Figura 79 – Valores medidos pelas células de pressão no fundo plano, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

Na Figura 80, onde também se apresenta a pressão normal por sensor de pressão no fundo plano, porém, com a parede lisa, nota-se que ocorrem mais picos de pressão durante o enchimento da estrutura do que se mediu no ensaio com a parede ondulada. Isto se deve ao fato de que a geometria lisa da parede oferece menor resistência ao deslizamento da massa de grãos do que a ondulada. Também é perceptível que os valores das pressões dinâmicas não foram superiores àqueles da condição estática, assim como ocorreu no experimento com parede ondulada, além da assimetria dessas pressões em toda a superfície a tremonha.

Figura 80 - Valores medidos pelas células de pressão no fundo plano, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



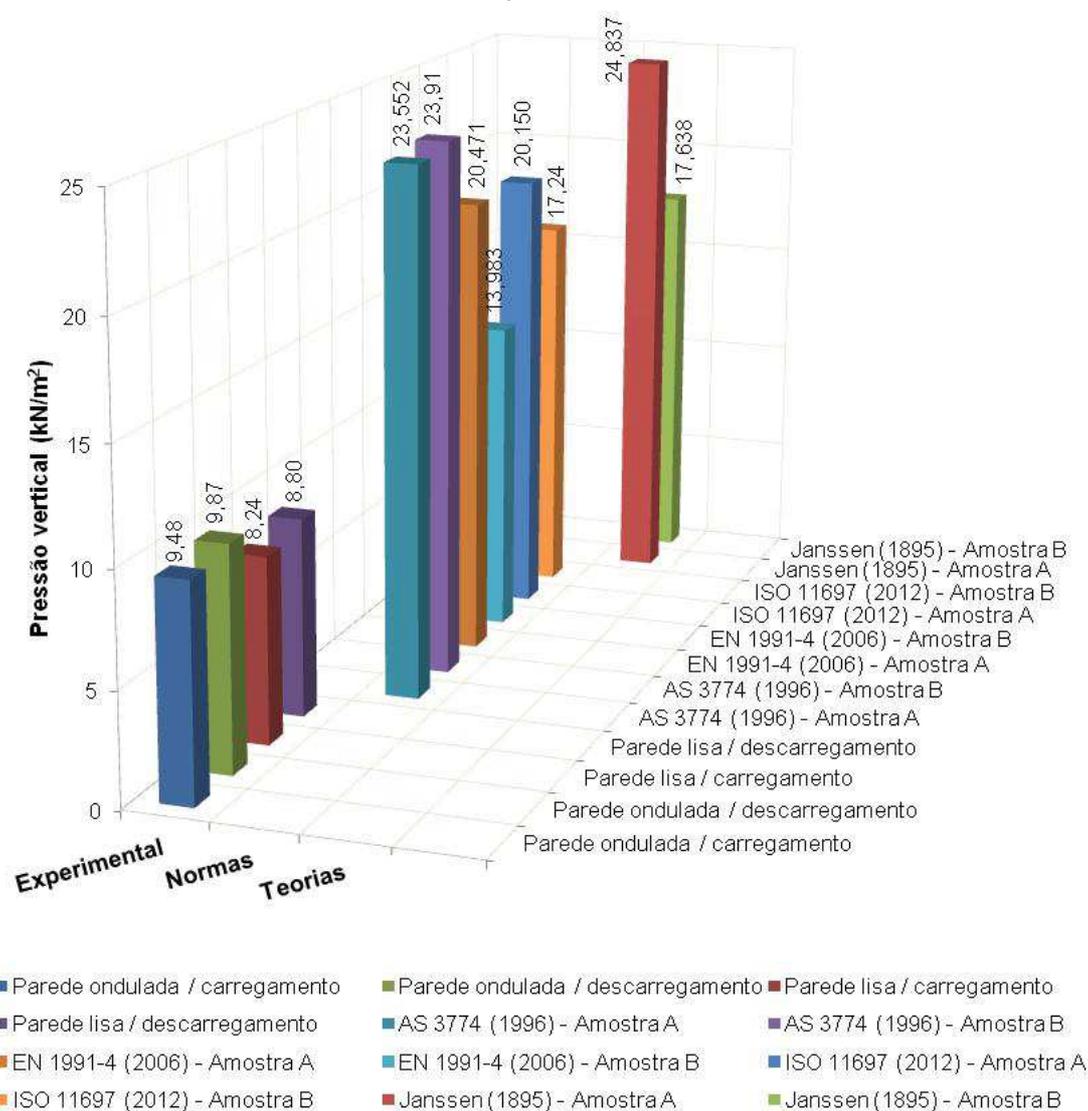
Fonte: Do autor (2020).

A fim de se verificar a conformidade dos resultados experimentais com as normas estrangeiras de cálculo de silos e a teoria de Janssen (1895), são ilustradas na Figura 81 as pressões verticais no fundo do silo calculadas de acordo com as referidas normas e metodologia teórica, considerando as duas amostras de milho avaliadas (Tabela 6) e as pressões medidas no silo piloto, nas condições estáticas e dinâmicas e com as geometrias de paredes do corpo do silo.

Percebe-se o grande afastamento entre os valores empíricos e os demais apresentados na figura, chegando a 301,42% de diferença entre os valores extremos (“parede lisa / carregamento” e “Janssen (1985) – Amostra A”).

Com relação às pressões normais dinâmicas atuantes no fundo do silo, Lopes Neto *et al* (2014) também concluíram que os valores teóricos de pressão vertical propostos pelas normas foram superestimados em relação aos obtidos experimentalmente para a maioria das formas de descarregamento analisadas em seu trabalho (concêntricas, excêntricas e múltiplas).

Figura 81 – Pressões normais (experimentais, normativas e teóricas) na tremonha plana.



Fonte: Do autor (2020).

Sadowski e Rotter (2011) ensaiaram cinco silos de fundo plano e saída concêntrica com diferentes proporções (na faixa de $0,65 \leq H / D \leq 5,20$), sendo todos projetados de acordo com os procedimentos de projeto dados em EN 1993-1-6 (2007) e EN 1993-4-1 (2007), sob as cargas de descarga concêntricas previstas em EN 1991-4 (2006). Concluíram que todos, exceto o menor dos cinco silos avaliados, apresentaram resistência muito superior às solicitações, por um fator de pelo menos 2, além do coeficiente de segurança de 1,65 normativo. Porém, ressaltaram que isso ocorre porque as distribuições de pressão em silos, sob regimes de fluxo aparentemente concêntricos, estão, na realidade, longe de serem axissimétricas. Esta ressalva corrobora com os resultados divergentes de pressão observados entre os sensores instalados na tremonha plana do silo piloto do presente trabalho.

Fank *et al* (2018), assim como no presente trabalho, também obtiveram a distribuição da pressão vertical variável ao longo do raio de um silo de fundo plano, considerando as fases de carregamento, armazenamento e descarga de grãos de milho. Nesse estudo ainda relatam a não ocorrência de sobrepressão no descarregamento do silo de fundo plano. Tais conclusões corroboram com resultados apresentados neste tópico (Item 5.5.1).

5.5.2. Tremonha com inclinação $\alpha=60^\circ$

Na Tabela 8 estão as médias dos valores de pressão normal, em kN.m^2 medidos na tremonha de 60° de inclinação, com seus respectivos desvios padrões, nas condições estática e dinâmica.

Tabela 8 – Pressão normal na tremonha de 60° , com desvio padrão.

Posição do sensor (cm)	Pressão normal à tremonha (kN.m^2)			
	Silo com parede ondulada		Silo com parede lisa	
	Carregamento	Descarregamento	Carregamento	Descarregamento
Sensor 1	$1,46 \pm 0,52$	$13,46 \pm 2,00$	$2,34 \pm 0,66$	$12,03 \pm 1,92$
Sensor 3	$1,83 \pm 0,16$	$14,03 \pm 2,14$	$1,55 \pm 0,22$	$11,71 \pm 0,70$
Sensor 2	$4,79 \pm 0,74$	$5,16 \pm 0,37$	$5,94 \pm 1,38$	$6,08 \pm 1,51$
Sensor 4	$4,98 \pm 0,68$	$5,17 \pm 0,44$	$6,00 \pm 0,71$	$6,17 \pm 0,30$

Fonte: Do autor (2020).

Nota-se que, independente do tipo de parede empregada no corpo do silo (lisa ou rugosa), no carregamento as maiores pressões se encontram na região próxima à boca de descarga, situação que se inverte no descarregamento do silo. Este comportamento se ajusta à proposta de cálculo preconizada pela norma AS 11697 (2012), no entanto, os valores experimentais foram inferiores àqueles calculados pela referida norma, como será detalhado nas Figura 82 e Figura 83.

Pelos valores apresentados na Tabela 8, pode-se observar que ocorre simetria de cargas nas condições de carregamento e descarregamento, tendo em vista os valores medidos nos sensores à frente e atrás do silo, considerando seus desvios padrões.

As pressões normais experimentais foram confrontadas com aquelas calculadas de acordo com as normas internacionais AS 3774 (1996), EN 1991-4 (2006) e ISO 11697 (2012) e pela teoria de Walker (1966) e os resultados podem ser observados nas Figura 82 (condição estática) e Figura 83 (condição dinâmica).

Na Figura 82, e também por meio da Tabela 9, pode-se observar que os valores experimentais obtidos foram consideravelmente menores do que os normativos ou teórico. Nota-se, também, que as pressões normais calculadas pelo método de Walker (1966) foram muito próximas para as propriedades do milho das duas amostras analisadas, conduzindo a duas curvas de pressão que praticamente se sobrepõem.

Figura 82 – Pressões normais experimentais, normativas e teóricas na tremonha de 60°, na condição de carregamento.

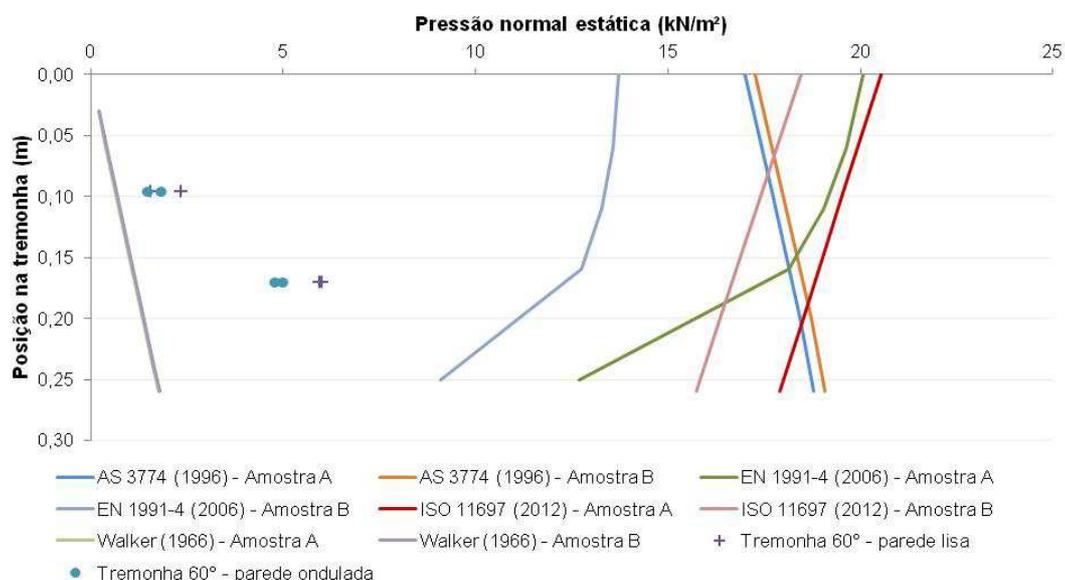


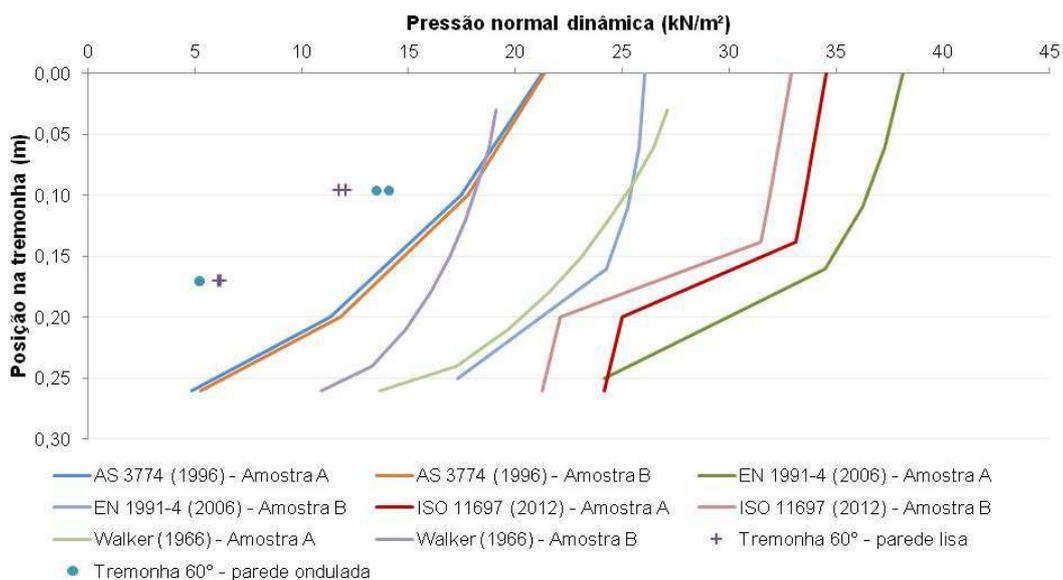
Tabela 9 - Valores de pressão normal estática na tremonha de 60° calculados pelas normas estrangeiras e teoria, na posição das células de pressão (sensores).

Normas estrangeiras e teoria	Posição do sensor (cm)	
	9,5	17
	Pressão normal à tremonha (kN.m ⁻²)	
AS 3774 (1996) – Amostra A	17,716	18,436
AS 3774 (1996) – Amostra B	17,982	18,710
EN 1991-4 (2006) – Amostra A	19,058	18,138
EN 1991-4 (2006) – Amostra B	13,286	12,763
ISO 11697 (2012) – Amostra A	19,523	18,514
ISO 11697 (2012) – Amostra B	17,407	16,363
Walker (1966) – Amostra A	0,6142	1,2284
Walker (1966) – Amostra B	0,6207	1,2414

Fonte: Do autor (2020).

Na condição dinâmica, os valores empíricos de pressão normal na tremonha também foram inferiores aos demais apresentados na Figura 83, no entanto, com uma aproximação àqueles dados pela norma australiana (AS 3774:1996). Os valores calculados pelas normas estrangeiras e teoria de Walker (1966), nas mesmas posições dos sensores, estão apresentados na Tabela 10.

Figura 83 – Pressões normais experimentais, normativas e teóricas na tremonha de 60°, na condição de descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

Tabela 10- Valores de pressão normal dinâmica na tremonha de 60° calculados pelas normas estrangeiras e teoria, na posição das células de pressão (sensores).

Normas estrangeiras e teoria	Posição do sensor (cm)	
	9,5	17
	Pressão normal à tremonha (kN.m ⁻²)	
AS 3774 (1996) – Amostra A	17,545	11,346
AS 3774 (1996) – Amostra B	17,749	11,807
EN 1991-4 (2006) – Amostra A	36,210	34,463
EN 1991-4 (2006) – Amostra B	25,243	24,249
ISO 11697 (2012) – Amostra A	33,523	24,994
ISO 11697 (2012) – Amostra B	31,883	22,091
Walker (1966) – Amostra A	19,6689	24,3740
Walker (1966) – Amostra B	14,8617	17,6474

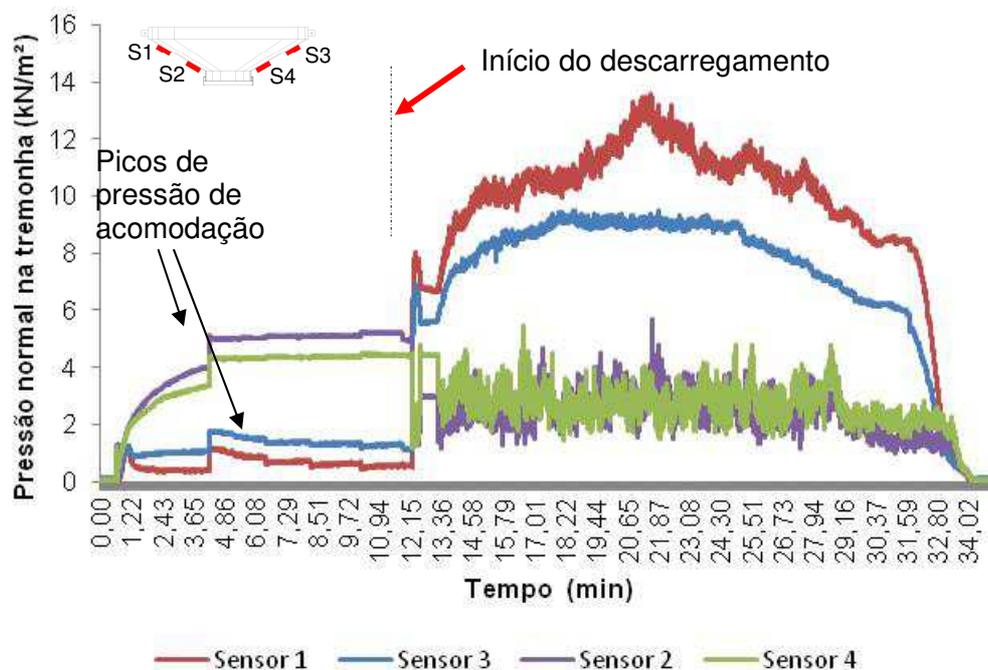
Fonte: Do autor (2020).

Nas Figura 84 e Figura 85 têm-se as pressões normais à tremonha desde o início do carregamento até o término do descarregamento do silo (de uma das quatro repetições para o experimento com essa geometria). Inversamente ao que foi relatado para a tremonha plana, para a tremonha com inclinação de 60° há considerável acréscimo de pressões na situação dinâmica e, conforme pode se notado nas referidas figuras, as pressões medidas pelos sensores próximos à boca de descarga da estrutura são superiores àquelas medidas na região de transição durante todo o processo de carregamento e inferiores durante toda a descarga, e não somente seus valores máximos, como apresentado na Tabela 8.

Pode-se notar, também, a grande influência da rugosidade do corpo do silo. Quando se utiliza a parede lisa observa-se que no carregamento ocorrem mais picos de pressão devidos à acomodação do produto do que com a parede ondulada e, no descarregamento, há menos oscilação da pressão na região de transição, já que esta parede permite um fluxo constante e mais regular do que a ondulada.

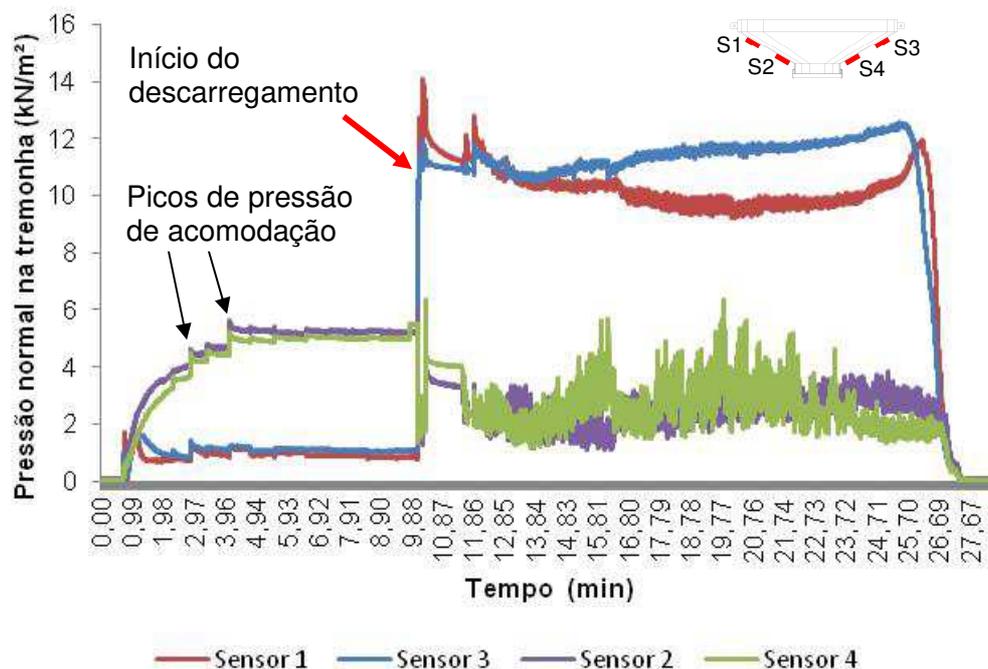
Durante a descarga do silo, a movimentação dos grãos provocou grande oscilação nas pressões medidas pelos sensores próximos a boca de descarga. Ressalta-se que este aspecto de carga dinâmica que atua na estrutura não foi notado na tremonha plana de forma tão evidente quanto na tremonha de 60°.

Figura 84 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 60°, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 85 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 60°, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

Com relação aos picos de pressões dinâmicas mostrados na Figura 84, os quais acontecem próximos ao tempo 20,65min do ensaio, portanto, após o início da descarga, pode-se inferir que, provavelmente, são resultantes de mudanças nos regimes de fluxo durante a descarga, configurando-se em fluxo misto.

5.5.3. Tremonha com inclinação $\alpha=45^\circ$ concêntrica

As médias dos valores máximos de pressão normal medidos na tremonha de 45°, nas condições estática e dinâmica, estão listadas na Tabela 11, com seus respectivos desvios padrões. Nesta, pode-se perceber um comportamento análogo ao relatado para a tremonha de 60°, onde os valores das pressões normais próximas à boca de descarga são superiores àquelas na região de transição, durante o enchimento. Este aspecto das pressões se inverte no descarregamento do silo.

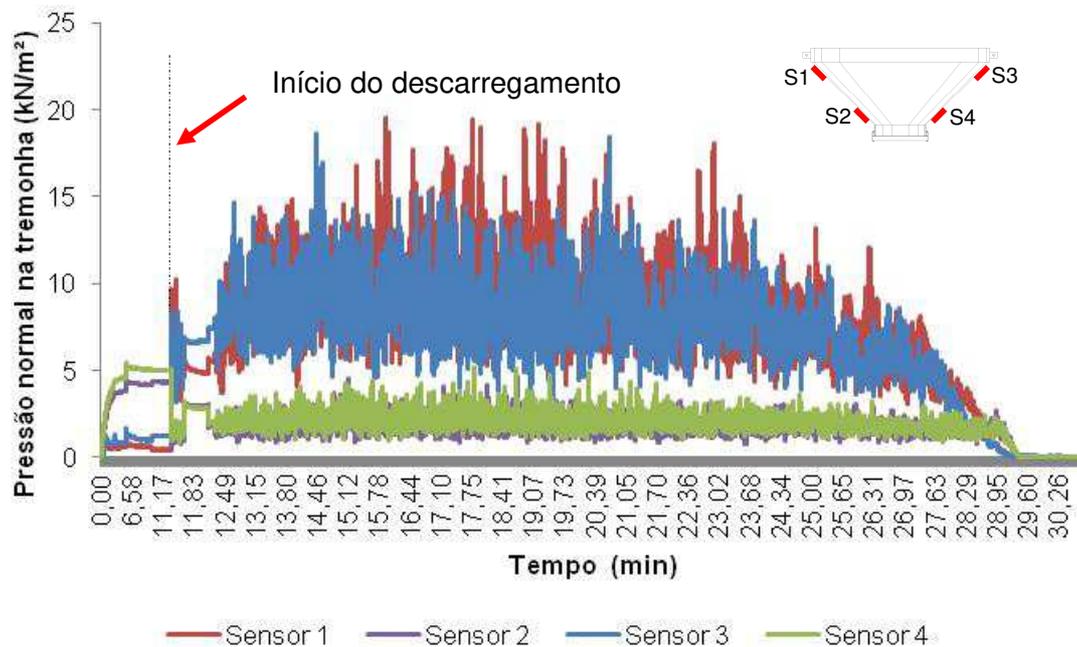
Tabela 11 – Pressão normal na tremonha de 45° concêntrica, com desvio padrão.

Posição do sensor (cm)	Pressão normal à tremonha (kN.m ²)			
	Silo com parede ondulada		Silo com parede lisa	
	Carregamento	Descarregamento	Carregamento	Descarregamento
Sensor 1	1,44 ± 0,27	21,08 ± 1,81	1,75 ± 0,41	47,56 ± 5,14
Sensor 3	1,91 ± 0,39	20,43 ± 1,90	2,93 ± 1,02	46,14 ± 5,06
Sensor 2	4,67 ± 0,31	5,26 ± 0,59	7,47 ± 0,64	7,15 ± 0,62
Sensor 4	5,76 ± 0,47	6,04 ± 0,64	4,84 ± 1,62	5,17 ± 0,58

Fonte: Do autor (2020).

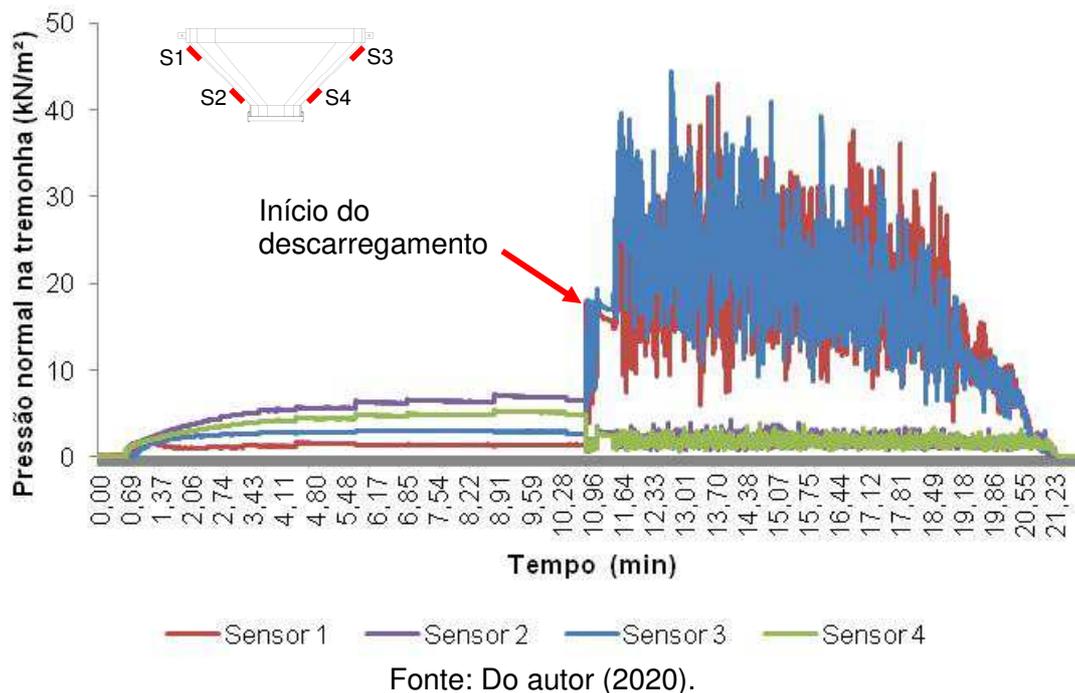
A inversão das posições de pressões extremas (máximas) na tremonha pode ser mais bem visualizada nas Figura 86 e Figura 87, onde se tem a pressão em cada sensor da tremonha medida do início do carregamento até o completo descarregamento do silo. Ressalta-se que nestas referidas figuras estão os comportamentos de pressão medidos em um dos quatro ensaios realizados com a tremonha de 45° concêntrica.

Figura 86 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 45° concêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 87 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 45° concêntrica, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



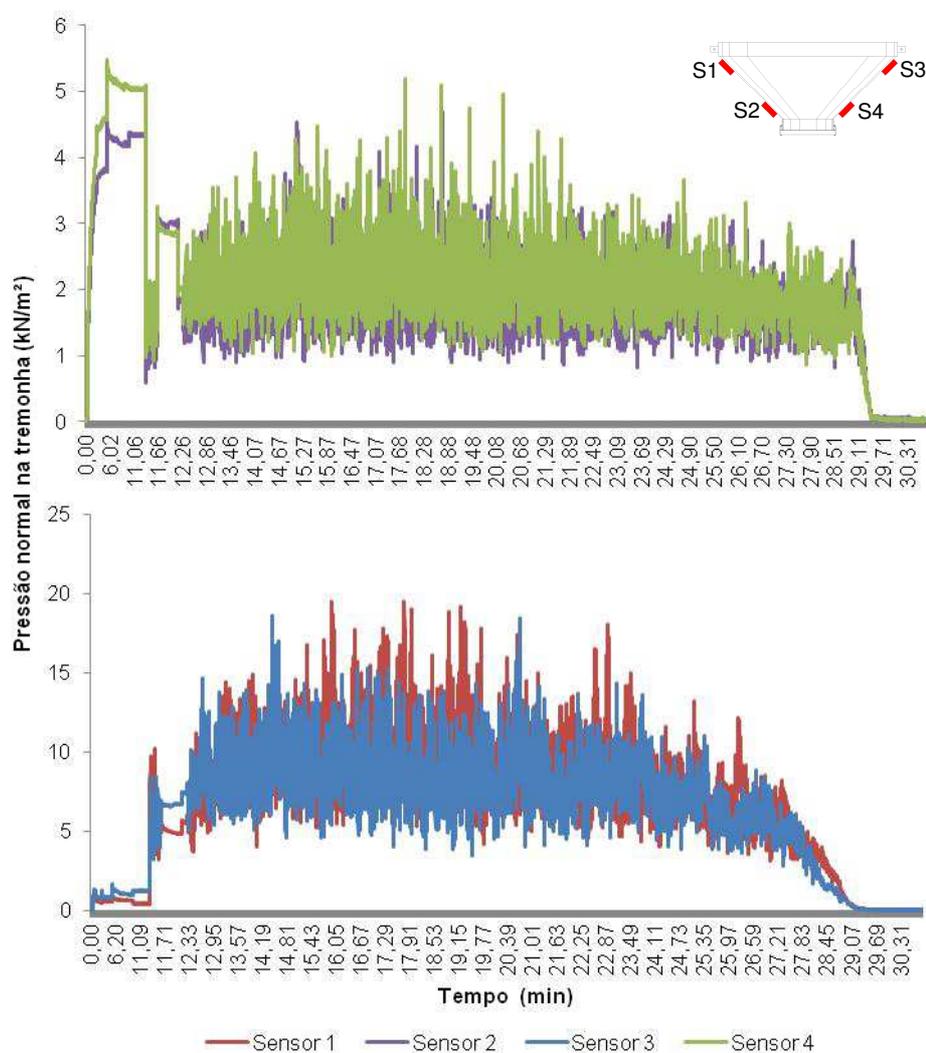
Wang, Lu e Ooi (2015) relatam que as flutuações de pressão normal de maiores magnitudes ocorrem quando o material está fluindo contra as paredes do silo e diretamente sobre as células de pressão na região de transição efetiva. Abaixo da transição efetiva na parte inferior da tremonha do silo, as flutuações são menores e estão associadas ao canal de fluxo interno, onde não há efetivamente fluxo contra as paredes do silo. Estas considerações justificam as inversões de pressões normais máximas supracitadas nas condições de carregamento e descarregamento, para as tremonhas de 60° e 45° analisadas.

São percebidas as grandes oscilações de pressão durante o descarregamento do silo, causada pelo fluxo dos grãos. Essa carga dinâmica causa grande vibração na estrutura e sucessivos picos de pressão na tremonha. A fim de melhor detalhar a evolução das pressões na tremonha de 45° concêntrica durante todo o ensaio (carregamento e descarregamento), apresentam-se, separadamente, as curvas de pressão normal registradas pelos sensores na região de transição e próximos à boca de descarga para o ensaio realizado com a parede ondulada (Figura 88).

Observa-se que as maiores pressões durante o carregamento (próximas à boca de descarga) sofrem abrupta queda no início do descarregamento, oriundas da mudança do estado de pressões ativo para o passivo, a qual promove o fluxo do produto. Simultaneamente a esse alívio instantâneo de tensões, as pressões na região

de transição apresentam grande acréscimo de valores, devido ao fluxo do produto que passa a atuar como carregamento dinâmico nessa região (situação também observada para a tremonha de 60° de inclinação). Esse pico de pressões dinâmicas na transição já é conhecido e foi citado por diversos autores (Yáñez, Guaita, Lopez, 2001; Guaita, Couto, Ayuga, 2003; Madrona, Carlito Calil, 2009; Ruiz, Couto, Aguado, 2012; González-Montellano, 2012; Wang, Lu, Ooi, 2014; Gallego, Ruiz, Aguado, 2015; Zheng, Yu, 2015;), além de previsto nas diversas normas avaliadas no presente trabalho.

Figura 88 – Pressões normais na região de transição e boca de descarga da tremonha de 45° concêntrica (silo com parede ondulada).



Fonte: Do autor (2020).

Em comparação com as normas e a teoria de Walker (1966), as pressões normais empíricas obtidas na tremonha de 45° concêntrica pouco se aproximaram delas, na condição estática dos ensaios, superando apenas os valores teóricos

(WALKER, 1966), conforme ilustrado na Figura 89 ou apresentado na Tabela 12. Entretanto, pode-se observar que as pressões dinâmicas máximas para o ensaio com parede ondulada são similares àqueles valores obtidos pela norma “EN 1991-4 (2006) – Amostra A”, próximo à transição, conforme se observa na Figura 90 ou Tabela 13.

Figura 89 - Pressões normais experimentais, normativas e teóricas na tremonha de 45° concêntrica, na condição de carregamento.

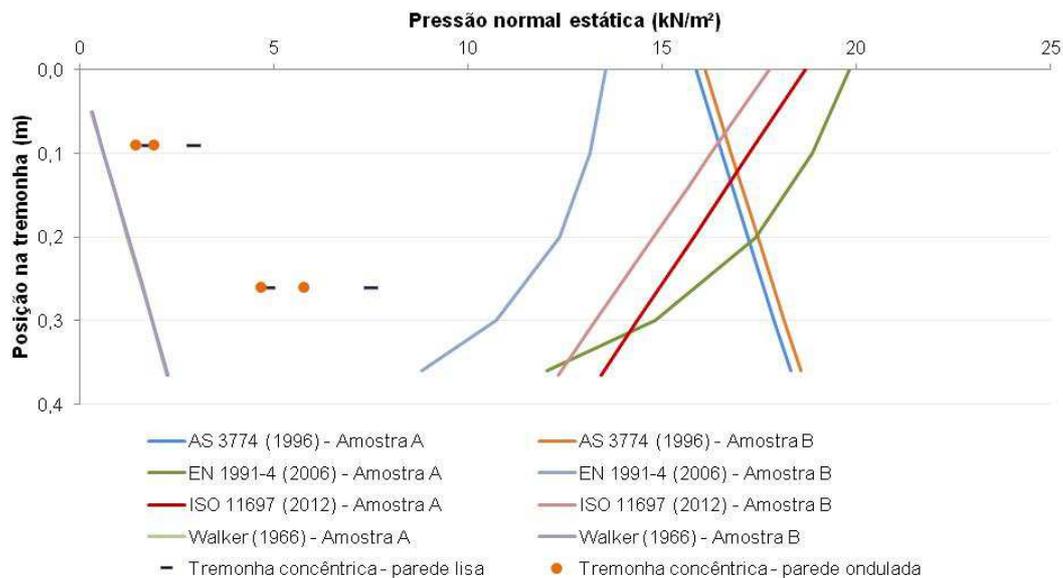


Tabela 12 - Valores de pressão normal estática na tremonha de 45° concêntrica, calculados pelas normas estrangeiras e teoria, nas mesmas posições das células de pressão (sensores).

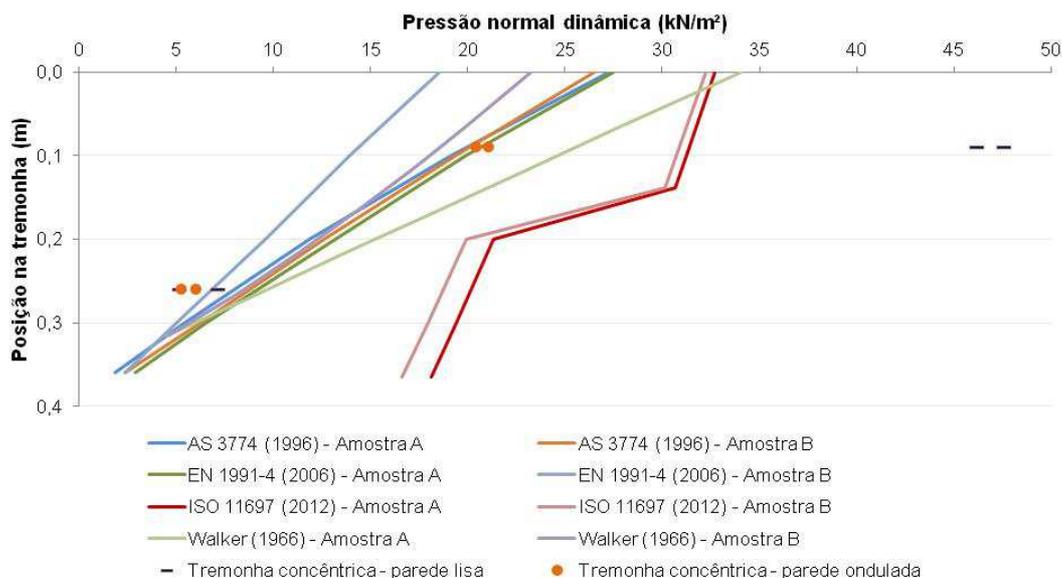
Normas estrangeiras e teoria	Posição do sensor (cm)	
	9	26
	Pressão normal à tremonha (kN.m ⁻²)	
AS 3774 (1996) – Amostra A	16,531	17,874
AS 3774 (1996) – Amostra B	16,779	18,137
EN 1991-4 (2006) – Amostra A	18,854	14,824
EN 1991-4 (2006) – Amostra B	13,144	10,735
ISO 11697 (2012) – Amostra A	17,245	14,368
ISO 11697 (2012) – Amostra B	16,257	13,282
Walker (1966) – Amostra A	0,6171	1,5428
Walker (1966) – Amostra B	0,6237	1,5592

Fonte: Do autor (2020).

Por sua vez, na condição dinâmica, os valores máximos com a parede lisa (na região de transição) superaram significativamente quaisquer valores recomendados

pelas normas ou teóricos estudados, estando 7,1 vezes acima do valor encontrado pelo cálculo pelo método de “Walker (1966) – Amostra A” ou 342% acima daquele preconizado pela “EN 1991-4 (2006) – Amostra B”. No descarregamento, as pressões empíricas próximas à boca de descarga foram mais bem descritas por aquelas calculadas pela norma “EN 1991-4 (2006) – Amostra B”.

Figura 90 - Pressões normais experimentais, normativas e teóricas na tremonha de 45° concêntrica, na condição de descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

Tabela 13 - Valores de pressão normal dinâmica na tremonha de 45° concêntrica, calculados pelas normas estrangeiras e teoria, nas mesmas posições das células de pressão (sensores).

Normas estrangeiras e teoria	Posição do sensor (cm)	
	9	26
	Pressão normal à tremonha (kN.m ²)	
AS 3774 (1996) – Amostra A	19,178	5,392
AS 3774 (1996) – Amostra B	19,393	6,213
EN 1991-4 (2006) – Amostra A	19,924	6,479
EN 1991-4 (2006) – Amostra B	13,922	5,005
ISO 11697 (2012) – Amostra A	31,244	19,397
ISO 11697 (2012) – Amostra B	30,733	17,930
Walker (1966) – Amostra A	9,1725	23,1952
Walker (1966) – Amostra B	8,1424	17,1963

Fonte: Do autor (2020).

5.5.4. Tremonha com inclinação $\alpha=45^\circ$ excêntrica

As médias dos valores máximos de pressão normal na tremonha registrados pelos sensores estão listados na Tabela 14, juntamente com os respectivos desvios padrões. No lado oposto à excentricidade houve grande acréscimo de pressão durante a descarga do silo, notadamente quando o corpo do silo é constituído com paredes lisas. Neste caso, a pressão medida na região de transição, com o corpo do silo com parede lisa, foi aproximadamente 4,5 vezes maior no descarregamento, em relação ao carregamento. Por sua vez, a pressão normal dinâmica na tremonha, com a parede ondulada do silo, apresentou valores da ordem de 1,35 vezes a pressão normal estática, no mesmo ponto. No entanto, no lado próximo à excentricidade da tremonha, para ambos os tipos de paredes, não se observou significativa diferença nos valores de pressão normal estática ou dinâmica.

Tabela 14 – Pressão normal na tremonha de 45° excêntrica, com desvio padrão.

Célula de pressão (sensor)	Pressão normal à tremonha (kN.m ²)			
	Silo com parede ondulada		Silo com parede lisa	
	Carregamento	Descarregamento	Carregamento	Descarregamento
1	11,95 ± 1,14	16,16 ± 2,14	16,16 ± 1,48	73,81 ± 5,12
2	9,21 ± 1,7	9,48 ± 3,17	14,80 ± 0,99	23,68 ± 2,47
3	7,80 ± 0,56	8,14 ± 0,46	10,07 ± 1,67	9,71 ± 1,52
4	11,67 ± 1,32	11,37 ± 1,16	12,57 ± 0,57	11,93 ± 0,60
5	2,90 ± 0,23	2,71 ± 0,32	2,17 ± 0,57	2,28 ± 0,33

Fonte: Do autor (2020).

Nas Figura 91 e Figura 92 são ilustradas as variações de pressão normal em cada sensor instalado na tremonha durante um dos ensaios realizados.

Figura 91 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 45° excêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.

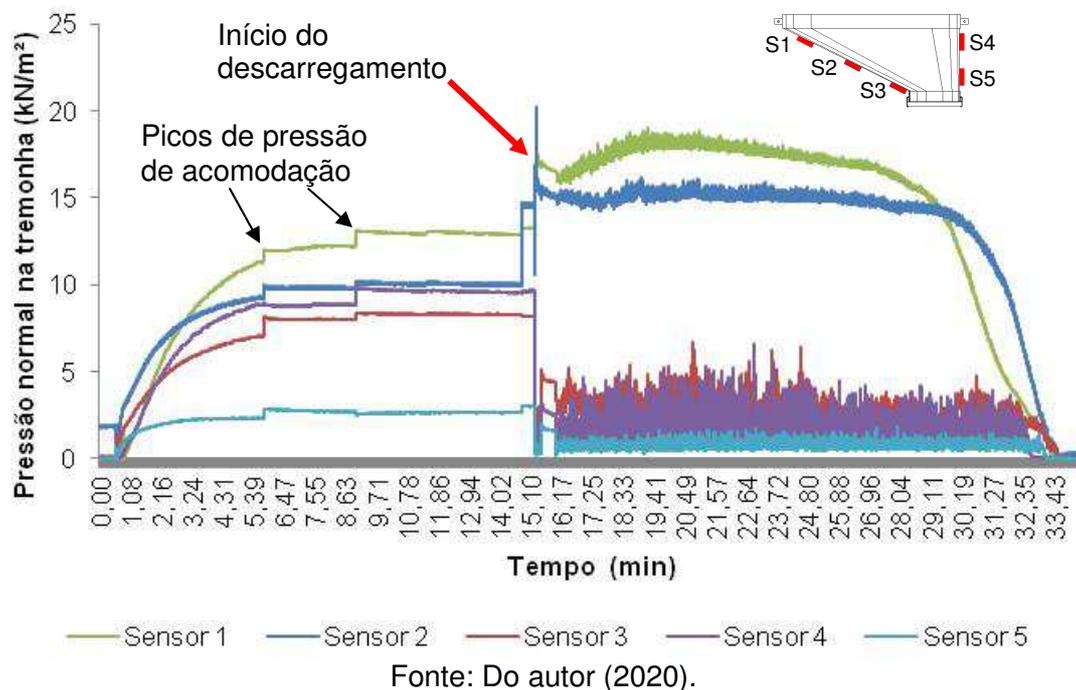
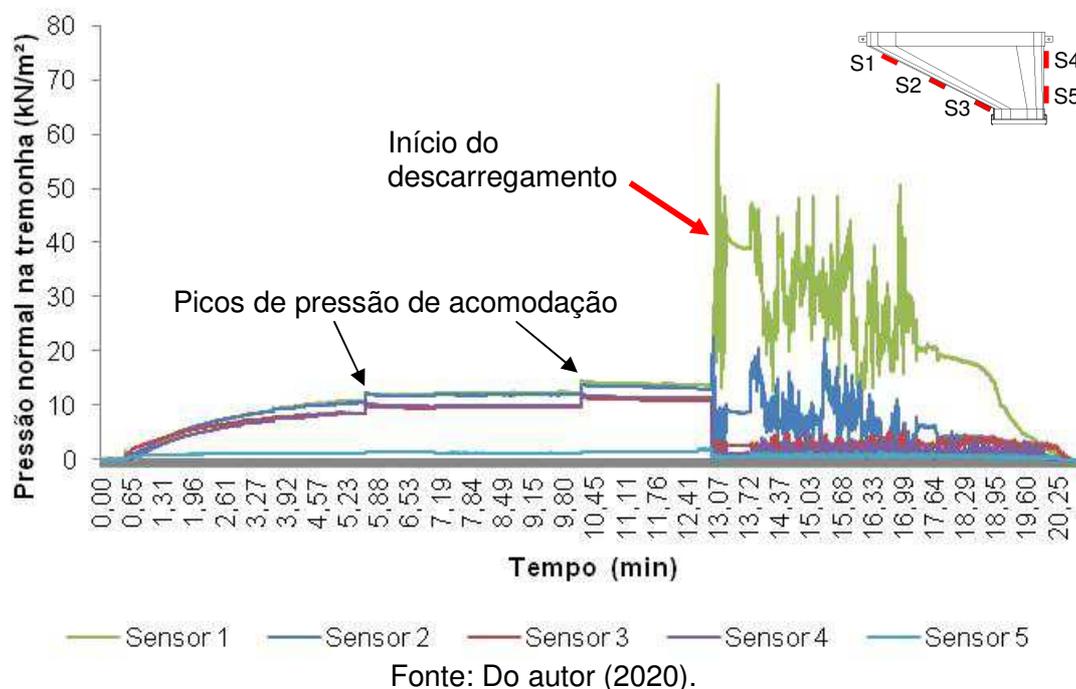


Figura 92 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 45° excêntrica, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.

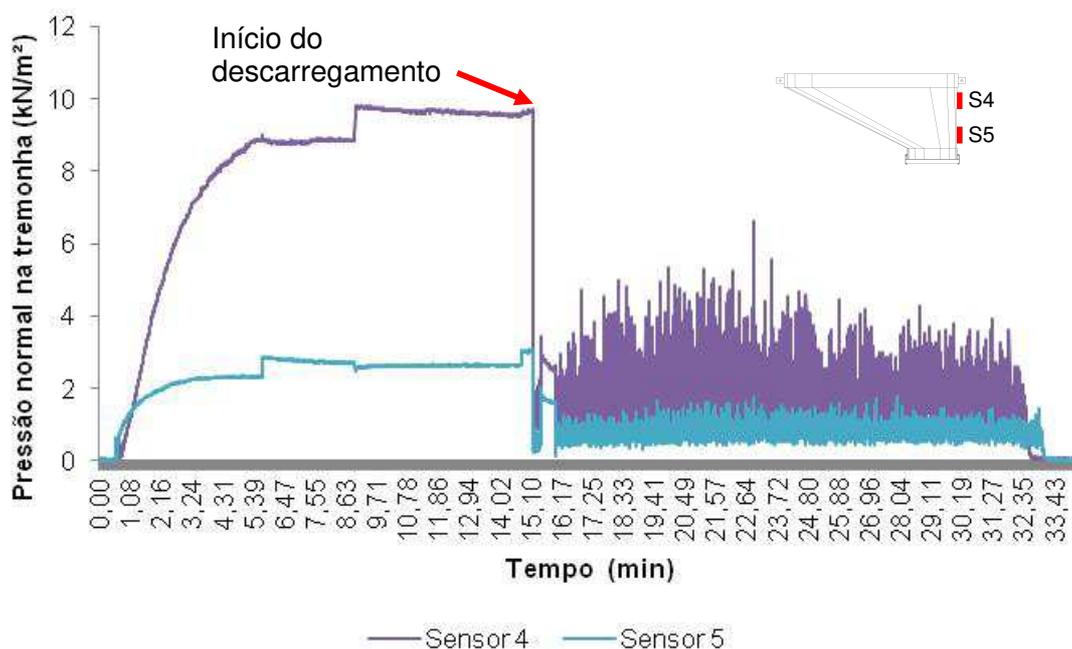


Pode-se notar claramente o pico de pressão que ocorre no instante em que se inicia a descarga do silo e os acréscimos de pressão durante o enchimento, causados pela acomodação do produto durante o carregamento.

Ao se avaliar a importância da geometria da parede do corpo do silo nota-se a diferença entre esforços máximos calculados devidos a essa variável em estudo, pois com a parede lisa a pressão normal dinâmica na região de transição foi cerca de 4,57 vezes maior do que o valor obtido nos estudos com a parede ondulada, para o “sensor 1”.

Na Figura 93, onde são mostrados os resultados de pressão normal apenas nos sensores da parede vertical da tremonha (detalhe da Figura 91), destaca-se que logo após o início do descarregamento as pressões nessa região (próxima à excentricidade) se reduzem consideravelmente, ou seja, após o curto período de tempo onde ocorre o pico de pressões dinâmicas.

Figura 93 - Valores medidos pelas células de pressão na parede vertical da tremonha de 45° excêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

Vidal *et al.* (2006) também relatam sobre as diferenças nas pressões nas paredes de um silo causadas pela tremonha excêntrica, sendo maiores do que no caso da tremonha concêntrica. No trabalho é relatado que a geometria assimétrica do silo conduz a problemas nos cálculos que não são cobertos pela literatura técnica nem pelas as normas de cálculo (no caso de grandes excentricidades da boca de descarga).

Ramírez, Nielsen e Ayuga (2010) avaliaram as pressões em três silos de teste com diferentes excentricidades da tremonha usando trigo e milho como materiais armazenados. Destes estudos, relataram sobre mudanças observadas nos regimes de fluxo associados a grandes distribuições de carga. Componentes não simétricos dos esforços na estrutura também foram observados em torno da mesma durante toda a descarga, apesar da simetria operacional desta parte do silo. Além disso, um componente não simétrico sistemático considerável da pressão foi identificado nas tremonhas com excentricidades diferentes que indicam o efeito da excentricidade da tremonha nas distribuições de carga.

5.5.5. Tremonha com inclinação $\alpha=30^\circ$ concêntrica

Na Tabela 15 estão listadas as médias das pressões normais medidas pelos sensores, com seus respectivos desvios padrões. Assim como relatado para as tremonhas concêntricas de 60° e 45° , também para a tremonha de 30° observam-se os valores máximos de pressão normal próximos à boca de descarga da tremonha, quando do enchimento do silo, e próximos à região de transição, no descarregamento.

Nas faces da tremonha onde foram instalados os sensores não se registraram valores de pressão diametralmente simétricos, a uma mesma altura dos pares de células de pressão. Na situação dinâmica, por exemplo, os maiores esforços próximos à transição foram $30,47 \pm 4,92 \text{ kN.m}^{-2}$ e $23,45 \pm 1,69 \text{ kN.m}^{-2}$, nos ensaios com a parede ondulada, e $42,31 \pm 5,11 \text{ kN.m}^{-2}$ e $30,14 \pm 4,36 \text{ kN.m}^{-2}$, nos ensaios com a parede lisa.

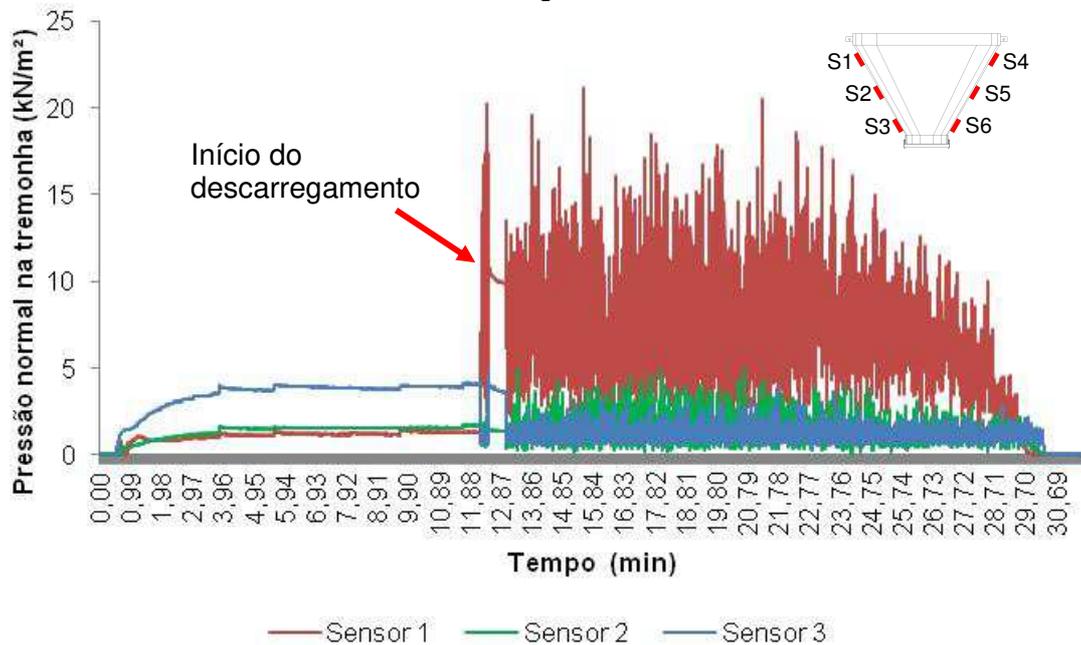
Tabela 15 – Pressão normal média na tremonha de 30° concêntrica, com desvio padrão.

Célula de pressão (sensor)	Pressão normal à tremonha (kN.m^{-2})			
	Silo com parede ondulada		Silo com parede lisa	
	Carregamento	Descarregamento	Carregamento	Descarregamento
1	$1,83 \pm 0,42$	$30,47 \pm 4,92$	$2,70 \pm 0,22$	$42,31 \pm 5,11$
2	$3,14 \pm 0,58$	$15,20 \pm 3,08$	$4,22 \pm 0,44$	$9,30 \pm 1,28$
3	$4,16 \pm 0,62$	$4,54 \pm 0,71$	$6,10 \pm 0,74$	$5,75 \pm 0,54$
4	$1,76 \pm 0,29$	$23,45 \pm 1,69$	$2,74 \pm 0,26$	$30,14 \pm 4,36$
5	$1,97 \pm 0,22$	$6,06 \pm 0,91$	$4,22 \pm 0,44$	$8,45 \pm 0,50$
6	$4,18 \pm 0,33$	$4,72 \pm 0,57$	$5,46 \pm 0,41$	$5,34 \pm 0,45$

Fonte: Do autor (2020).

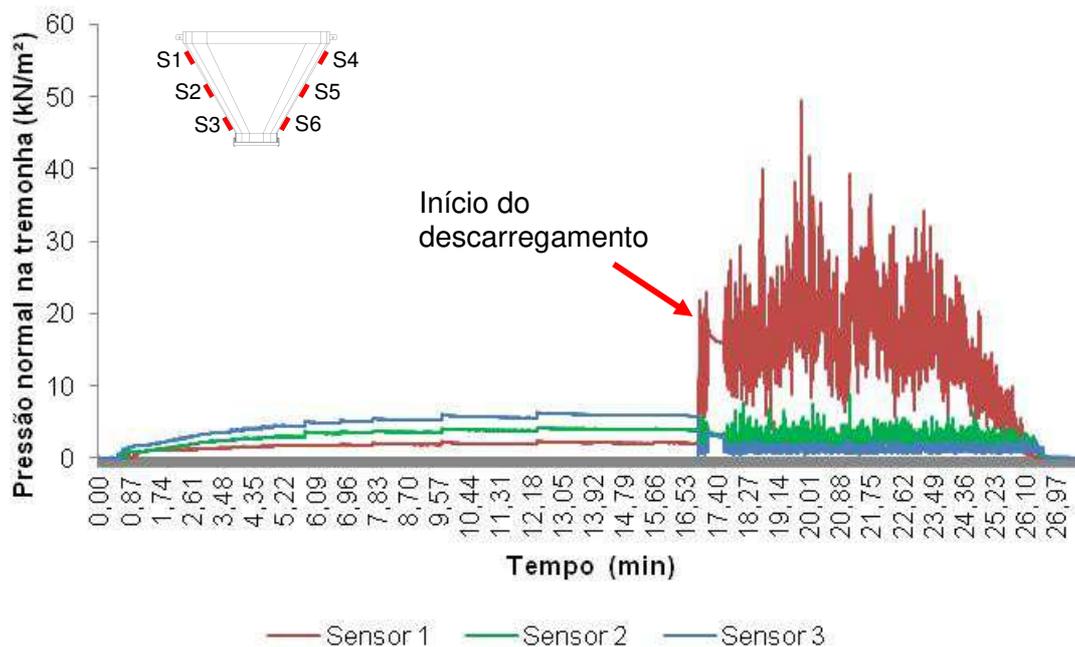
Para a avaliação do comportamento das células de pressão, optou-se por mostrar apenas os valores medidos pelos sensores instalados na frente do silo, já que, embora não haja simetria de valores, os comportamentos das pressões são similares. Nas Figura 94 e Figura 95 onde são ilustrados graficamente os resultados de pressão em um dos ensaios realizados com essa tremonha, nota-se a inversão das maiores pressões entre o carregamento e o descarregamento (já relatado numericamente na Tabela 15).

Figura 94 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 30° concêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 95 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 30° concêntrica, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



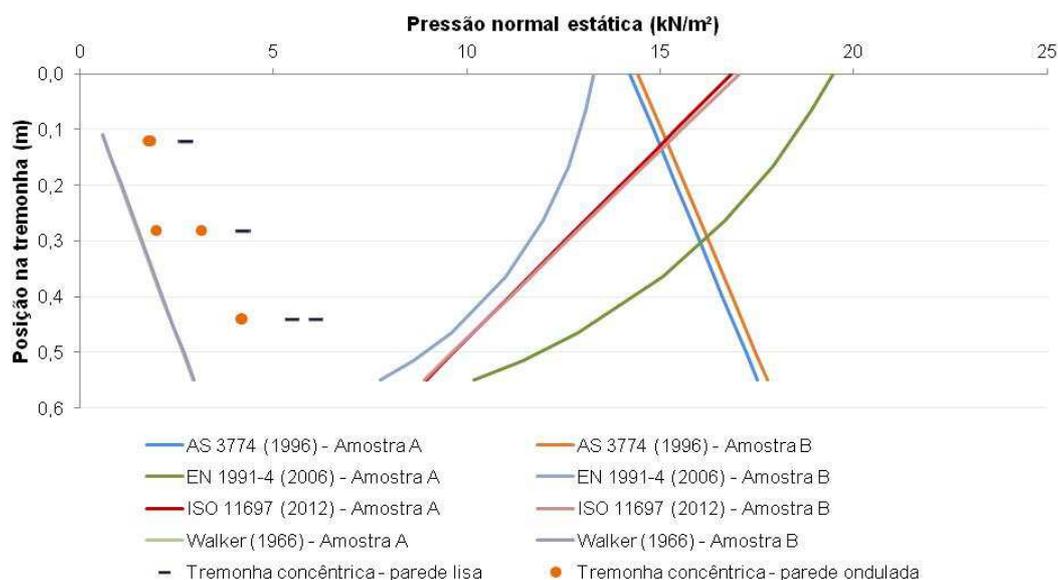
Fonte: Do autor (2020).

Nas Figura 94 e Figura 95 também se percebem os picos de pressão normal que ocorrem no descarregamento do silo, na região da transição, os quais são superiores aos das regiões mais distantes (sensores 2, 3, 5 e 6), para ambas as geometrias de paredes do corpo do silo avaliadas. Ressalta-se, porém, a grande influência da geometria da parede, pois no descarregamento a pressão normal com a parede lisa foi 1,39 vezes maior do que com a parede ondulada.

O estudo comparativo das pressões normais experimentais na tremonha com os valores normativos e teóricos mostram grande divergência entre os resultados obtidos, principalmente na situação de carregamento do silo (Figura 96). Os valores empíricos superaram aqueles calculados pela metodologia de Walker (1966), mas foram significativamente inferiores aos preconizados pelas normas avaliadas nesse trabalho.

No estudo das pressões normais teóricas e normativas com a tremonha de 30° concêntrica, observou-se considerável influência devida às propriedades físicas das duas amostras de milho apenas nos resultados obtidos por meio da norma EN 1991-4 (2006), conforme se nota na Figura 96 ou pela Tabela 16.

Figura 96- Pressões normais experimentais, normativas e teóricas na tremonha de 30° concêntrica, na condição de carregamento.



Fonte: Do autor (2020).

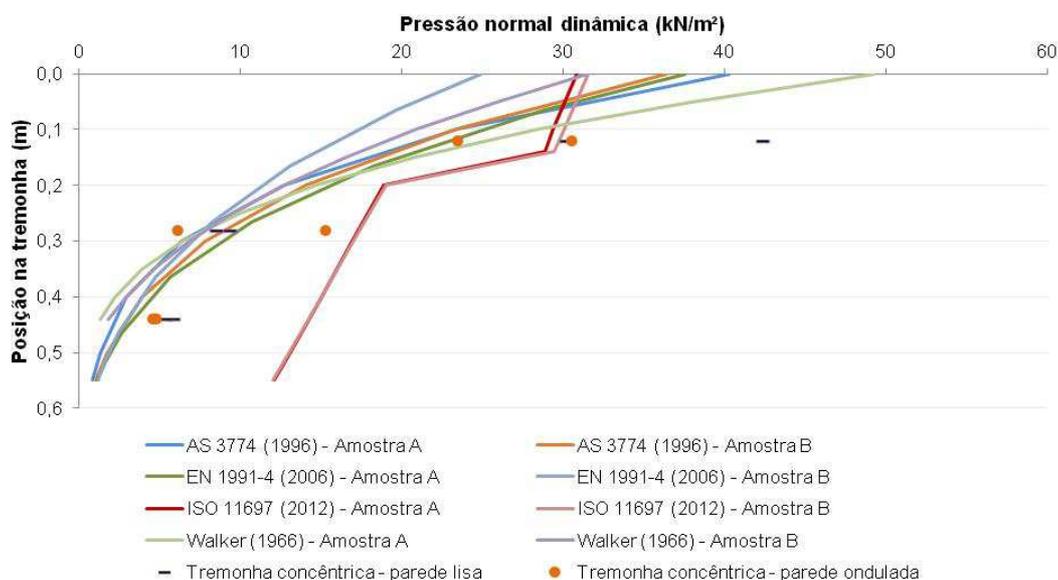
Tabela 16 - Valores de pressão normal estática na tremonha de 30° concêntrica, calculados pelas normas estrangeiras e teoria, nas mesmas posições das células de pressão (sensores).

Normas estrangeiras e teoria	Posição do sensor (cm)		
	12	28	44
	Pressão normal à tremonha (kN.m ⁻²)		
AS 3774 (1996) – Amostra A	14,814	16,018	16,620
AS 3774 (1996) – Amostra B	15,037	16,253	16,861
EN 1991-4 (2006) – Amostra A	17,936	16,681	12,871
EN 1991-4 (2006) – Amostra B	12,631	11,967	9,599
ISO 11697 (2012) – Amostra A	14,849	12,537	11,106
ISO 11697 (2012) – Amostra B	14,987	12,596	11,115
Walker (1966) – Amostra A	0,5823	1,5881	2,3821
Walker (1966) – Amostra B	0,5885	1,6049	2,4073

Fonte: Do autor (2020).

Na descarga do silo, os resultados experimentais representaram bem os valores de pressão normal na tremonha segundo as normas e teoria avaliadas (com exceção da ISO 11697:2012), já que seguiram a mesma tendência de suas curvas, conforme Figura 97. Também se observam valores assimétricos de pressão na tremonha, notadamente nos ensaios realizados com a parede ondulada.

Figura 97- Pressões normais experimentais, normativas e teóricas na tremonha de 30° concêntrica, na condição de descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

Tabela 17 - Valores de pressão normal dinâmica na tremonha de 30° concêntrica, calculados pelas normas estrangeiras e teoria, nas mesmas posições das células de pressão (sensores).

Normas estrangeiras e teoria	Posição do sensor (cm)		
	12	28	44
Pressão normal à tremonha (kN.m ⁻²)			
AS 3774 (1996) – Amostra A	23,428	6,324	2,927
AS 3774 (1996) – Amostra B	23,354	7,811	3,908
EN 1991-4 (2006) – Amostra A	18,214	10,685	2,609
EN 1991-4 (2006) – Amostra B	13,079	8,196	2,408
ISO 11697 (2012) – Amostra A	28,848	16,925	14,993
ISO 11697 (2012) – Amostra B	29,463	17,004	15,005
Walker (1966) – Amostra A	1,2876	9,9608	28,4653
Walker (1966) – Amostra B	1,8062	9,5077	20,8914

Fonte: Do autor (2020).

5.5.6. Tremonha com inclinação $\alpha=30^\circ$ excêntrica

As médias dos valores registrados pelos sensores na tremonha de 30° excêntrica, durante os ensaios no silo piloto, estão listadas na Tabela 18. Nota-se que as pressões dinâmicas na parede vertical da tremonha não se distinguem, em valor, daquelas registradas na condição estática, considerando as médias e respectivos desvios padrões (fato também observado com a tremonha de 45° excêntrica).

Entretanto, as pressões dinâmicas no lado oposto à excentricidade e, principalmente, na região de transição da tremonha são superiores às pressões normais estáticas.

Tabela 18 – Pressão normal na tremonha de 30° excêntrica, com desvio padrão.

Célula de pressão (sensor)	Pressão normal à tremonha (kN.m ⁻²)			
	Silo com parede ondulada		Silo com parede lisa	
	Carregamento	Descarregamento	Carregamento	Descarregamento
1	11,59 ± 0,42	32,46 ± 2,22	15,60 ± 1,21	62,65 ± 6,12
2	9,04 ± 2,05	19,25 ± 1,32	13,66 ± 2,18	19,58 ± 3,68
3	5,72 ± 0,34	6,28 ± 0,27	8,61 ± 0,73	8,43 ± 0,84
4	5,68 ± 0,36	5,96 ± 0,47	6,52 ± 0,96	6,35 ± 1,03
5	7,83 ± 0,85	7,79 ± 0,47	4,56 ± 1,25	4,48 ± 1,33
6	2,94 ± 0,33	3,22 ± 0,17	2,99 ± 0,36	2,96 ± 0,23
7	1,84 ± 0,28	2,40 ± 0,45	1,76 ± 1,55	1,52 ± 0,32

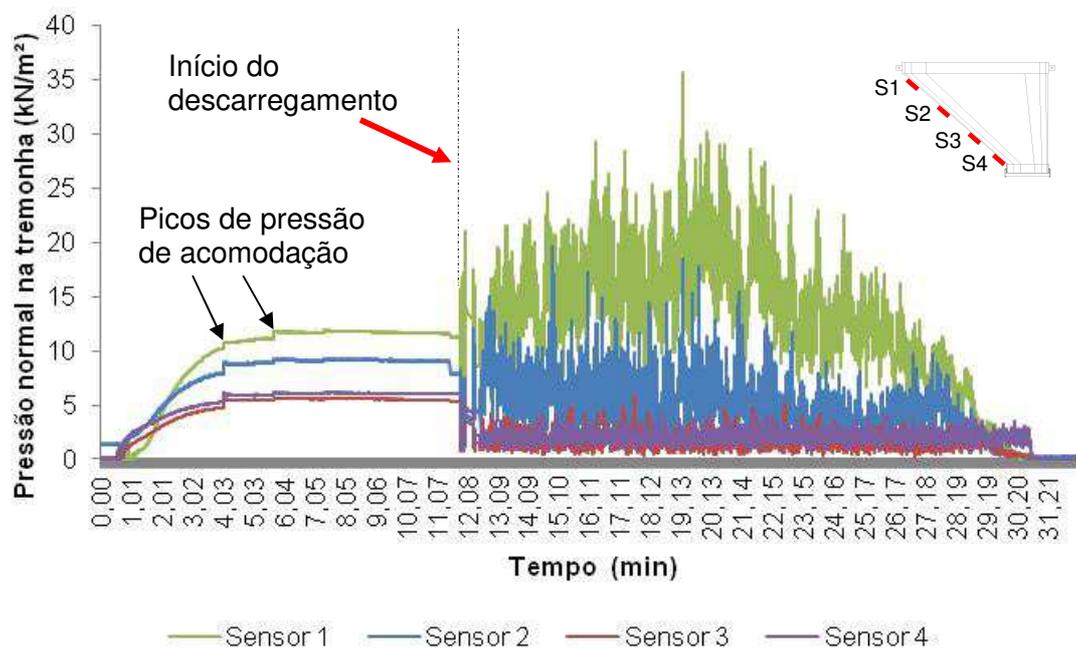
Fonte: Do autor (2020).

Quando se comparam apenas as pressões dinâmicas das paredes ondulada e lisa, têm-se valores superiores com a lisa, já que esta conformação oferece menor resistência ao fluxo da massa dos grãos e, por conseguinte, maiores pressões normais na tremonha.

Para melhor visualização desse comportamento das pressões descrito para a tremonha de 30° excêntrica, são mostradas as pressões normais na parede inclinada e vertical em gráficos separados (Figura 98 a Figura 101). As maiores pressões normais na parede inclinada da tremonha, desde o início carregamento até o completo esvaziamento do silo, se localizam próximas à região de transição (“Sensor 1”). Esses valores decrescem à medida que se aproximam da boca de descarga (“Sensor 4”), conforme se observam nas Figura 98 e Figura 100.

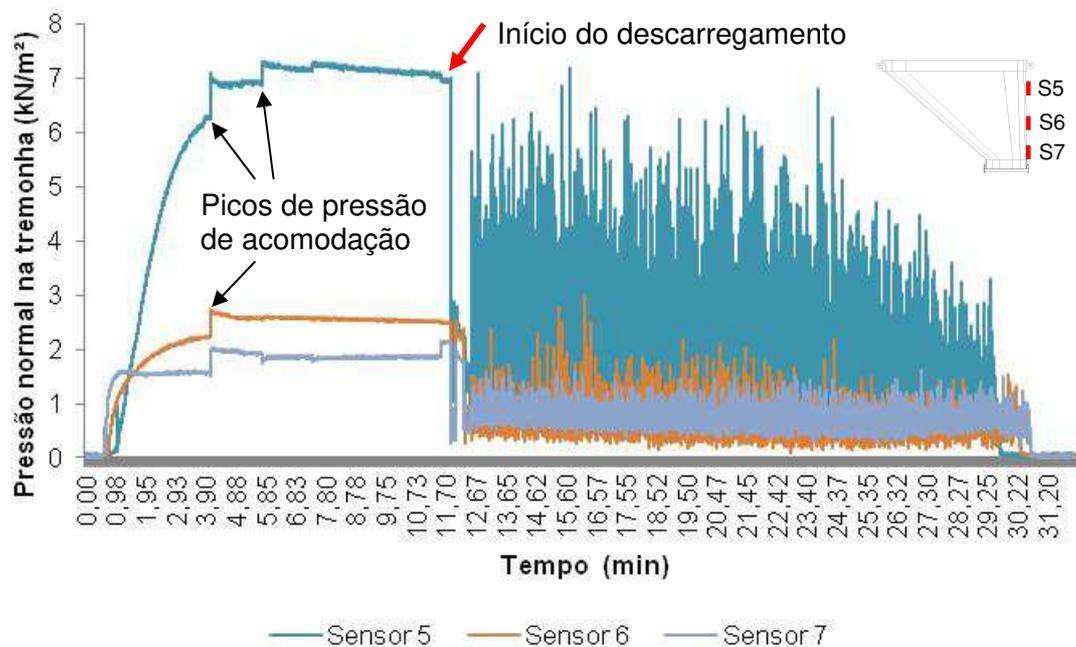
Tal como discutido a respeito da Tabela 18, porém, aqui demonstrado graficamente e durante todo o processo dos ensaios no silo, as pressões normais na parede vertical da tremonha não são consideravelmente dependentes da condição estática ou dinâmica. Embora se registrem grandes quedas nas pressões normais nessa parede da tremonha após o início da descarga (Figura 99 e Figura 101), a natureza do carregamento dinâmico faz com que haja sobrepressões instantâneas durante o descarregamento, sendo registrados pelos sensores valores próximos aos máximos obtidos na condição estática.

Figura 98 - Valores medidos pelas células de pressão na “Vista A” da tremonha de 30° excêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 99 - Valores medidos pelas células de pressão na “Vista B” da tremonha de 30° excêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 100 - Valores medidos pelas células de pressão na “Vista A” da tremonha de 30° excêntrica, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.

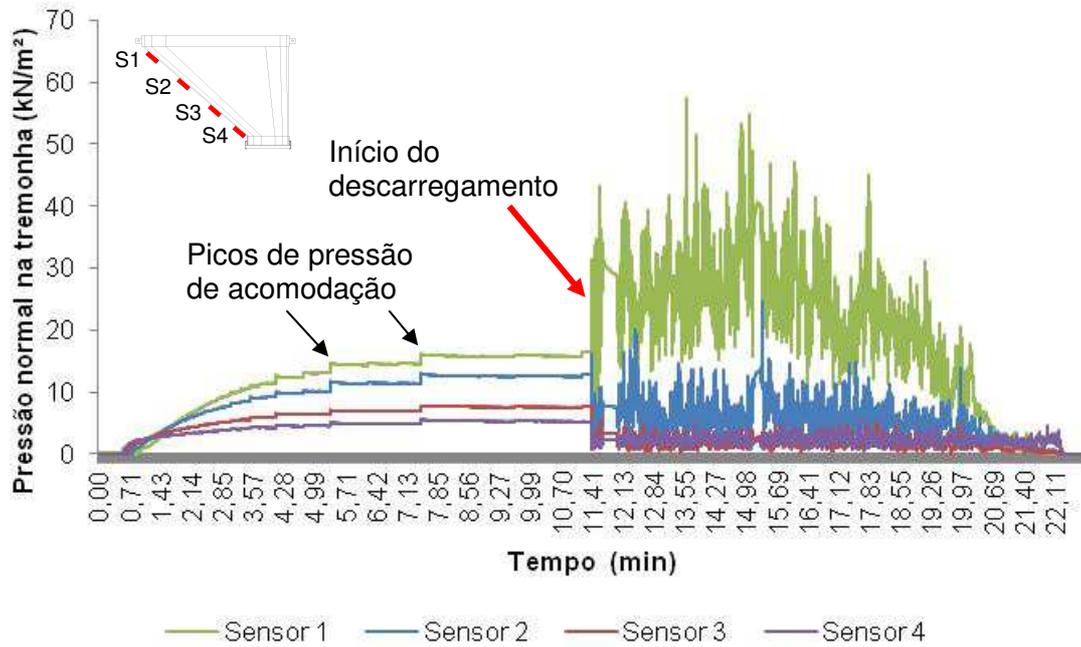
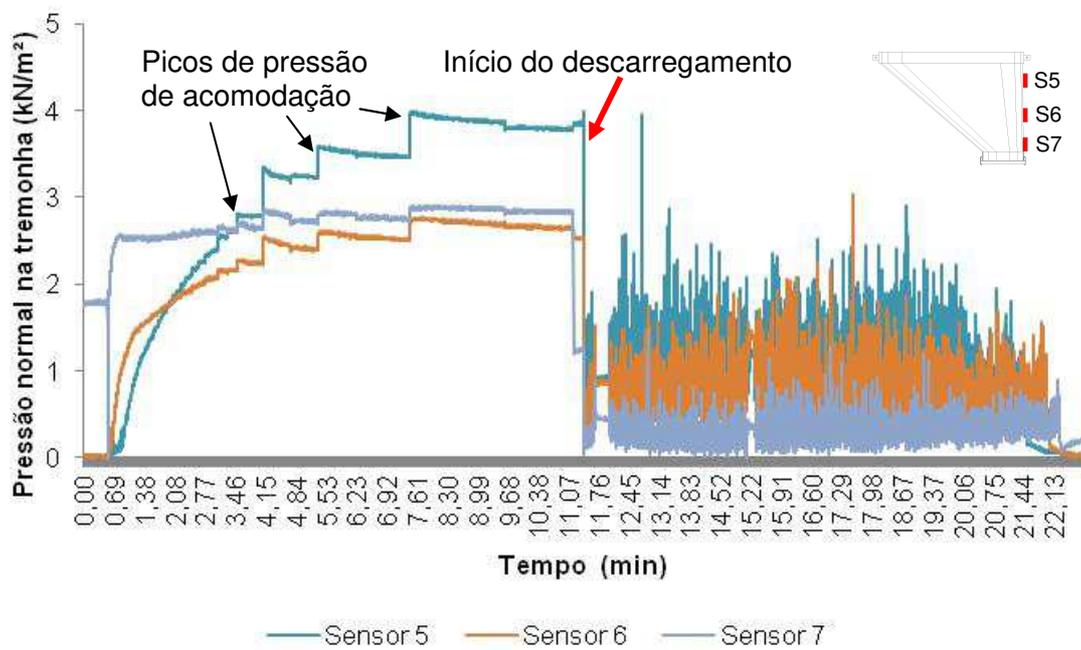


Figura 101 - Valores medidos pelas células de pressão na “Vista B” da tremonha de 30° excêntrica, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



5.5.7. Tremonha com inclinação $\alpha=15^\circ$ concêntrica

Na Tabela 19 constam as médias dos valores de pressão normal obtidos nos ensaios para a tremonha apresentada na Figura 66, considerando as condições estática e dinâmica e a geometria da parede do corpo do silo (parede lisa e ondulada). Pode-se destacar que, no carregamento do silo, as pressões normais não apresentam uma clara tendência de acréscimo ou decréscimo de valores com a altura da tremonha. Entretanto, no descarregamento do silo, o valor das pressões são significativamente superiores próximas à região de transição, decaindo à medida que se aproximam da boca de descarga da estrutura.

Tabela 19 – Pressão normal na tremonha de 15° concêntrica, com desvio padrão.

Célula de pressão (sensor)	Pressão normal à tremonha (kN.m^{-2})			
	Silo com parede ondulada		Silo com parede lisa	
	Carregamento	Descarregamento	Carregamento	Descarregamento
1	$3,73 \pm 0,78$	$41,00 \pm 9,85$	$8,40 \pm 1,05$	$59,23 \pm 7,70$
2	$1,95 \pm 0,33$	$16,99 \pm 1,17$	$6,39 \pm 0,54$	$33,83 \pm 3,63$
3	$3,08 \pm 0,36$	$11,45 \pm 0,13$	$3,23 \pm 0,52$	$9,44 \pm 1,16$
4	$4,06 \pm 0,42$	$9,30 \pm 0,74$	$4,89 \pm 0,59$	$7,46 \pm 0,87$

Fonte: Do autor (2020).

Além disso, também para essa tremonha, as pressões normais com a parede lisa no silo foram superiores às aferidas com a parede rugosa.

Todo esse comportamento das pressões normais descrito anteriormente pode ser graficamente observado através das Figura 102 e Figura 103. Nestas, estão destacados o início do descarregamento do silo, com o aumento das pressões normais na tremonha através dos sucessivos de picos de pressão. Na fase de carregamento do silo também se observam picos de pressão, mas devidos à acomodação da massa de grãos.

Figura 102 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 15° concêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.

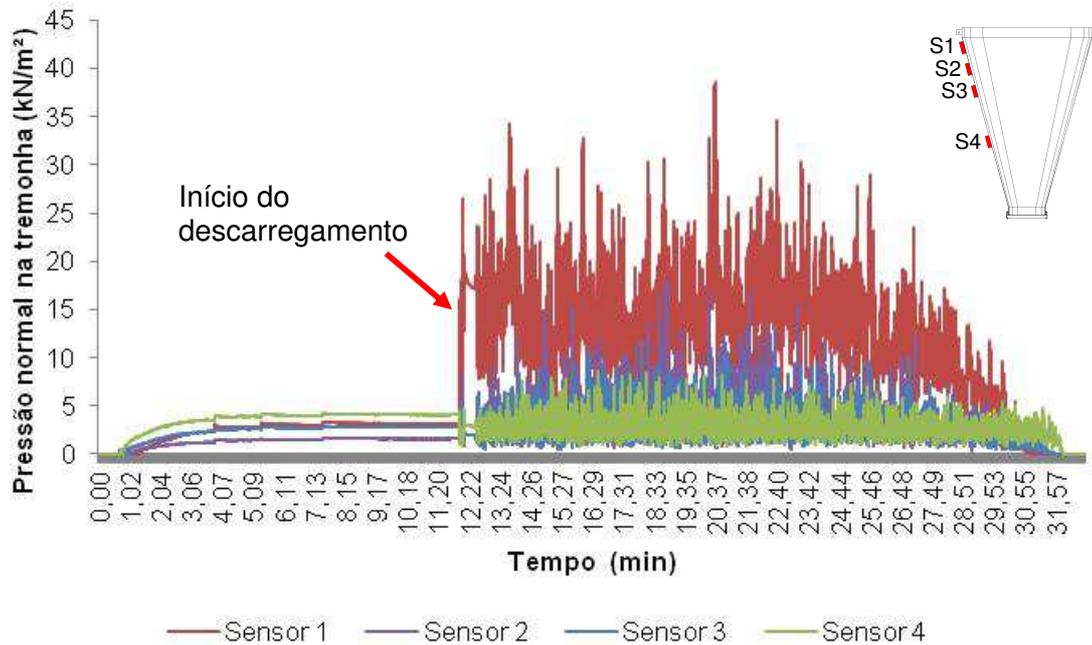
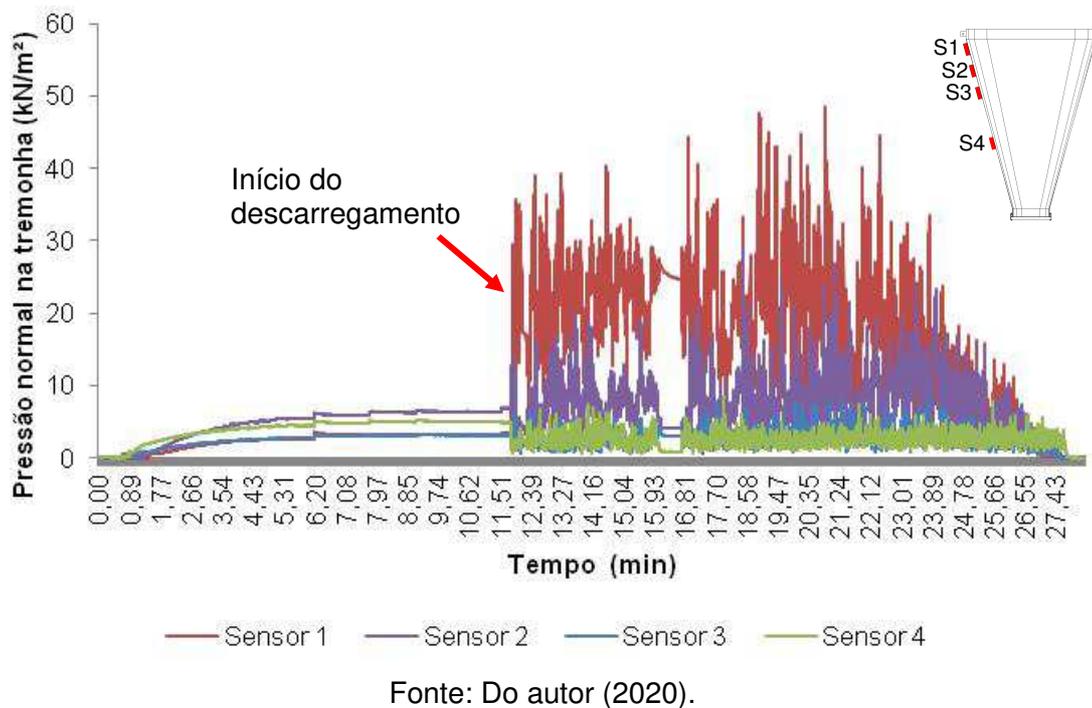


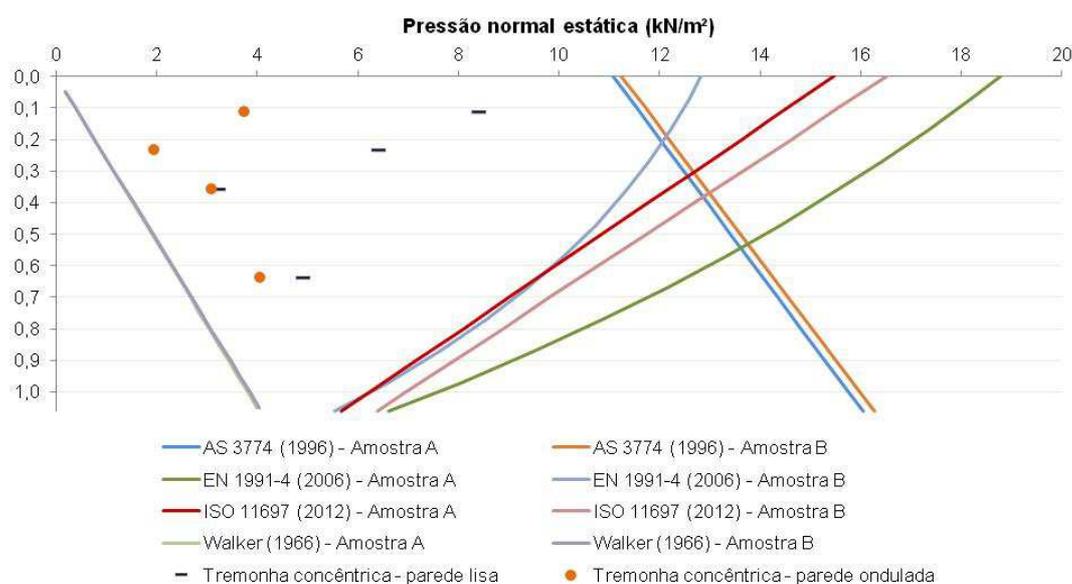
Figura 103 - Valores medidos pelas células de pressão da tremonha de 15° concêntrica, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



Na condição estática, as pressões normais na tremonha não apresentaram tendência definida de queda ou acréscimo de valores ao longo da altura da tremonha,

conforme já comentado. Por esta razão, quando se comparam os resultados empíricos com os valores normativos e teórico também não se pode inferir sobre qualquer tendência de seguirem umas das curvas da Figura 104. Ademais, os resultados experimentais apontam resultados consideravelmente inferiores aos das normas, com exceção daqueles calculados pelo método de Walker (1966), conforme observa com maiores detalhes na Tabela 20.

Figura 104 - Pressões normais experimentais, normativas e teóricas na tremonha de 15° concêntrica, na condição de carregamento.



Fonte: Do autor (2020).

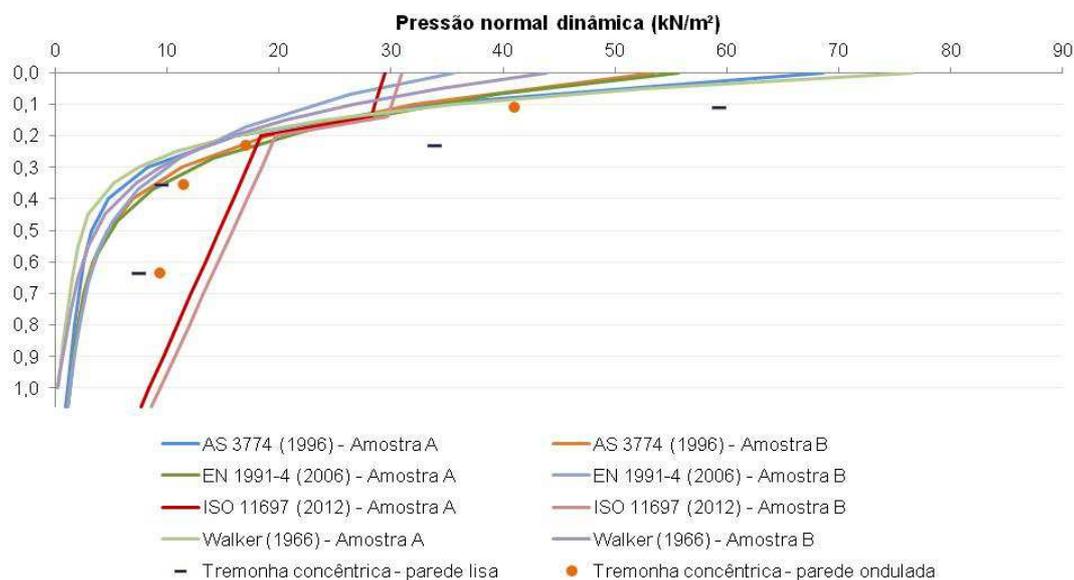
Tabela 20 - Valores de pressão normal estática na tremonha de 15° concêntrica, calculados pelas normas estrangeiras e teoria, nas mesmas posições das células de pressão (sensores).

Normas estrangeiras e teoria	Posição do sensor (cm)			
	11	23	35,5	63,5
	Pressão normal à tremonha (kN.m ⁻²)			
AS 3774 (1996) - Amostra A	11,540	12,009	12,947	13,884
AS 3774 (1996) - Amostra B	11,714	12,188	13,135	14,083
EN 1991-4 (2006) - Amostra A	17,340	16,423	15,450	12,139
EN 1991-4 (2006) - Amostra B	12,223	11,790	11,294	9,374
ISO 11697 (2012) - Amostra A	14,197	13,629	11,780	9,932
ISO 11697 (2012) - Amostra B	15,195	14,608	12,696	10,785
Walker (1966) – Amostra A	0,3812	0,7625	1,5249	2,2874
Walker (1966) – Amostra B	0,3853	0,7705	1,5411	2,3116

Fonte: Do autor (2020).

A análise da condição dinâmica das pressões normais utilizando a tremonha de 15° concêntrica (Figura 105) apresenta os resultados empíricos com a mesma tendência das curvas de pressões normativas, com exceção da norma ISO 11697 (2012). Embora tenham a mesma tendência das curvas, esses valores obtidos foram superiores aos preconizados pelas normas estrangeiras e teoria de Walker (1966), principalmente no caso com a parede lisa do silo. Tais valores podem ser comparados através das Tabela 19 e Tabela 21, as quais apresentam os valores de pressão normal nas mesmas posições da tremonha.

Figura 105 - Pressões normais experimentais, normativas e teóricas na tremonha de 15° concêntrica, na condição de descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

Tabela 21 - Valores de pressão normal dinâmica na tremonha de 15° concêntrica, calculados pelas normas estrangeiras e teoria, nas mesmas posições das células de pressão (sensores).

Normas estrangeiras e teoria	Posição do sensor (cm)			
	11	23	35,5	63,5
	Pressão normal à tremonha (kN.m ⁻²)			
AS 3774 (1996) - Amostra A	33,208	16,099	4,777	2,542
AS 3774 (1996) - Amostra B	31,963	18,936	6,997	3,307
EN 1991-4 (2006) - Amostra A	23,628	14,161	8,645	2,815
EN 1991-4 (2006) - Amostra B	17,016	11,080	7,382	2,885
ISO 11697 (2012) - Amostra A	28,196	18,399	15,903	13,408
ISO 11697 (2012) - Amostra B	29,672	19,720	17,140	14,559
Walker (1966) - Amostra A	0,3696	0,7392	1,5057	2,9697
Walker (1966) - Amostra B	0,4581	0,9196	2,0083	4,4529

Fonte: Do autor (2020).

Gallego, Ruiz e Aguado (2015) avaliaram as pressões laterais exercidas pelo material armazenado em um silo de forma empírica e numérica, pelo método dos elementos finitos. No referido trabalho verificaram que as previsões feitas pela norma EN 1991-4 (2006) correspondem muito bem aos resultados experimentais e numéricos do processo de enchimento. Estes resultados diferem consideravelmente dos valores de pressão normal empíricos obtidos com o silo piloto no presente trabalho, para todas as tremonhas avaliadas. Neste caso, os resultados experimentais foram inferiores aos preconizados pela norma mencionada. Entretanto, os autores citam que a EN 1991-4 (2006) superestimou as pressões normais em toda a parede do silo para o processo de descarga, assim como obtido nos experimentos com as tremonhas plana, de 60° e 45° concêntricas. Para as tremonhas de 30° e 15° concêntricas, as pressões normais dinâmicas foram superiores àquelas previstas pela norma, notadamente nos ensaios com a parede lisa.

5.5.8. Tremonha com inclinação $\alpha=15^\circ$ excêntrica

Na Tabela 22 estão listadas as médias das pressões normais na tremonha, com seus respectivos desvios padrões, para as condições estática e dinâmica e com paredes lisa e ondulada constituindo o corpo do silo.

Tabela 22 – Pressão normal na tremonha de 15° excêntrica, com desvio padrão.

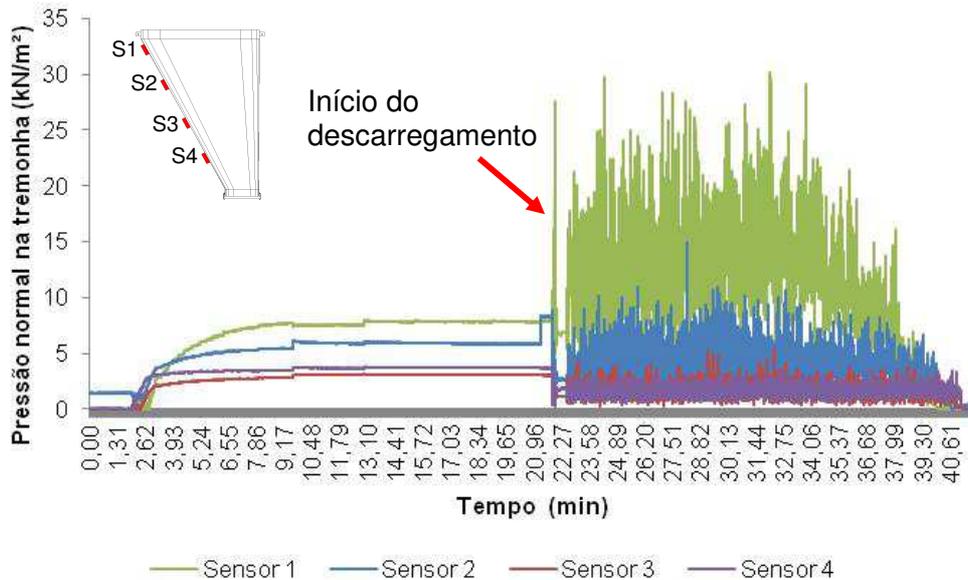
Célula de pressão (sensor)	Pressão normal à tremonha (kN.m ²)			
	Silo com parede ondulada		Silo com parede lisa	
	Carregamento	Descarregamento	Carregamento	Descarregamento
1	9,75 ± 1,93	33,18 ± 3,17	13,28 ± 1,14	59,56 ± 4,14
2	5,63 ± 0,66	14,59 ± 1,47	8,46 ± 0,34	10,11 ± 1,26
3	3,44 ± 0,20	5,41 ± 0,29	6,96 ± 0,92	6,95 ± 1,13
4	3,59 ± 0,47	3,96 ± 0,13	3,78 ± 0,54	3,93 ± 0,31
5	7,56 ± 0,77	14,05 ± 1,08	3,44 ± 0,34	5,71 ± 0,77
6	3,08 ± 0,52	4,40 ± 0,69	3,72 ± 0,48	3,69 ± 0,32
7	2,43 ± 0,41	2,72 ± 0,43	3,17 ± 0,42	2,63 ± 1,17

Fonte: Do autor (2020).

As maiores pressões normais foram registradas próximas à transição da tremonha e na parede inclinada desta (lado oposto à excentricidade), tanto na condição estática, quanto dinâmica. Entretanto, essas pressões são consideravelmente maiores com o silo com paredes lisas (a pressão normal na transição cerca de 1,8 vezes maior quando utilizada a parede lisa, em comparação

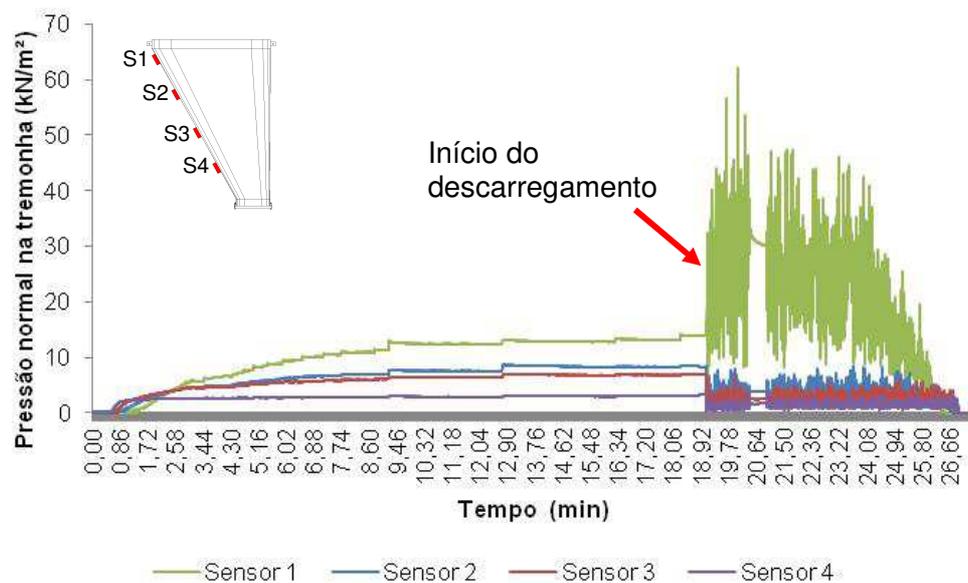
com a parede ondulada). O experimento com a parede lisa apresentou mais picos de pressão devidos à acomodação do produto (durante o carregamento) do que aquele realizado com a parede ondulada. Nas Figura 106 e Figura 107 tem-se demonstrado graficamente esse descrito comportamento estrutural.

Figura 106 - Valores medidos pelas células de pressão na “Vista A” da tremonha de 15° excêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

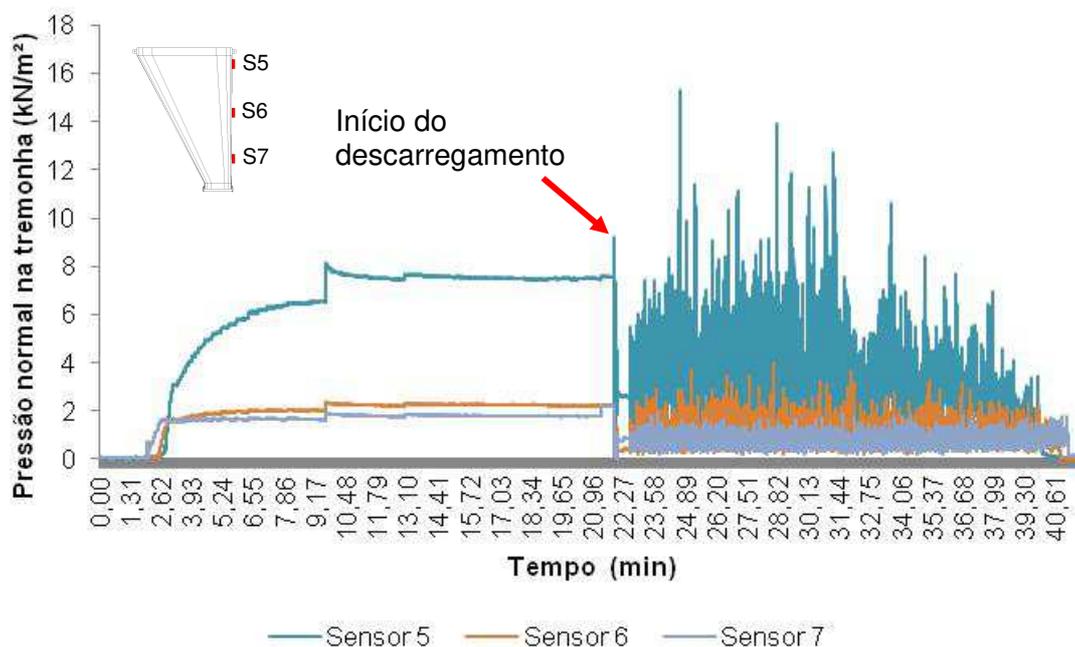
Figura 107 - Valores medidos pelas células de pressão na “Vista A” da tremonha de 15° excêntrica, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

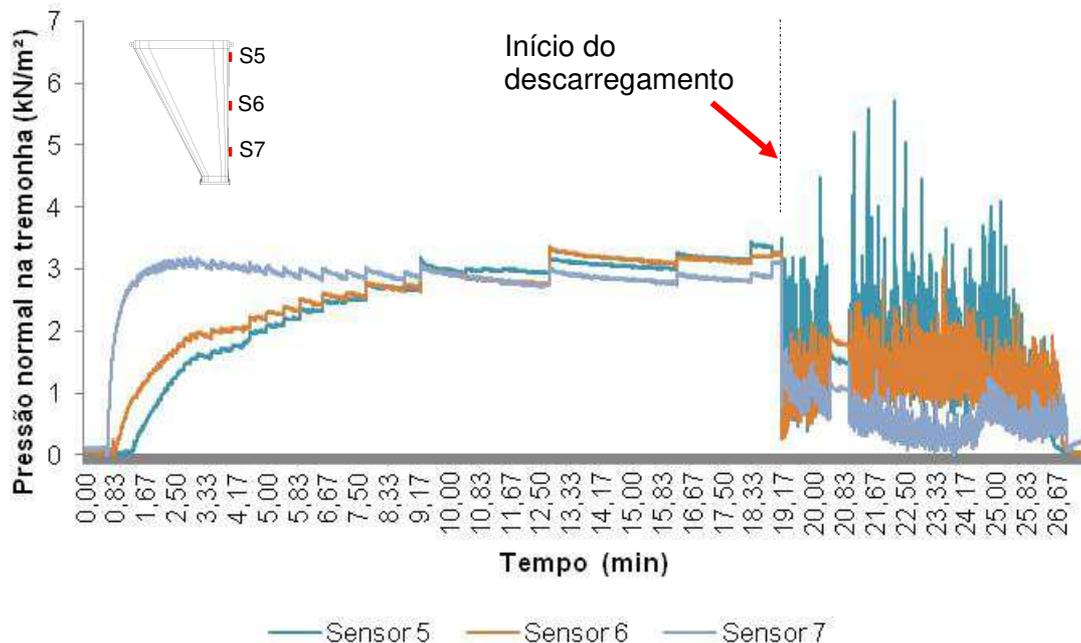
Na face vertical da tremonha (próxima à excentricidade), as maiores pressões normais também se encontram próximas à região de transição, porém, os maiores valores foram obtidos com o silo com paredes onduladas, conforme Figura 108 e Figura 109. Todavia, próximo à boca de descarga, a pressão normal para todas as configurações (condição estática e dinâmica, parede lisa ou rugosa) podem ser consideradas numericamente iguais, considerando seus desvios padrões.

Figura 108 - Valores medidos pelas células de pressão na “Vista B” da tremonha de 15° excêntrica, no silo com parede ondulada, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 109 - Valores medidos pelas células de pressão na “Vista B” da tremonha de 15° excêntrica, no silo com parede lisa, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

Madrona e Carlito Calil (2009) estudando as pressões em silos via método dos elementos finitos, também obtiveram resultados inferiores nas tremonhas cônicas concêntricas e excêntricas em comparação com as normas internacionais. Os pesquisadores explicaram que isto se deve ao fato de que as expressões adotadas pelas normas não satisfazem o equilíbrio real das cargas aplicadas na estrutura. Ainda, corroborando com os resultados apresentados nesta tese, verificaram que em silos com tremonhas excêntricas as pressões estáticas são maiores no lado oposto à excentricidade e menores no lado próximo.

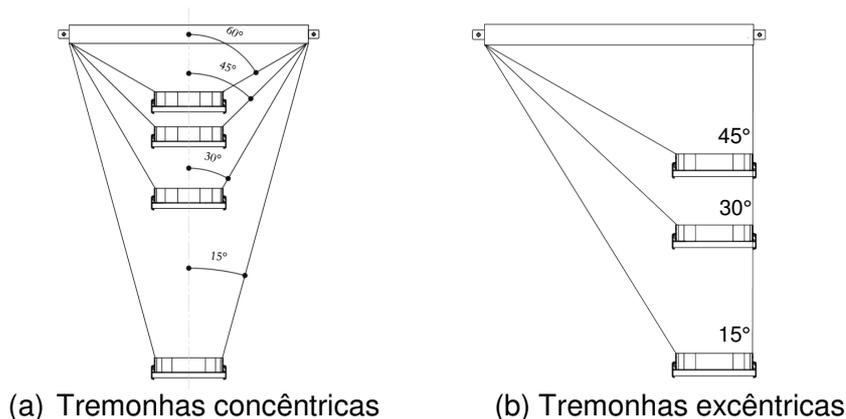
Ramírez, Nielsen e Ayuga (2010) relataram a ocorrência de cargas não simétricas nos silos de trigo e milho com funis cônicos de diferentes excentricidades, assim como as apresentadas nas tremonhas de 30° e 45° concêntricas e em todas as excêntricas do presente trabalho. Os pesquisadores alertam sobre as cargas em silos com geometrias diferenciadas ainda não totalmente cobertas pela norma EN 1991-4 (2006) e sobre a importância de experimentos em instalações de silo de teste com descarga ou carregamento excêntrica.

5.6. Diferenças de pressões entre tremonhas

Procura-se, neste item, focar apenas na influência que as geometrias das tremonhas têm nos esforços normais que nela ocorrem, apresentando as curvas de

tendência aproximadas aos pontos medidos nos ensaios com o maior coeficiente de correlação possível (preferencialmente com o valor de $R^2 \approx 1$). Desta forma, comparam-se, em um mesmo gráfico, as quatro tremonhas de paredes inclinadas concêntricas ou as outras três tremonhas excêntricas (Figura 110), discriminando as situações de carregamento e descarregamento do silo piloto.

Figura 110 – Tremonhas concêntricas e excêntricas sobrepostas para comparação das pressões normais



(a) Tremonhas concêntricas

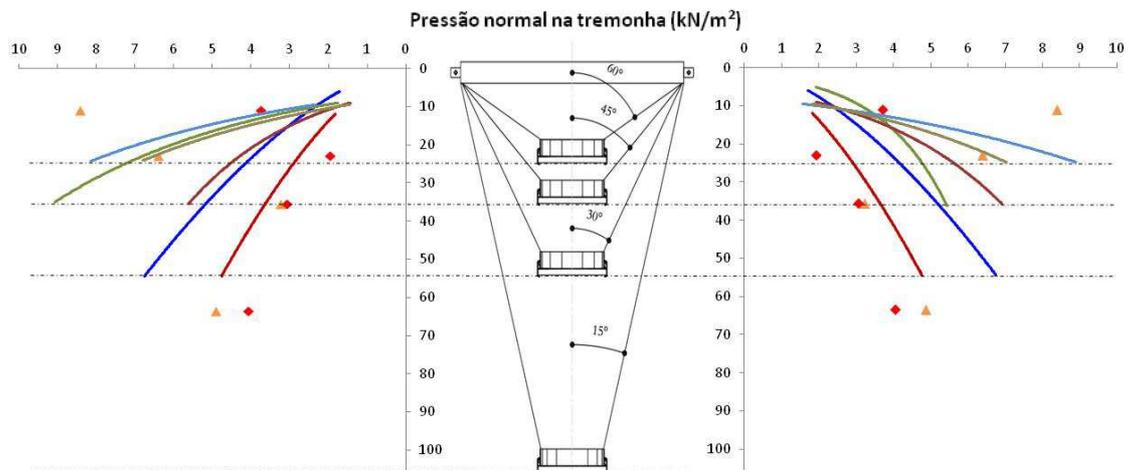
(b) Tremonhas excêntricas

Fonte: Do autor (2020).

Observa-se, na Figura 111, que o comportamento das curvas de tendência das pressões normais nas tremonhas demonstra que, no enchimento do silo, as maiores pressões ocorrem perto da boca de descarga da estrutura (análogo ao proposto pela norma australiana AS 3774:1996, mas oposto ao preconizado pelas normas ISO 11697:2012 e EN 1991-4:2006). Esta orientação dos esforços se aplica às tremonhas de 60°, 45° e 30°. No entanto, por conta dos resultados obtidos nos sensores para a tremonha de 15° de inclinação, não foi possível definir uma curva de tendência com coeficiente de correlação conveniente. Nesta tremonha não se observou, nos estudos desenvolvidos neste trabalho, uma possibilidade de se prever a variação das pressões normais estáticas com a altura da tremonha, seja de incremento ou decréscimo de seu valor. Também se faz notar a expressiva influência da rugosidade da parede do silo, sendo que com a parede lisa as pressões normais se sobressaíram às obtidas com paredes onduladas.

Na Tabela 23 são apresentadas as equações das curvas de tendência mostradas na Figura 111, considerando as tremonhas concêntricas de 15°, 30°, 45° e 60° na condição de carregamento do silo. Os respectivos coeficientes de correlação são iguais ou muito próximos da unidade, validando a adequação da adoção das curvas para descreverem o comportamento das pressões normais em toda a altura da tremonha.

Figura 111 – Curvas de tendência das pressões normais estáticas nas tremonhas concêntricas de 15°, 30°, 45° e 60° de inclinação com a vertical.



Legenda:

- ▲ $\alpha=15^\circ$ / parede lisa
- ◆ $\alpha=15^\circ$ / parede ondulada
- $\alpha=30^\circ$ / parede lisa
- $\alpha=30^\circ$ / parede ondulada
- $\alpha=45^\circ$ / parede lisa
- $\alpha=45^\circ$ / parede ondulada
- $\alpha=60^\circ$ / parede lisa
- $\alpha=60^\circ$ / parede ondulada

Eixo vertical: altura da tremonha (cm).

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 23 – Equações das curvas de tendência das pressões normais estáticas em função da altura da tremonha, para as tremonhas concêntricas.

Inclinação da tremonha	Lado da tremonha	Equação da curva	Coefficiente de correlação (R^2)
$\alpha=30^\circ$ / parede lisa	Esquerdo	$y = 2,5388x^{1,6047}$	0,986
	Direito	$y = 2,5388x^{1,6047}$	0,986
$\alpha=30^\circ$ / parede ondulada	Esquerdo	$y = 4,611x^{1,5811}$	1
	Direito	$y = 4,611x^{1,5811}$	1
$\alpha=45^\circ$ / parede lisa	Esquerdo	$y = 6,5056e^{0,1855x}$	1
	Direito	$y = 1,7679e^{0,5554x}$	1
$\alpha=45^\circ$ / parede ondulada	Esquerdo	$y = 5,6084e^{0,3284x}$	1
	Direito	$y = 5,3171e^{0,2756x}$	1
$\alpha=60^\circ$ / parede lisa	Esquerdo	$y = 6,5081e^{0,1616x}$	1
	Direito	$y = 7,757e^{0,1308x}$	1
$\alpha=60^\circ$ / parede ondulada	Esquerdo	$y = 7,3607e^{0,1748x}$	1
	Direito	$y = 6,7749e^{0,1847x}$	1

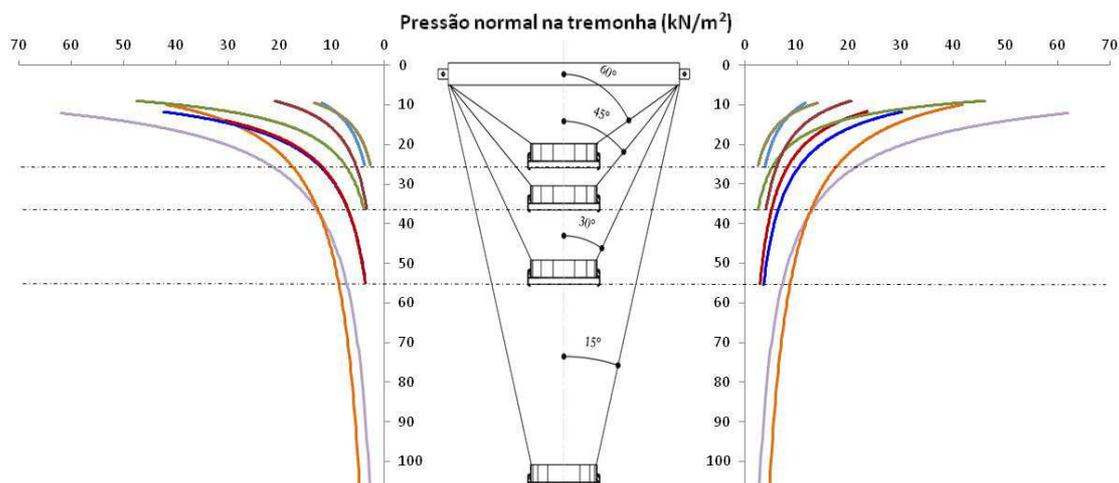
Onde y é a altura da tremonha (m) e x corresponde à pressão normal na tremonha, em kN.m^{-2} .

Fonte: Do autor (2020).

Já as pressões normais dinâmicas nas quatro tremonhas inclinadas e concêntricas analisadas foram máximas próximas à região de transição com o corpo do silo, tendendo a uma grande redução à medida que se aproxima da boca de saída (Figura 112), cujas equações e respectivos coeficientes de correlação se encontram na Tabela 24. Assim como para as curvas de pressões normais estáticas, também para as dinâmicas os coeficientes foram próximos de um, fazendo-se confiáveis as curvas obtidas para representar esses esforços nas tremonhas.

É importante notar que a rugosidade da parede, no entanto, foi relevante na obtenção dos esforços máximos, mas as curvas para ambas as paredes estudadas aproximam-se bastante, fora desses pontos de grande magnitude (região de transição).

Figura 112 – Curvas de tendência das pressões normais dinâmicas nas tremonhas concêntricas de 15°, 30°, 45° e 60° de inclinação com a vertical.



Legenda:

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| — $\alpha=15^\circ$ / parede lisa | — $\alpha=15^\circ$ / parede ondulada |
| — $\alpha=30^\circ$ / parede lisa | — $\alpha=30^\circ$ / parede ondulada |
| — $\alpha=45^\circ$ / parede lisa | — $\alpha=45^\circ$ / parede ondulada |
| — $\alpha=60^\circ$ / parede lisa | — $\alpha=60^\circ$ / parede ondulada |

Eixo vertical: altura da tremonha (cm).

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 24 - Equações das curvas de tendência das pressões normais dinâmicas em função da altura da tremonha, para as tremonhas concêntricas.

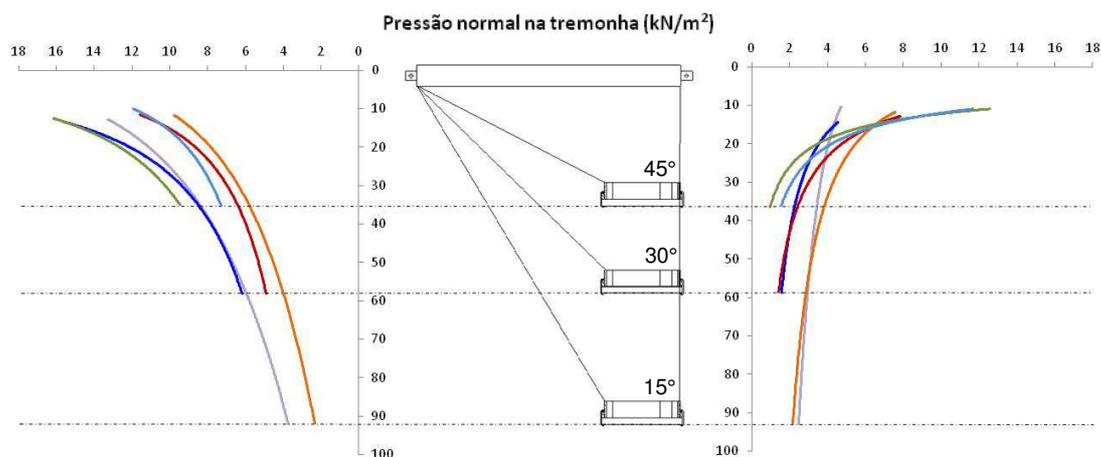
Inclinação da tremonha	Lado da tremonha	Equação da curva	Coefficiente de correlação (R ²)
$\alpha=15^\circ$ / parede lisa	Esquerdo	$y = 222,1x^{-0,705}$	0,9068
	Direito	$y = 222,1x^{-0,705}$	0,9068
$\alpha=15^\circ$ / parede ondulada	Esquerdo	$y = 589,57x^{-1,094}$	0,9434
	Direito	$y = 589,57x^{-1,094}$	0,9434
$\alpha=30^\circ$ / parede lisa	Esquerdo	$y = 123,93x^{-0,629}$	0,9864
	Direito	$y = 142,93x^{-0,733}$	0,9917
$\alpha=30^\circ$ / parede ondulada	Esquerdo	$y = 128,17x^{-0,648}$	0,8961
	Direito	$y = 124,59x^{-0,749}$	0,9588
$\alpha=45^\circ$ / parede lisa	Esquerdo	$y = 78,211x^{-0,56}$	1
	Direito	$y = 57,649x^{-0,485}$	1
$\alpha=45^\circ$ / parede ondulada	Esquerdo	$y = 92,461x^{-0,764}$	1
	Direito	$y = 124,43x^{-0,871}$	1
$\alpha=60^\circ$ / parede lisa	Esquerdo	$y = 79,237x^{-0,853}$	1
	Direito	$y = 88,753x^{-0,908}$	1
$\alpha=60^\circ$ / parede ondulada	Esquerdo	$y = 46,024x^{-0,607}$	1
	Direito	$y = 44,294x^{-0,583}$	1

Onde y é a altura da tremonha (m) e x corresponde à pressão normal na tremonha, em kN.m^{-2} .

Fonte: Do autor (2020).

Na análise das curvas traçadas a partir dos resultados empíricos com as tremonhas excêntricas (Figura 113 e Figura 114), a tendência das pressões normais também foi de redução de suas grandezas com a profundidade da tremonha, tanto no carregamento quanto no descarregamento do silo piloto. Como é previsível, a assimetria da estrutura promoveu maiores pressões no lado inclinado da tremonha (oposto à excentricidade), notadamente na situação de descarregamento. Na descarga, as pressões normais foram significativamente inferiores no lado vertical da tremonha, se comparado ao lado oposto (inclinado).

Figura 113 – Curvas de tendência das pressões normais estáticas nas tremonhas excêntricas de 15°, 30° e 45° de inclinação com a vertical.



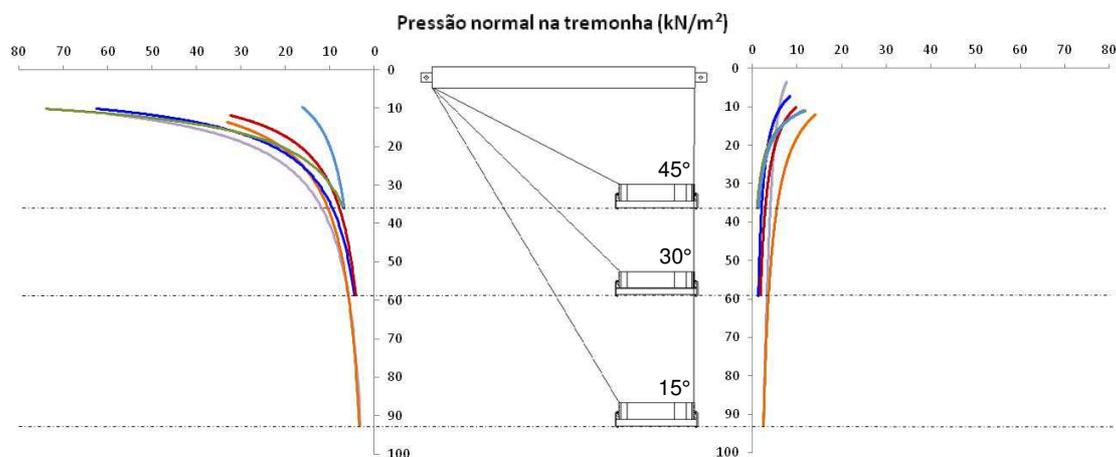
Legenda:

- $\alpha=15^\circ$ / parede lisa
- $\alpha=15^\circ$ / parede ondulada
- $\alpha=30^\circ$ / parede lisa
- $\alpha=30^\circ$ / parede ondulada
- $\alpha=45^\circ$ / parede lisa
- $\alpha=45^\circ$ / parede ondulada

Eixo vertical: altura da tremonha (cm).

Fonte: Do autor (2020).

Figura 114 – Curvas de tendência das pressões normais dinâmicas nas tremonhas excêntricas de 15°, 30° e 45° de inclinação com a vertical.



Legenda:

- $\alpha=15^\circ$ / parede lisa
- $\alpha=15^\circ$ / parede ondulada
- $\alpha=30^\circ$ / parede lisa
- $\alpha=30^\circ$ / parede ondulada
- $\alpha=45^\circ$ / parede lisa
- $\alpha=45^\circ$ / parede ondulada

Eixo vertical: altura da tremonha (cm).

Fonte: Do autor (2020).

Assim como relatado para as tremonhas concêntricas, a influência da geometria da parede do corpo do silo foi primordial na obtenção dos esforços máximos também para as excêntricas. Durante o carregamento, as pressões máximas na região de transição, no lado oposto à excentricidade, foram superiores com a parede lisa. Na

mesma condição, porém no lado oposto (próximo à excentricidade), o silo com paredes lisas apresentou menores pressões normais na tremonha do que com a parede ondulada. As pressões dinâmicas no lado vertical da tremonha, fora da região de transição, praticamente não são distintas quando se avalia a rugosidade da parede, pois as curvas se sobrepõem quando se afastam da transição. Por sua vez, na região diametralmente oposta, as pressões máximas foram obtidas com a parede lisa, sendo consideravelmente superiores às obtidas com a parede ondulada no corpo do silo piloto.

Nas Tabela 25 e Tabela 26 estão expressas as equações das curvas de tendência mostradas nas Figura 113 e Figura 114 e os seus respectivos coeficientes de correlação.

Tabela 25 – Equações das curvas de tendência das pressões normais estáticas em função da altura da tremonha, para as tremonhas excêntricas.

Inclinação da tremonha	Lado da tremonha	Equação da curva	Coefficiente de correlação (R ²)
α=15° / parede lisa	Esquerdo	$y = 198,85e^{-0,207x}$	0,9693
	Direito	$y = 1046,9e^{-0,978x}$	0,736
α=15° / parede ondulada	Esquerdo	$y = 175,35e^{-0,277x}$	0,9641
	Direito	$y = 332,33x^{-1,65}$	0,9946
α=30° / parede lisa	Esquerdo	$y = 1028,4x^{-1,579}$	0,8576
	Direito	$y = 107,1x^{-1,324}$	0,9439
α=30° / parede ondulada	Esquerdo	$y = 1145,7x^{-1,877}$	0,9185
	Direito	$y = 79,347x^{-0,882}$	0,9992
α=45° / parede lisa	Esquerdo	$y = 2629x^{-1,922}$	0,7846
	Direito	$y = 35,908x^{-0,467}$	1
α=45° / parede ondulada	Esquerdo	$y = 5432,4x^{-2,538}$	1
	Direito	$y = 46,838x^{-0,59}$	1

Onde y é a altura da tremonha (m) e x corresponde à pressão normal na tremonha, em kN.m⁻².

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 26 – Equações das curvas de tendência das pressões normais dinâmicas em função da altura da tremonha, para as tremonhas excêntricas.

Inclinação da tremonha	Lado da tremonha	Equação da curva	Coefficiente de correlação (R ²)
α=15° / parede lisa	Esquerdo	$y = 203,77x^{-0,702}$	0,9803
	Direito	$y = 456,45e^{-0,632x}$	0,9981
α=15° / parede ondulada	Esquerdo	$y = 259,76x^{-0,842}$	0,9651
	Direito	$y = 268,4x^{-1,174}$	0,9997
α=30° / parede lisa	Esquerdo	$y = 161,82x^{-0,67}$	0,9934
	Direito	$y = 82,592x^{-1,14}$	0,9092
α=30° / parede ondulada	Esquerdo	$y = 180,91x^{-0,783}$	0,9074
	Direito	$y = 111,97x^{-1,059}$	0,9879
α=45° / parede lisa	Esquerdo	$y = 102,03x^{-0,536}$	0,9958
	Direito	$y = 37,584x^{-0,496}$	1
α=45° / parede ondulada	Esquerdo	$y = 622,07x^{-1,493}$	0,9694
	Direito	$y = 44,232x^{-0,573}$	1

Onde y é a altura da tremonha (m) e x corresponde à pressão normal na tremonha, em kN.m⁻².

Fonte: Do autor (2020).

Guaita, Couto e Ayuga (2003) avaliaram a influência da excentricidade da boca de descarga de um silo através de suas pressões normais nas paredes verticais e tremonha, por meio de uma simulação numérica baseada no método dos elementos finitos. Dos resultados, concluíram que, à medida que a excentricidade da boca de descarga aumenta, a área plastificada na região de transição (causada pelas pressões normais nessa região) se concentra gradualmente no lado oposto ao de seu deslocamento, diminuindo no mesmo lado do deslocamento, tal como descrito nos resultados dos ensaios apresentados neste trabalho com grãos de milho. No entanto, para as tremonhas com 80% e 100% de excentricidade, a área plastificada que estava próxima à transição, no lado próximo ao deslocamento da tremonha, desaparece. Isso ocorre devido à ausência de transição entre a parede reta do silo e a parede da tremonha, que é reta para uma excentricidade de 100%. Diferentemente do que se observaram nos resultados experimentais com o silo piloto (Figura 113 e Figura 114), no trabalho dos supracitados autores não há pressão de pico nessa área da tremonha.

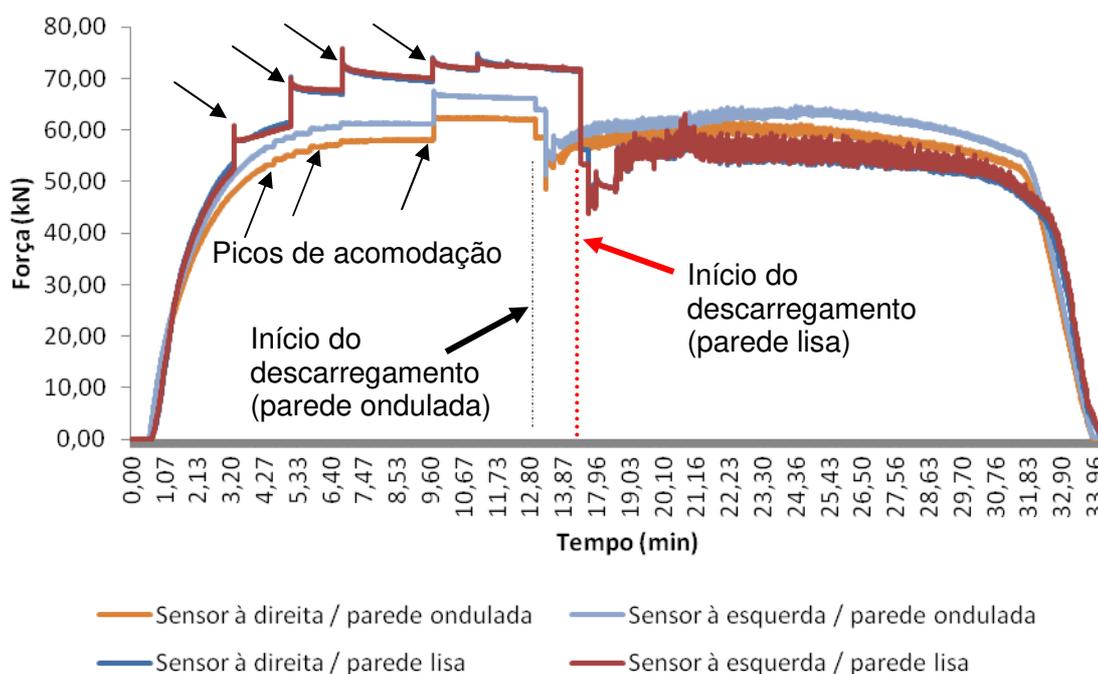
5.7. Resultados dos esforços de tração obtidos nos sensores instalados nos dispositivos de sustentação da tremonha na região de transição do silo

Neste tópico, apresentam-se os resultados registrados pelas células de carga de tração instaladas nas chapas metálicas de ligação entre as tremonhas estudadas e o corpo do silo piloto durante o carregamento e o descarregamento (sem consolidação), com paredes de aço lisa e ondulada como revestimento do corpo do silo. Portanto, são mostrados os valores medidos pelos sensores durante esses processos (escolhido um dos quatro ensaios realizados com cada tremonha) e a média dos valores máximos desses ensaios, juntamente com seus desvios padrões.

Na Figura 115 estão ilustrados os valores de força de tração nos sensores desde o início do enchimento até o completo esvaziamento do silo montado com a tremonha de fundo plano. Pode-se observar, durante o enchimento, que ocorrem picos de força causados pela acomodação dos grãos de milho dentro silo. Esta acomodação acarreta uma diminuição dos espaços entre os grãos e, conseqüentemente, aumento de seu peso específico (conforme já comentado no Item 5.5.1). Tal efeito é mais acentuado quando o silo é ensaiado com paredes lisas, já que estas apresentam menor resistência ao deslizamento dos grãos do que a geometria ondulada.

Desta forma, quanto maior a acomodação dos grãos, maiores serão as pressões exercidas pelo produto na estrutura do corpo do silo piloto e tremonhas e, conseqüente, nos seus dispositivos de sustentação.

Figura 115 - Valores de tração medidos pelas células de carga de tração com o fundo plano, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.

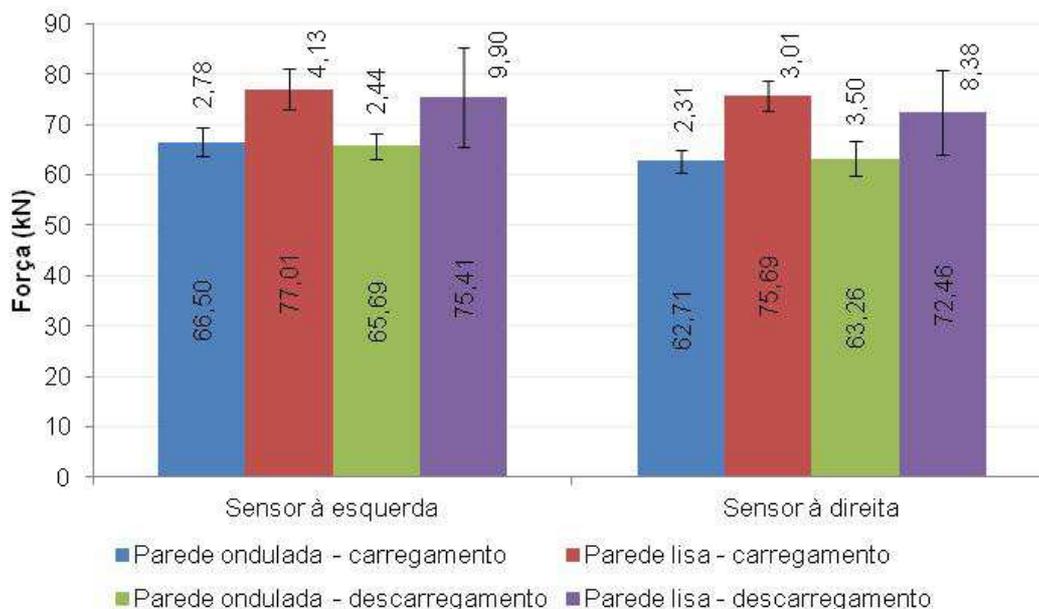


Fonte: Do autor (2020).

Percebe-se, no instante exato do início do descarregamento, uma diminuição no valor do esforço de tração nos sensores, seguida de cíclicos picos de força de tração até o completo esvaziamento do silo. No início da descarga, ocorre a passagem do estado ativo de tensões para o passivo, caracterizado pela expansão vertical localizada da massa de grãos para que haja o fluxo. Essa expansão, que ocorre dentro da tremonha, reduz o peso específico do produto e tal efeito é registrado pelos sensores. No entanto, a parcela da massa de grãos que flui pela tremonha é substituída pela queda abrupta dos grãos armazenados que se encontravam em repouso, causando novo pico de pressões e este processo se repete de forma cíclica.

Este esforço de tração medido, o qual se configura o esforço de arrancamento da tremonha, não apresentou diferenças significativas (baseadas nas médias e respectivos desvios padrões) entre o sensor da esquerda e direita da tremonha, o que é plausível considerando a concentricidade da boca de saída da tremonha de fundo plano. Também não há diferença, baseada nas médias e respectivos desvios padrões, nos valores de força de tração entre a situação de carregamento e descarregamento, visto que com este tipo de tremonha tende a ocorrer fluxo de funil no descarregamento e, desta forma, os acréscimos de esforços que ocorrem na descarga se localizam na transição efetiva (no corpo do silo), tal como mostrado na Figura 10. Portanto, somente a configuração da parede do corpo do silo causou significativa diferença nesses esforços, como pode ser observado na Figura 116.

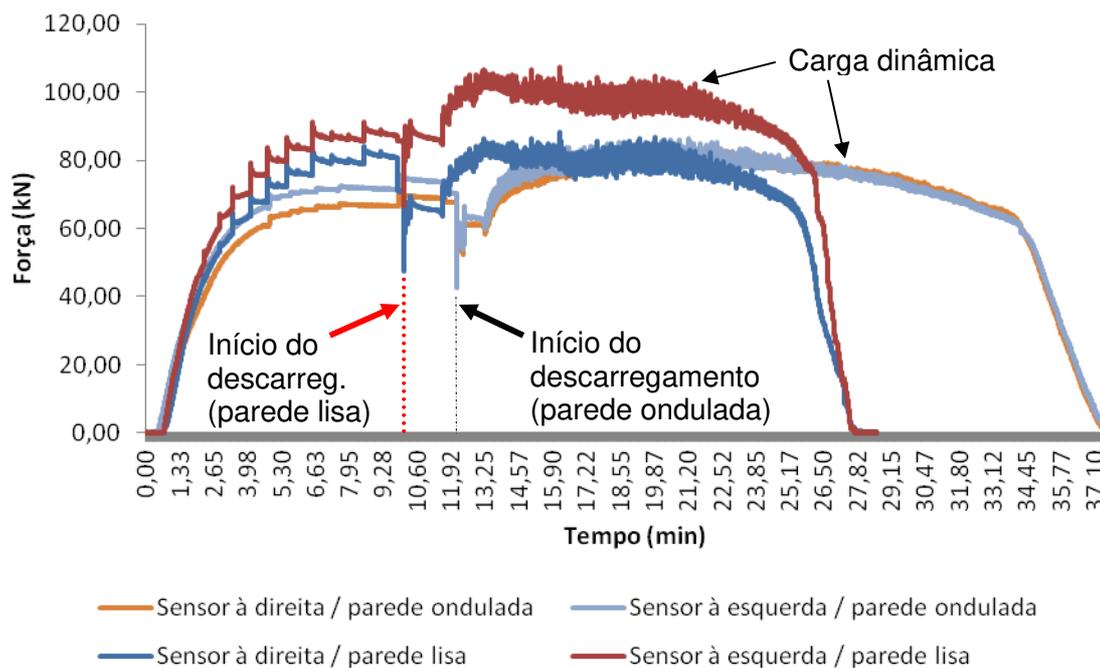
Figura 116 – Média dos valores máximos de tração medidos nos sensores de ligação da tremonha plana ao corpo do silo piloto.



Fonte: Do autor (2020).

Na avaliação dos esforços de tração com a tremonha de 60° de inclinação (Figura 117) também se observam os picos de pressão durante o carregamento do silo e a influência da rugosidade da parede nos resultados obtidos das células de carga, causando maiores valores de tração nos sensores a estrutura com menor rugosidade (parede lisa).

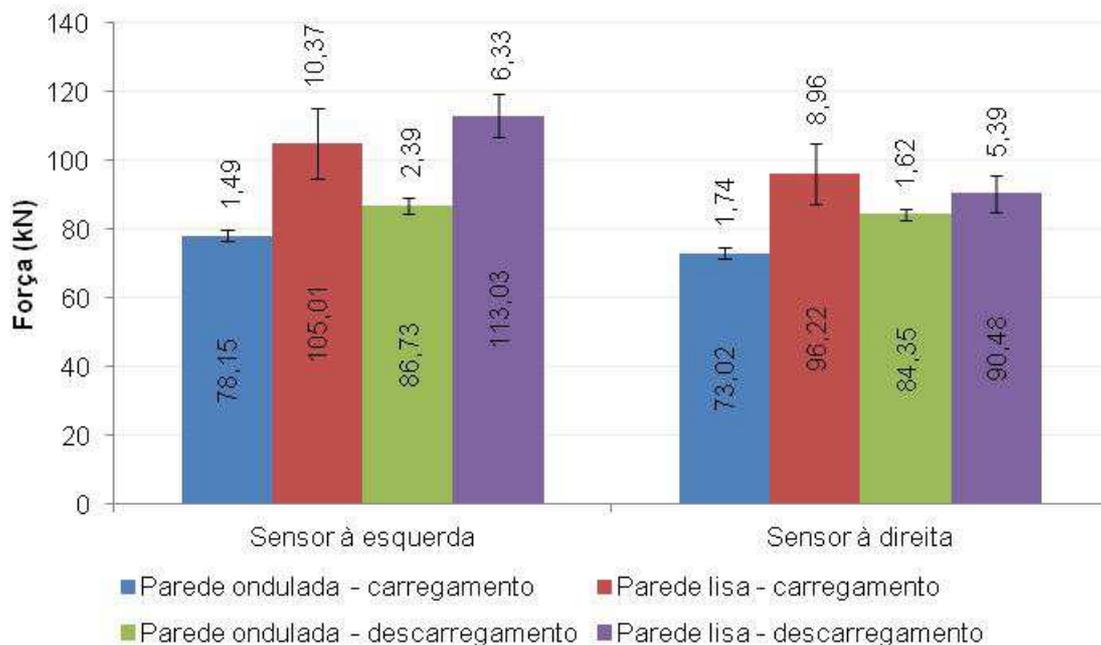
Figura 117 - Valores de tração medidos pelas células de carga de tração com a tremonha de 60°, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

Conforme apresentado na Figura 118, também para a tremonha de 60° de inclinação, os valores máximos de tração registrados nos sensores não foram dependentes do processo de enchimento ou esvaziamento do silo quando ensaiado com a parede lisa. Porém, com a parede ondulada os esforços de tração na condição dinâmica foram superiores àsquelas da condição estática. Isto demonstra a influência da rugosidade do corpo do silo no processo de armazenamento.

Figura 118 – Média dos valores máximos de tração medidos nos sensores de ligação da tremonha de 60° ao corpo do silo piloto.



Na configuração do silo com tremonha de 45° de inclinação, concêntrica e excêntrica, de acordo com os resultados de força de tração *versus* tempo de ensaio expostos nas Figura 119 e Figura 120, constata-se a nítida diferença causada pela excentricidade da boca de saída da tremonha. Os valores máximos registrados pelos sensores com a utilização da tremonha excêntrica superam aqueles da geometria concêntrica. Estes resultados também podem ser constatados nas Figura 121 e Figura 122, onde se apresentam as médias dos quatro ensaios realizados com parede lisa e ondulada, nas condições estáticas e dinâmicas. Na análise com a tremonha de 45° se observam, assim como nas análises com outras tremonhas, os picos de tensão durante o carregamento, causados pela acomodação dos grãos. Ademais, nota-se que à medida que se diminui a inclinação da tremonha, mais se evidencia a natureza de carga dinâmica que ocorre na descarga. É considerável, a partir da tremonha de 45°, o acréscimo de esforços na estrutura durante o processo de descarregamento do silo. Isto pode ser observado nos gráficos das Figura 119, Figura 120 (tremonhas de 45°); Figura 123, Figura 124 (tremonhas de 30°) e Figura 125 e

Figura 126 (tremonhas de 15°), onde se tem representada a força de tração registrada em cada sensor instalado no dispositivo de sustentação *versus* tempo.

Nas Figura 119 e Figura 120 é demonstrada a grande oscilação de força de tração causada pelo efeito da carga dinâmica na descarga do material ensilado. Vale

comentar que, no decorrer dos ensaios, essas vibrações podiam ser observadas na estrutura do silo e do edifício.

Figura 119 - Valores de tração medidos pelas células de carga de tração com a tremonha de 45° concêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.

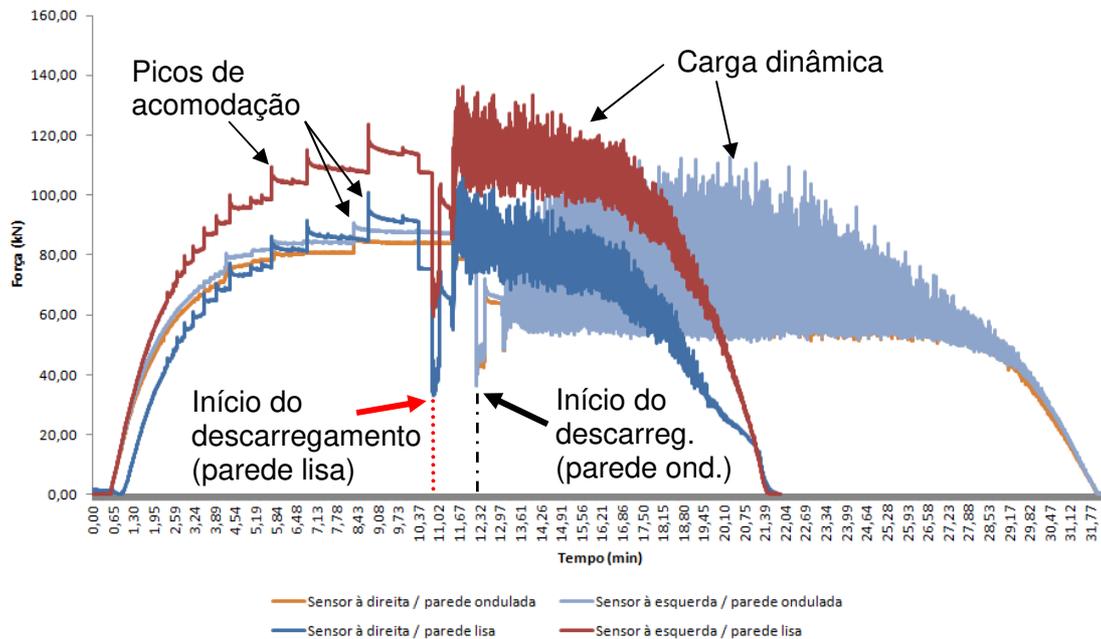
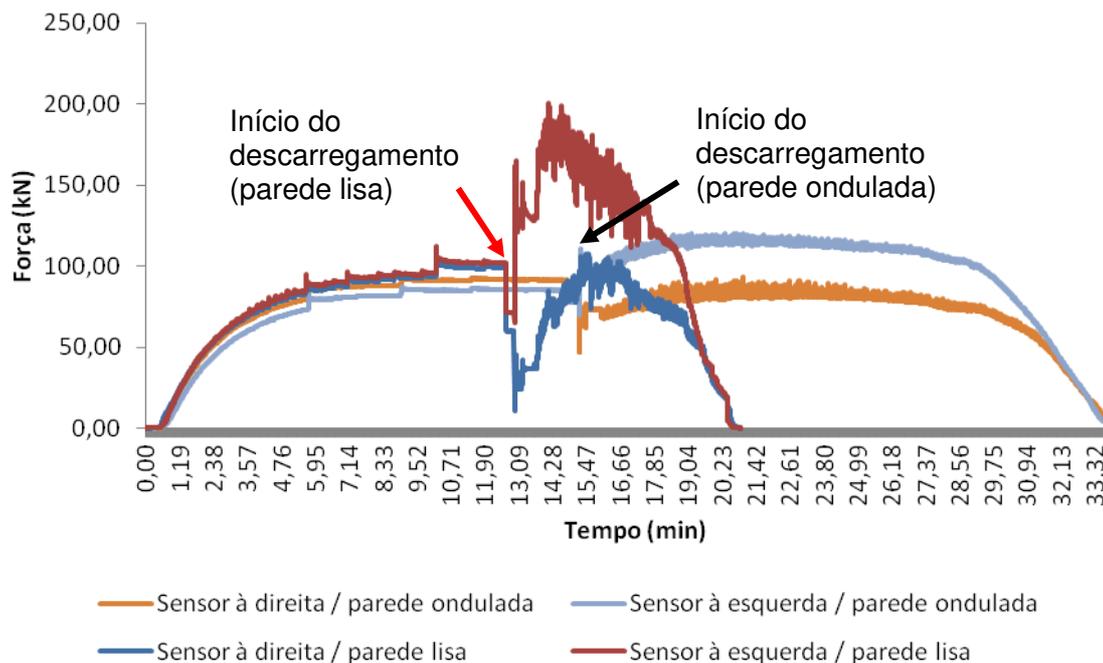


Figura 120 - Valores de tração medidos pelas células de carga de tração com a tremonha de 45° excêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



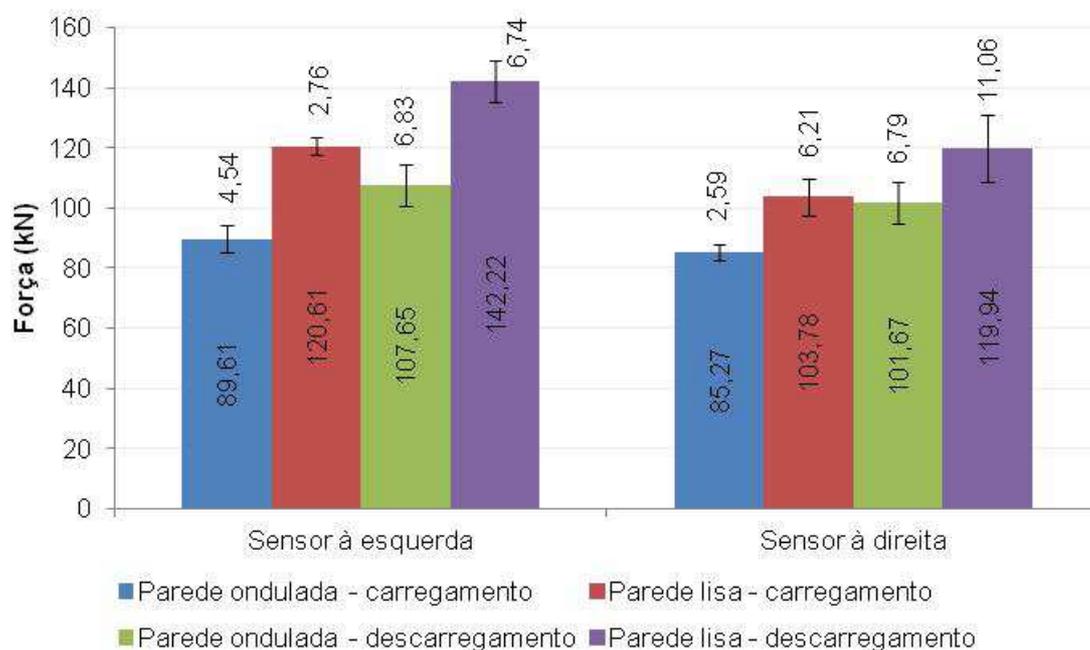
A excentricidade da boca de saída da tremonha de 45° causa o acréscimo e a assimetria de esforços de tração nos sensores em relação à tremonha concêntrica, principalmente na situação de descarregamento, como pode ser percebido nas Figura 121 e Figura 122. Sendo assim, no lado excêntrico (esquerda) da tremonha haverá maiores esforços que no lado vertical (direita). Estes resultados são coerentes, já que o lado inclinado da tremonha oferecerá maior resistência ao escoamento do produto do que o lado próximo à excentricidade e este fato conduz a maiores esforços de tração no sensores instalados nas chapas de sustentação da tremonha.

Na parede vertical da tremonha excêntrica (sensor à direita) não se observou diferença significativa para o esforço de tração no carregamento e descarregamento, para uma mesma parede do silo, conforme pode ser observado na Figura 122. Isto se deve ao fato de que na parede vertical apenas o atrito do produto com a parede colabora com o esforço de tração nesse lado da tremonha. Já na parede oposta (inclinada), além do atrito, também há consideráveis valores de pressão normal em toda a superfície e sua componente vertical, mais a pressão de atrito, são resistidas pelo dispositivo de sustentação da tremonha.

A tremonha com a inclinação de 45° já proporciona consideráveis diferenças entre carregamento e descarregamento nos esforços de arrancamento da tremonha (Figura 121 e Figura 122), se comparada com as tremonhas de 60° e de fundo plano, comentadas anteriormente. Essa situação também será observada nas tremonhas com maior altura (menor inclinação com a vertical), conforme será explanado na sequência.

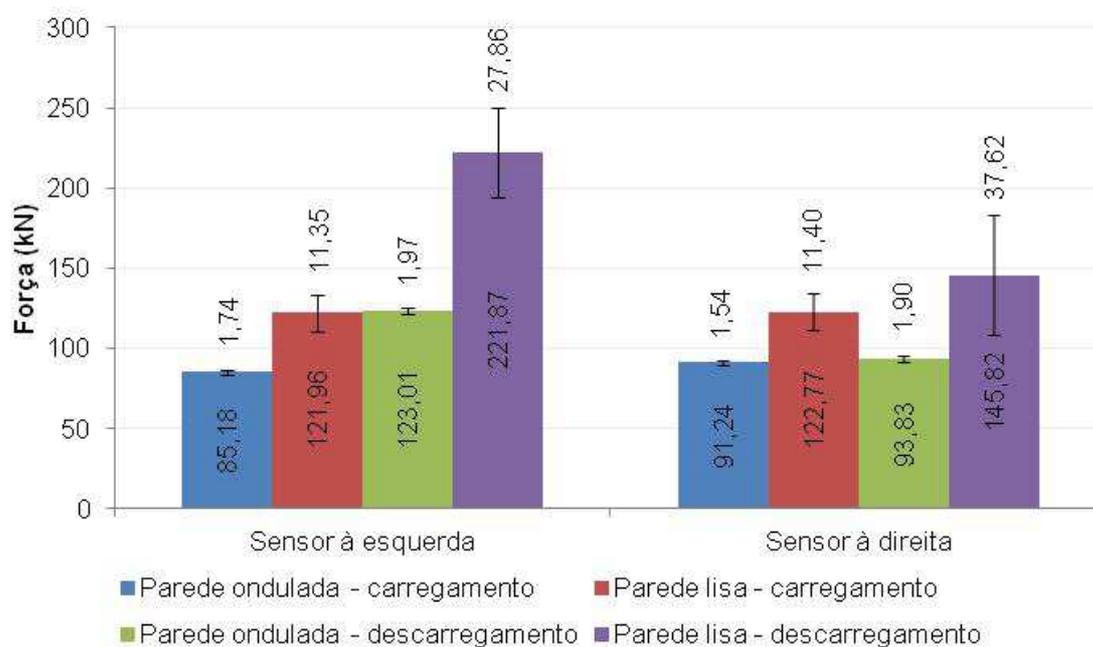
Quanto à rugosidade da parede, a análise com a parede lisa apresentou maiores esforços de tração nos dispositivos de sustentação do que com a ondulada, conforme Figura 121 e Figura 122. Esses resultados estão relacionados à maior facilidade de escoamento do produto com a parede lisa, o que causa maiores esforços na tremonha (esforços normais e de atrito) e, conseqüentemente, valores majorados de esforços de tração na transição, em relação ao silo com parede ondulada.

Figura 121 – Média dos valores máximos de tração medidos nos sensores de ligação da tremonha de 45° concêntrica ao corpo do silo piloto.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 122 – Média dos valores máximos de tração medidos nos sensores de ligação da tremonha de 45° excêntrica ao corpo do silo piloto.



Fonte: Do autor (2020).

Conforme já comentado anteriormente, a abertura da boca da tremonha para promover a descarga provoca uma mudança no estado interno de tensões entre os grãos, passando do estado ativo para o estado passivo, o qual é caracterizado pelo

instantâneo alívio das pressões verticais no fundo do silo (notadamente, na tremonha). Tal fato justifica o decréscimo imediato dos esforços de tração nos sensores aqui analisados, porém seguidos por acréscimos sucessivos e cíclicos, até atingir o completo esvaziamento do silo. Tal comportamento é mostrado em todos os gráficos sobre comportamento estrutural dos sensores, no exato momento do início do descarregamento.

Assim como observado anteriormente nas análises das tremonhas, também nas de 30° e 15° (Figura 123 a

Figura 126) os sensores mediram maiores esforços quando o silo foi ensaiado com paredes lisas (ou os esforços foram estatisticamente iguais àqueles obtidos com a parede rugosa). Tem-se, portanto, demonstrada a influência da rugosidade da parede nesses esforços avaliados.

Figura 123 - Valores de tração medidos pelas células de carga de tração com a tremonha de 30° concêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.

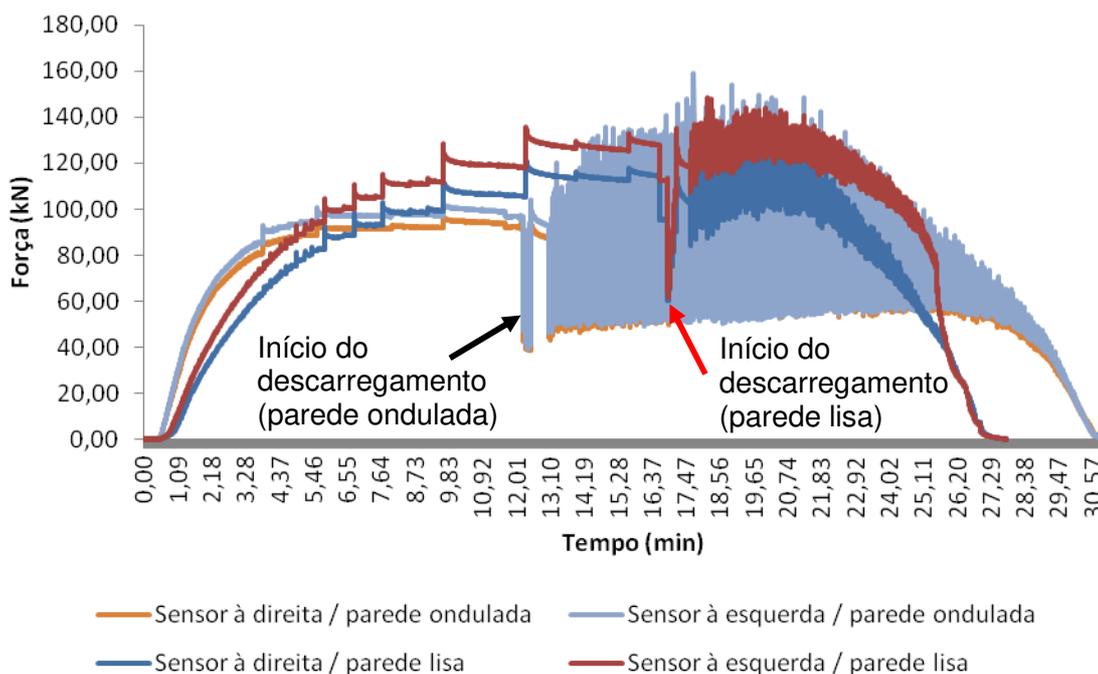
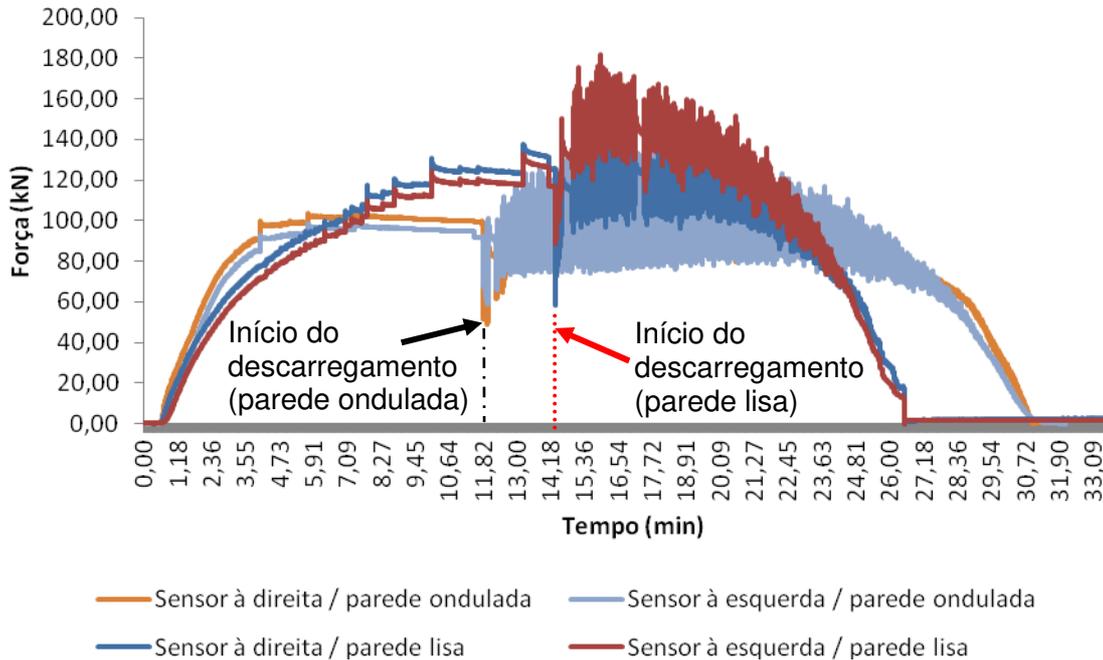
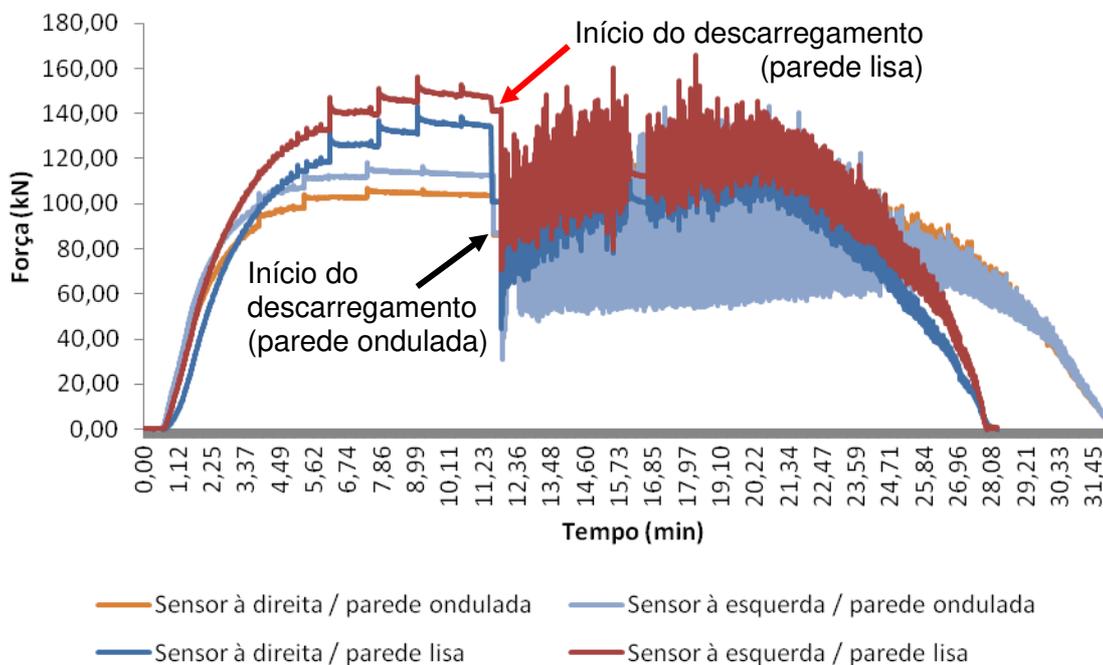


Figura 124 - Valores de tração medidos pelas células de carga de tração com a tremonha de 30° excêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



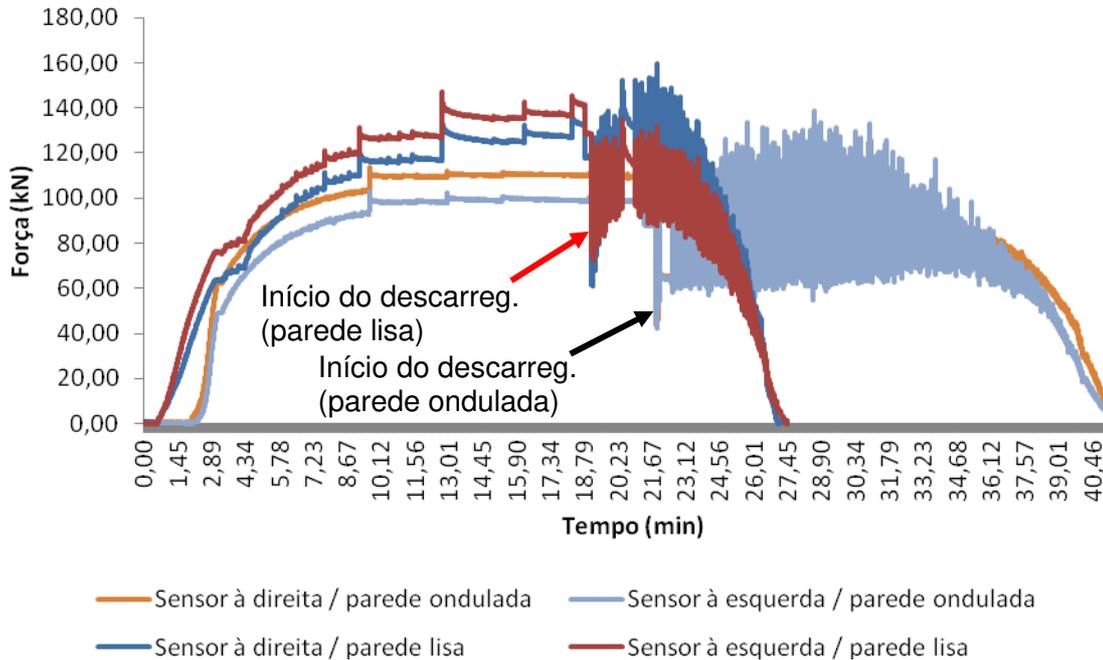
Fonte: Do autor (2020).

Figura 125 - Valores de tração medidos pelas células de carga de tração com a tremonha de 15° concêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



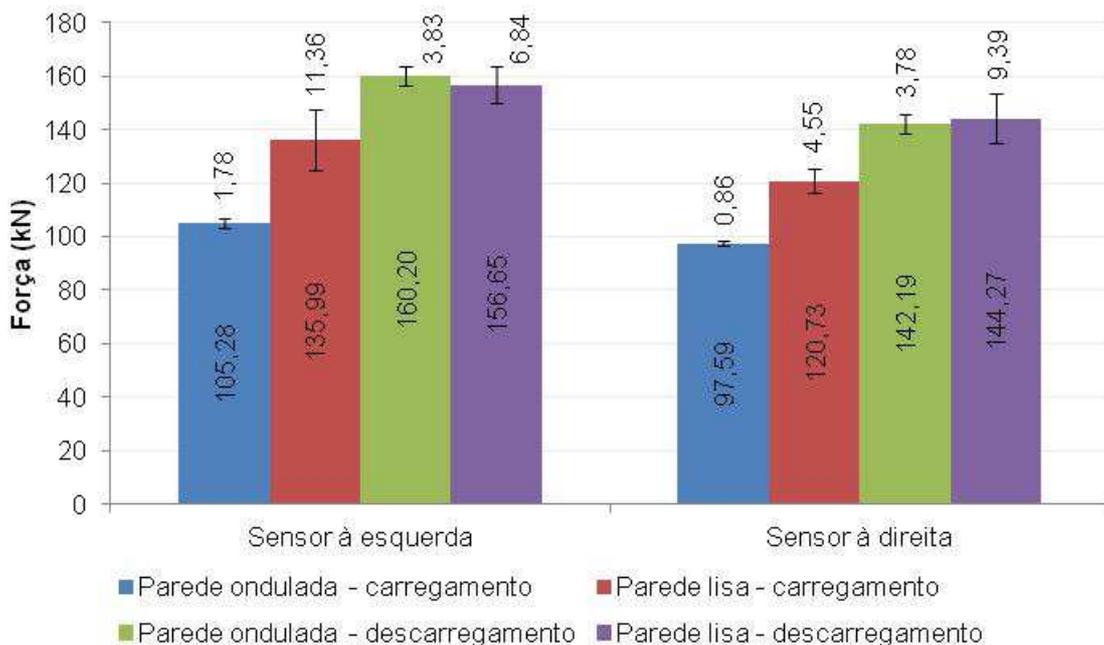
Fonte: Do autor (2020).

Figura 126 - Valores de tração medidos pelas células de carga de tração com a tremonha de 15° excêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



Na Figura 127, é avaliada a influência da tremonha de 30° concêntrica através das médias dos valores máximos de tração nas presilhas verticais de sustentação.

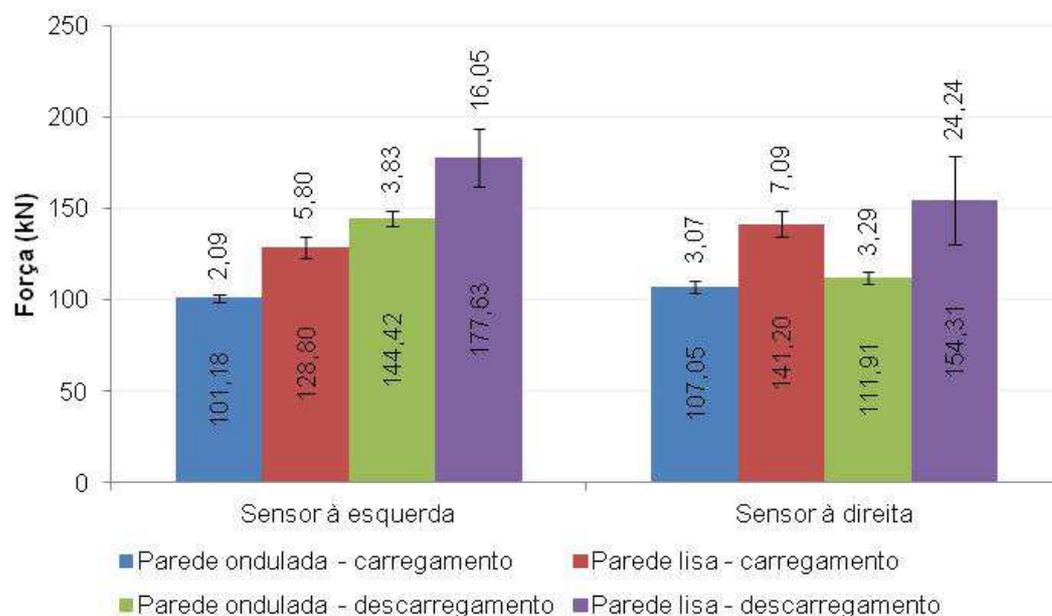
Figura 127 – Média dos valores máximos de tração medidos nos sensores de ligação da tremonha de 30° concêntrica ao corpo do silo piloto.



Tem-se, então, demonstrada mais uma vez a influência da rugosidade da parede do silo. No carregamento, os esforços com a parede lisa sobrepujaram notadamente aqueles com parede ondulada. No entanto, no descarregamento tal aspecto não se faz perceber já que, considerando os respectivos desvios padrões, pode-se dizer que os resultados foram iguais.

Já para o caso da tremonha de 30° excêntrica (Figura 128), a parede lisa proporcionou esforços de tração nas presilhas verticais consideravelmente maiores do que a ondulada, tanto no carregamento quanto no descarregamento. Porém, para uma mesma parede, não se observa diferença significativa quando é comparada a situação de carga e descarga apenas no lado vertical da tremonha (sensor à direita), ou seja, essa configuração geométrica da tremonha não foi capaz de causar restrição ao deslizamento dos grãos suficiente para que os esforços se fizessem sentir maiores na descarga do que no carregamento. Tal comportamento também foi observado com a tremonha de 15° excêntrica com a parede lisa (Figura 130).

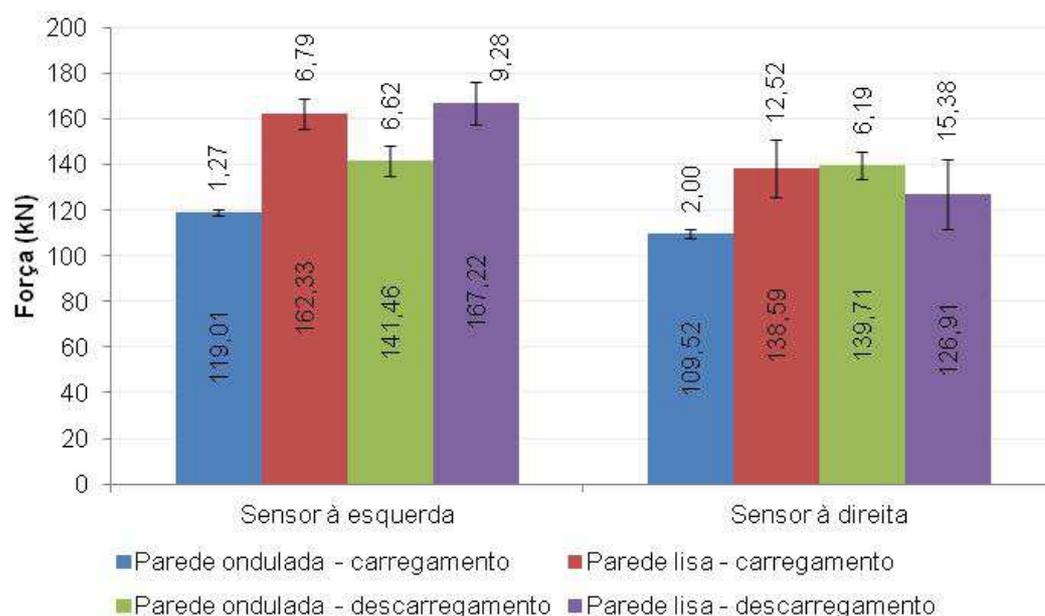
Figura 128 – Média dos valores máximos de tração medidos nos sensores de ligação da tremonha de 30° excêntrica ao corpo do silo piloto.



Fonte: Do autor (2020).

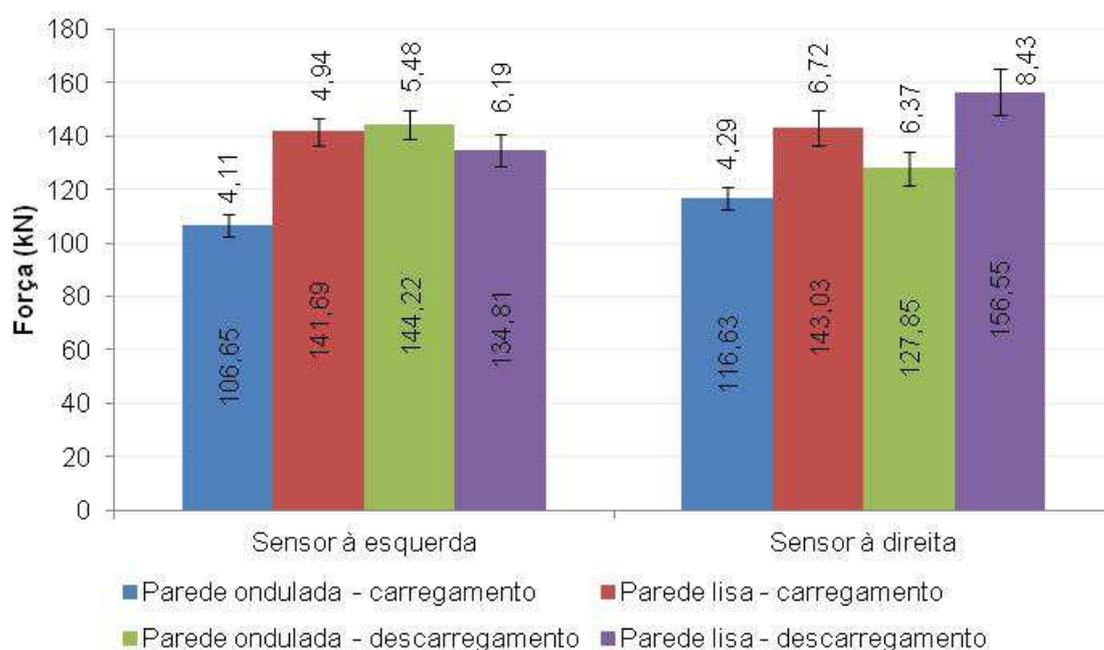
Com relação aos resultados obtidos nas células de carga do tipo tração para a configuração do silo com a tremonha de 15° concêntrica (Figura 129), pode-se perceber que não houve simetria nos resultados entre sensor à direita e à esquerda, exceto no descarregamento com a parede ondulada.

Figura 129 – Média dos valores máximos de tração medidos nos sensores de ligação da tremonha de 15° concêntrica ao corpo do silo piloto.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 130 – Média dos valores máximos de tração medidos nos sensores de ligação da tremonha de 15° excêntrica ao corpo do silo piloto.



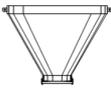
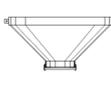
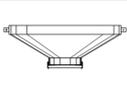
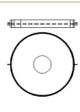
Fonte: Do autor (2020).

A fim de resumir as informações anteriores, têm-se elencadas na Tabela 27 as médias dos esforços máximos de tração nos sensores instalados nas presilhas de sustentação das tremonhas, para todas as tremonhas concêntricas estudadas. Percebe-se que há uma tendência de se obter os maiores esforços com a tremonha

mais alta (15° de inclinação) e esses valores se reduzirem à medida que se diminui a altura da tremonha, notadamente na condição estática. No descarregamento, no entanto, entre as tremonhas de 15° e 30° não se nota diferença significativa nesses esforços (considerando o desvio padrão); para as demais, seguem a tendência explanada para a situação estática.

Ressalta-se, também, a grande influência da rugosidade da parede do corpo do silo nesses esforços, já que, com a parede lisa, praticamente todos os resultados apresentaram valores de tração superiores aos obtidos com o silo ensaiado com a parede ondulada.

Tabela 27 – Médias dos esforços máximos de tração nos sensores na região de transição para tremonhas concêntricas, com desvios padrões.

Geometria da tremonha	Tipo de análise	Esforços de tração nas células de carga (kN)			
		Sensor à esquerda		Sensor à direita	
		Parede ondulada	Parede lisa	Parede ondulada	Parede lisa
Concêntrica $\alpha = 15^\circ$ 	Estática	119,01 ± 1,27	162,33 ± 6,79	109,52 ± 2,00	138,59 ± 12,52
	Dinâmica	141,46 ± 6,62	167,22 ± 9,28	139,71 ± 6,19	126,91 ± 15,38
Concêntrica $\alpha = 30^\circ$ 	Estática	105,28 ± 1,78	135,99 ± 11,36	97,59 ± 0,86	120,73 ± 4,55
	Dinâmica	160,20 ± 3,83	156,65 ± 6,84	142,19 ± 3,78	144,27 ± 9,39
Concêntrica $\alpha = 45^\circ$ 	Estática	89,61 ± 4,54	120,61 ± 2,76	85,27 ± 2,59	103,78 ± 6,21
	Dinâmica	107,65 ± 6,83	142,22 ± 6,74	101,67 ± 6,79	119,94 ± 11,06
Concêntrica $\alpha = 60^\circ$ 	Estática	78,15 ± 1,49	105,01 ± 10,37	73,02 ± 1,74	96,22 ± 8,96
	Dinâmica	86,73 ± 2,39	113,03 ± 6,33	84,35 ± 1,62	90,48 ± 5,39
Fundo plano 	Estática	66,50 ± 2,78	77,01 ± 4,13	62,71 ± 2,31	75,69 ± 3,01
	Dinâmica	65,69 ± 2,44	75,41 ± 9,90	63,26 ± 3,50	72,46 ± 8,38

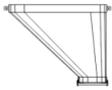
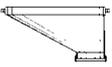
Fonte: Do autor (2020).

A síntese desses resultados nas presilhas de sustentação para as tremonhas excêntricas é apresentada na Tabela 28. No sensor da parede oposta à excentricidade da tremonha (sensor à esquerda), os valores de tração na presilha apresentam tendência de queda com a diminuição da altura da tremonha, para a situação estática e dinâmica quando considerada a parede do silo ondulada; e para a situação estática, considerando a parede lisa. Porém, um comportamento oposto ao descrito foi obtido com a parede lisa, durante o descarregamento do silo. Nesta condição, os esforços de

tração na transição se elevaram com a diminuição da altura da tremonha. No lado oposto (parede vertical, próxima à excentricidade), o “sensor à direita” registrou uma tendência de queda nos valores de tração na presilha de sustentação com a diminuição da altura das tremonhas, notadamente para os ensaios do silo com parede ondulada.

Assim como observado com as tremonhas concêntricas (Tabela 27), pode-se notar, também, a importância da avaliação da geometria da parede do silo na determinação desses esforços junto às tremonhas excêntricas, já que os esforços de tração também se apresentaram maiores com a parede lisa em comparação aos resultados obtidos com a parede ondulada.

Tabela 28 - Médias dos esforços máximos de tração nos sensores na região de transição para tremonhas excêntricas, com desvios padrões.

Geometria da tremonha	Tipo de análise	Esforços de tração nas células de carga (kN)				
		Sensor à esquerda		Sensor à direita		
		Parede ondulada	Parede lisa	Parede ondulada	Parede lisa	
Excêntrica $\alpha = 15^\circ$		Estática	106,65 ± 4,11	141,69 ± 4,94	116,63 ± 4,29	143,03 ± 6,72
		Dinâmica	144,22 ± 5,48	134,81 ± 6,19	127,85 ± 6,37	156,55 ± 8,43
Excêntrica $\alpha = 30^\circ$		Estática	101,18 ± 2,09	128,80 ± 5,80	107,05 ± 3,07	141,20 ± 7,09
		Dinâmica	144,42 ± 3,83	177,63 ± 16,05	111,91 ± 3,29	154,31 ± 24,24
Excêntrica $\alpha = 45^\circ$		Estática	85,18 ± 1,74	121,96 ± 11,45	91,24 ± 1,54	122,77 ± 11,40
		Dinâmica	123,01 ± 1,97	221,87 ± 27,86	93,83 ± 1,90	145,82 ± 37,62

Fonte: Do autor (2020).

5.8. Resultados dos esforços obtidos nos sensores na base dos pilares do silo piloto (tremonhas excêntricas)

Neste tópico são avaliadas as cargas verticais transmitidas aos pilares de sustentação do silo (pilar da esquerda e direita). Ressalta-se que, apesar de o silo piloto ser composto por três pilares, o terceiro tem a função apenas de estabilização lateral da estrutura.

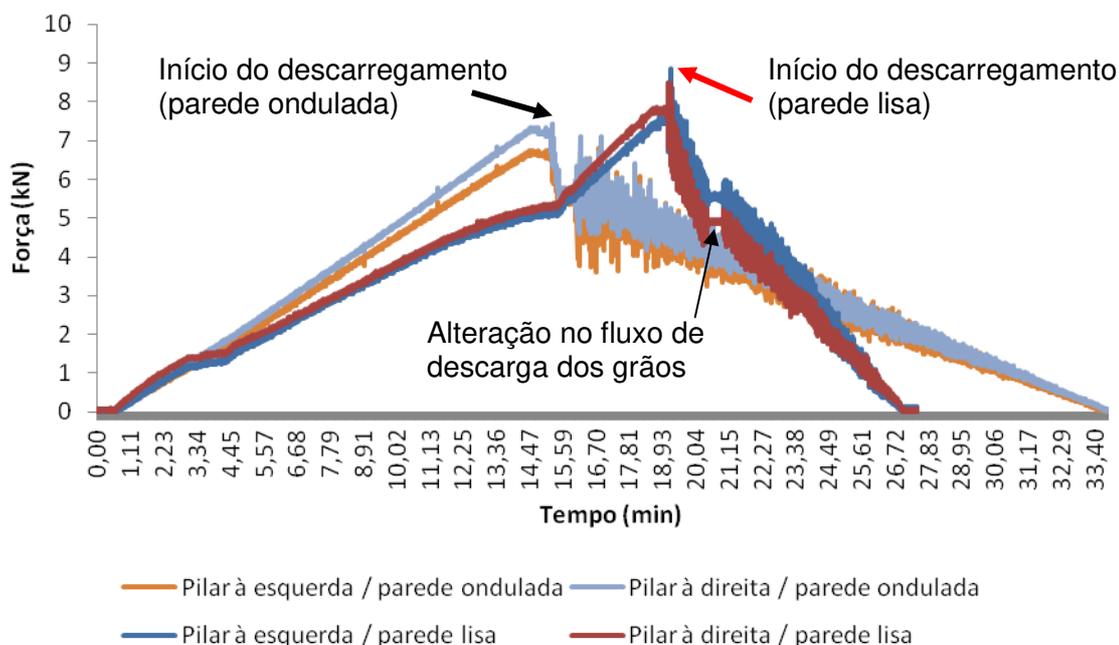
Assim como no tópico anterior, aqui também são apresentadas as curvas de distribuição de força (carga vertical, em kN) *versus* tempo, registradas em um dos quatro ensaios realizados, além da média dos esforços máximos dos ensaios, com seus respectivos desvios padrões (apenas no descarregamento). Ainda, como o intuito foi avaliar a influência da geometria da tremonha no sistema de armazenamento,

optou-se por analisar os esforços nos pilares apenas dos silos com tremonhas excêntricas, pois se supõe que com as concêntricas os esforços são igualmente distribuídos nesses elementos de sustentação do silo (ou muito próximos).

Também são avaliadas apenas as situações de descarregamento, onde se obtém maiores esforços nos pilares devido à condição de cargas dinâmicas. Corroborando com esta definição, estão as conclusões do trabalho de Fank *et al.* (2015), no qual foi constatado que, embora a distribuição interna de tensões na fundação seja praticamente uniforme no carregamento, a distribuição das pressões nas colunas de sustentação é desuniforme quando em função do fluxo.

Avaliando-se, então, os esforços dos pilares do silo piloto com as tremonhas de 45°, 30° e 15° excêntricas, percebe-se que durante o processo de carregamento há variações na vazão de carregamento (Figura 131 a Figura 133). Tal fato é evidenciado pela alteração da inclinação da reta durante o carregamento. Observa-se, também, a variação do fluxo durante a descarga com quase total paralisação do mesmo. Pelas referidas figuras percebe-se que o maior esforço nos pilares ocorre no momento imediato da abertura da boca da tremonha. Nesse momento ocorre um pico de força que supera todos os valores medidos no processo de enchimento e esvaziamento do silo, como pode ser observado nas referidas figuras.

Figura 131 - Valores de esforços axiais de compressão medidos pelos sensores na base dos pilares do silo com a tremonha de 45° excêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 132 - Valores de esforços axiais de compressão medidos pelos sensores na base dos pilares do silo com a tremonha de 30° excêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.

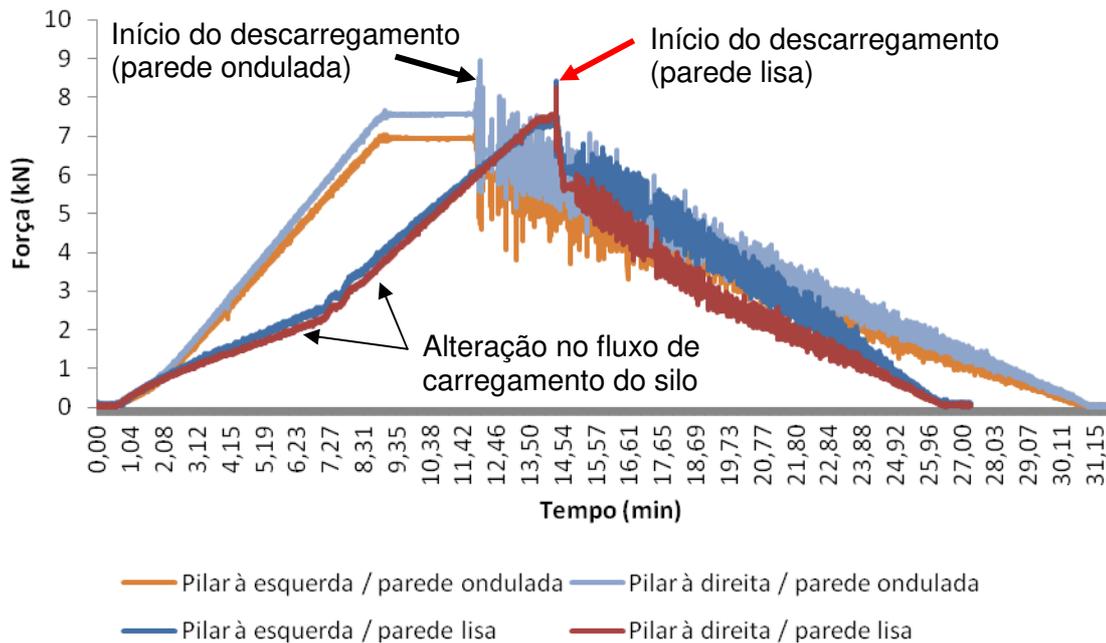
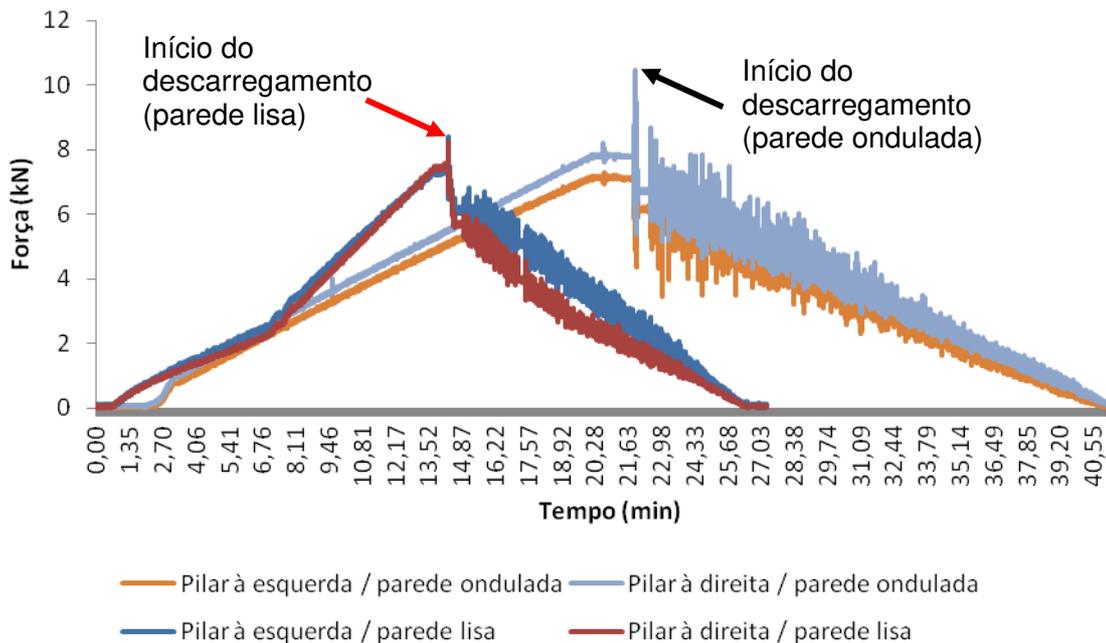


Figura 133 - Valores de esforços axiais de compressão medidos pelos sensores na base dos pilares do silo com a tremonha de 15° excêntrica, em um ensaio completo de carregamento e descarregamento.

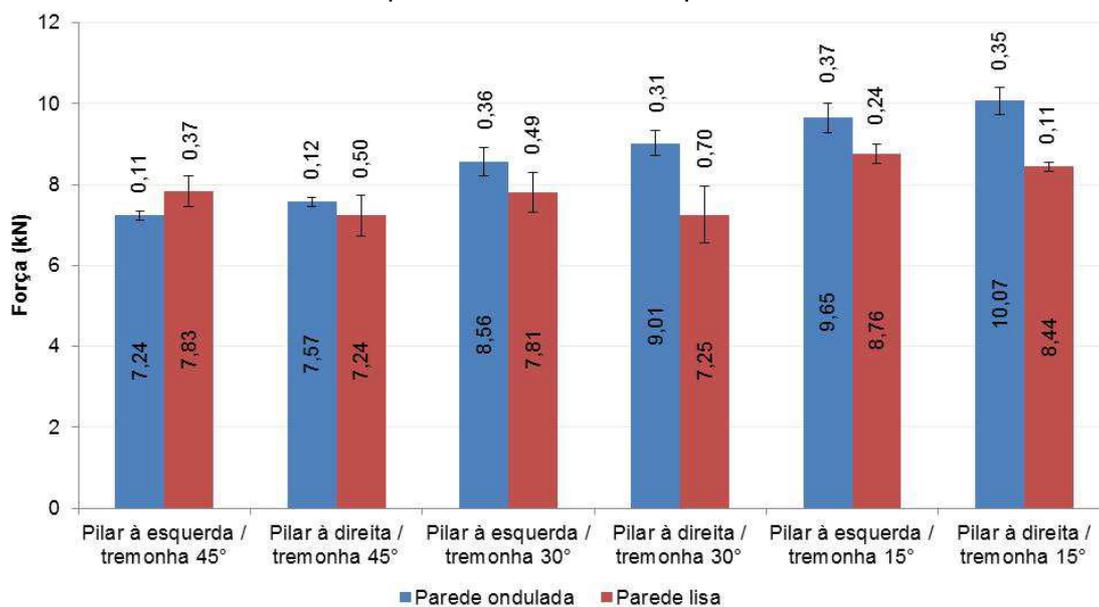


Apesar de as curvas de força *versus* tempo apresentarem divergência nos valores obtidos durante o enchimento e esvaziamento entre pilar da esquerda e da

direita (notadamente para o silo com paredes onduladas), como pode ser visto nos gráficos das Figura 131 a Figura 133, essa pequena desigualdade não ocasiona diferença significativa nos valores máximos de esforços normais que ocorrem nos pilares (no instante da abertura da boca da tremonha) quando se consideram os quatro ensaios realizados e os respectivos desvios padrões relacionados à médias dos valores de força. A Figura 134 mostra essa situação, onde se podem comparar os valores máximos nos pilares, com as três tremonhas em análise nesse tópico. Apesar da pressuposta assimetria nas cargas dos pilares causada pela excentricidade das tremonhas, não se observou tal situação com as configurações de geometria do silo (tremonha excêntricas e paredes onduladas ou lisas) e com o produto ensaiado (milho). Apenas os resultados com a tremonha de 45° excêntrica e parede ondulada apresentaram valores divergentes entre pilar da esquerda e da direita, sendo que em todos os outros casos os esforços nos pilares foram estatisticamente iguais (para uma mesma tremonha e mesma parede).

Quando se avalia todo o sistema de armazenamento e não apenas as tremonhas (como feito nos tópicos anteriores), percebe-se que somente a geometria da tremonha não foi capaz de alterar consideravelmente o centro de massa dos grãos armazenados de forma a desequilibrar consideravelmente os carregamentos nos pilares, o que justifica os resultados apresentados na Figura 134.

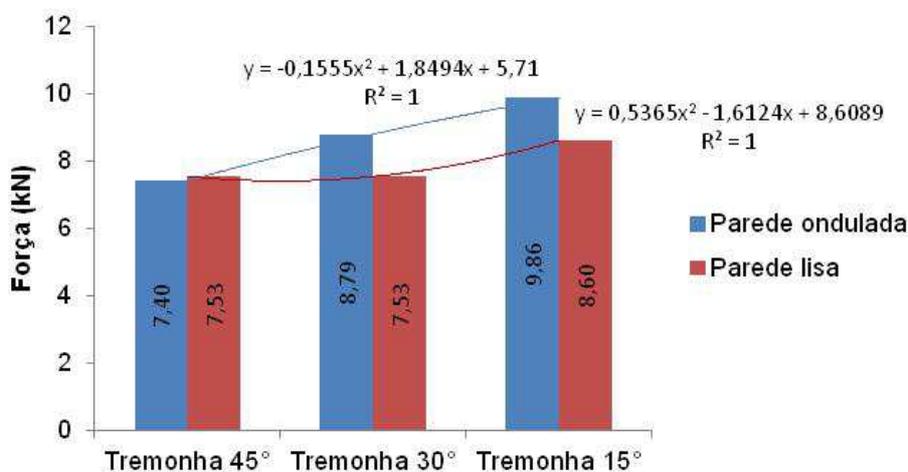
Figura 134 – Média das cargas axiais máximas de compressão nos pilares da esquerda e direita do silo piloto.



Fonte: Do autor (2020).

No entanto, quando se avalia a influência da tremonha na carga da fundação sem considerar a posição dos pilares (considerando a média das cargas nos dois pilares), percebe-se que há uma tendência de acréscimo de cargas com o aumento da altura da tremonha (diminuindo a inclinação das suas paredes com a vertical). Na Figura 135 pode-se afirmar que o incremento de cargas acontece de forma mais acentuada com a utilização de paredes onduladas no silo. Esse incremento de cargas se justifica, também, pelo maior volume de armazenamento em cada tremonha ($\text{volume}_{\text{tremonha}15^\circ} > \text{volume}_{\text{tremonha}30^\circ} > \text{volume}_{\text{tremonha}45^\circ}$).

Figura 135 – Média das cargas axiais máximas de compressão nos pilares do silo piloto para as tremonhas de 45°, 30° e 15° excêntricas.



Fonte: Do autor (2020).

5.9. Considerações gerais sobre a análise dos resultados

A partir dos dados apresentados e analisados é possível fazer a seguinte súmula:

- 1) A alteração física dos grãos de milho no decorrer dos ensaios, principalmente a quebra e a formação de pós, resultou em mudanças nas suas propriedades físicas e, conseqüentemente, nos resultados de pressões normais nas tremonhas previstos pelas normas avaliadas, considerando as duas amostras deste trabalho.
- 2) Dos ensaios com a tremonha de fundo plano conclui-se que o padrão de fluxo na descarga do silo foi o de funil, já que as pressões normais a essa tremonha foram estatisticamente iguais na condição de carregamento e descarregamento.
- 3) As pressões normais experimentais nas tremonhas foram, em sua maioria, superadas por aquelas calculadas conforme as normas internacionais avaliadas neste trabalho, notadamente para os esforços estáticos (durante a

fase de carregamento). No entanto, as pressões normais dinâmicas empíricas nas tremonhas de 15° e 30° concêntricas (e de 45° com a parede lisa) superaram as preconizadas pelas normas.

- 4) A avaliação da influência da geometria das tremonhas concêntricas mostrou que as maiores pressões normais se localizam próximas à boca de descarga da estrutura durante o carregamento, tendo comportamento estrutural oposto na condição de descarregamento. Nesta situação, há grande pico de pressões próximo à região de transição e considerável diminuição destes esforços na medida em que se afasta dessa posição.
- 5) As tremonhas excêntricas causam considerável assimetria de esforços em si, tanto no carregamento quanto no descarregamento do silo piloto. Entretanto, no descarregamento, as pressões normais na região de transição, no lado oposto à excentricidade, sobrepõem as pressões exercidas na parede vertical da tremonha (próxima à excentricidade).
- 6) O estudo dos esforços de tração que ocorrem na região de transição apresentou uma tendência de se obterem os maiores esforços com a tremonha concêntrica mais alta (menor inclinação das paredes com a vertical) e esses valores se reduzem à medida que se diminui a altura da tremonha, tanto na situação de carregamento, quanto na de descarregamento. Nos estudos com as tremonhas excêntricas, o mesmo comportamento se verificou no sensor da parede oposta à excentricidade da tremonha (sensor à esquerda), onde os valores de tração na presilha apresentaram tendência de queda com a diminuição da altura da tremonha para a situação estática e dinâmica, quando o silo foi ensaiado com a parede ondulada, e para situação estática, com o silo com parede lisa. Porém, um comportamento oposto ao descrito foi obtido com a parede lisa, durante o descarregamento do silo. Nesta condição, os esforços de tração na transição se elevaram com a diminuição da altura da tremonha. No lado oposto (parede vertical, próxima à excentricidade), o “sensor à direita” registrou uma tendência de queda nos valores de tração na presilha de sustentação com a diminuição da altura das tremonhas, notadamente para os ensaios do silo com parede ondulada.
- 7) Os esforços axiais nos dois pilares de sustentação, causados pela descarga do milho quando o silo piloto foi ensaiado com as tremonhas excêntricas (15°, 30° e 45° totalmente excêntricas), não foram significativamente diferentes devidos à geometria das tremonhas. Embora a geometria assimétrica cause esforços normais na tremonha e esforços de tração na região de transição de formas desiguais, quando se considera todo o silo piloto e não apenas as tremonhas

isoladamente, percebe-se que somente a geometria da tremonha não foi capaz de alterar consideravelmente o centro de massa dos grãos armazenados de forma a desequilibrar os carregamentos nos pilares.

- 8) A consideração de duas geometrias para a parede do corpo do silo causou grande alteração nos esforços analisados nas tremonhas. As pressões normais máximas nas tremonhas concêntricas e excêntricas foram obtidas quando o silo foi ensaiado com a parede lisa, tanto na condição de carregamento, quanto na de descarregamento. Com relação às tremonhas excêntricas, ressalta-se que as pressões normais máximas relatadas ocorrem no lado oposto à excentricidade. De forma análoga, os esforços de tração nas presilhas de sustentação da tremonha também foram significativamente maiores com a parede lisa do corpo do silo.

6. CONCLUSÕES

O uso do silo piloto na predição dos esforços avaliados neste trabalho (pressões normais na tremonha, forças de tração nas presilhas de sustentação das tremonhas e nas forças axiais dos pilares) se mostrou adequado.

O estudo da geometria das tremonhas inclinadas axissimétricas demonstrou que o ângulo de inclinação das paredes interfere nas pressões normais que atuam nessa estrutura, apresentando maiores valores as tremonhas com menor inclinação com o eixo vertical do silo (maior altura).

Quanto à excentricidade da boca de descarga, os resultados demonstraram que esse deslocamento da geometria altera a distribuição das pressões normais nas paredes, obtendo valores superiores na região de transição oposta à excentricidade se comparados aos observados na mesma região e no lado próximo à excentricidade.

A condição de carregamento e descarregamento do silo promove alterações nas pressões normais observadas nas tremonhas inclinadas. As pressões dinâmicas superam as pressões estáticas. Com a tremonha de fundo plano, no entanto, não foram observadas pressões normais distintas entre a condição de carregamento e descarregamento, donde se infere que, com essa geometria de tremonha, ocorra fluxo de funil.

As normas avaliadas (ISO 11697:2012, EN 1991-4:2006 e AS 3774:1996) foram capazes de prever as pressões normais nas tremonhas concêntricas com margem de segurança, resultando em valores superiores aos empíricos, demonstrando segurança na previsão desses esforços. No entanto, as pressões normais dinâmicas empíricas obtidas com as tremonhas axissimétricas de 45°, 30° e 15° superaram os valores normativos, notadamente nos ensaios com a parede lisa. Essas normas apresentaram variações nas pressões normais nas tremonhas com a alteração das propriedades físicas do milho (considerando as amostras “A” e “B”).

A teoria de Walker (1966) apresentou valores de pressões normais estáticas inferiores aos empíricos (tremonhas cônicas) e a de Janssen (1895), superiores aos empíricos (tremonha de fundo plano).

As forças de tração na região de transição são dependentes da geometria dessa estrutura (ângulo de inclinação das paredes e concentricidade da boca de descarga). Maiores alturas de tremonhas concêntricas acarretam em maiores esforços nesses dispositivos. As tremonhas excêntricas conduzem a maiores esforços de tração na presilha oposta à excentricidade

Os ensaios com a geometria da parede do corpo do silo mostraram a influência deste parâmetro nos resultados dos esforços analisados, sendo os de maiores

magnitudes obtidos com a parede lisa, quando se avaliou as pressões normais na tremonha e os esforços de tração nas presilhas. Os maiores esforços axiais nos pilares se deram com a parede ondulada.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de dar continuidade aos estudos desenvolvidos nesse trabalho, sugerem-se as seguintes pesquisas:

- Utilizar outros tipos de produtos armazenados (com propriedades físicas consideravelmente diferentes às do milho apresentadas nesta tese);
- Adotar outras relações entre diâmetro do silo e altura de produto armazenado;
- Avaliação das pressões horizontais e de atrito, estáticas e dinâmicas, no corpo do silo, para ambas as geometrias de paredes (lisa e ondulada) e variando as geometrias das tremonhas;
- Ensaiai o silo piloto com uma terceira geometria de parede disponível no Laboratório de Propriedades Físicas e de Fluxo de Produtos Armazenados (parede enrijecida com perfis metálicos);
- Simulação numérica, via método dos elementos finitos ou métodos das diferenças finitas, das condições de ensaios expostas nesse trabalho e comparação com os resultados experimentais;
- Análise do padrão de fluxo durante o carregamento e descarregamento do silo piloto com as tremonhas avaliadas;
- Consideração da consolidação do produto dentro do silo piloto e análise das pressões de consolidação;
- Instrumentar um silo comercial, nas mesmas condições estudadas neste trabalho, ou seja, vertical metálico esbelto, com paredes onduladas ou lisas, e comparar com os resultados encontrados com o silo piloto.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1991). Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials. p.313-377. EUA. Revised. **ACI 313**.
- AIRY, W. (1897) The pressure of grain. **Minutes of proceedings**. Institution of Civil Engineers. London. Vol. 131, págs. 507-512.
- ANJOS, C.M **Simulação numérica das pressões exercidas pelos grãos nas paredes dos silos verticais pelo método dos elementos finitos**. 2018. 133 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.
- ARAÚJO, E.C. (1997) **Estudo Teórico e Experimental de Tremonhas Piramidais para Silos Metálicos Elevados**. 317p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior.
- ARNOLD, P.C.; REED, A.R. On the machine dependence of flow property measurements on bulk solids, **Bulk Solids Handling** 7 (1987) 3, pp. 397-400.
- AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3774**. Loads on bulk containers. Sydney. AS 3774 Supplement 1 (1997). Loads on bulk containers – Commentary. Sydney, 1996.
- AYUGA, F. (1995). Los empujes del material almacenado en silos. **Informes de la construcción**. V.46, n.436, p. 27-34, marzo/abril.
- CALIL, J. C. (1984-1985) Determinação das propriedades físicas de materiais granulares e pulverulentos para o projeto estrutural. **Revista Brasileira de Armazenagem**, v.9/10, n,1/2, págs. 3-6.
- CALIL, J. C. (1985) Cargas para o dimensionamento de silos. In: **Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural**, 23., Buenos Aires, T.5, págs. 1359-1379.
- CALIL JR., C. (1990) **Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais**. Tese de Livre Docência. EESC - USP. 198p.
- CALIL JR., C.; NASCIMENTO, J.W.B; ARAÚJO, E. C. (1997). Silos Metálicos Multicelulares. Serviço Gráfico - EESC / USP – São Carlos - SP. 175p.
- CALIL JR., C.; CHEUNG, A. B. Silos: pressões, fluxo, recomendações para projeto e exemplos de cálculo. São Carlos: EESC, 2007, 232 p.
- CANADIAN FARM BUILDING CODE. Part 2, Structural design. Ottawa, Canada, 1983.
- CHEUNG. A. B. (2007) **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos**. Tese de doutorado. EESC/USP – São Carlos – SP. 305p.
- CONAB (2019). Companhia Brasileira de Abastecimento. www.conab.org.br. Consulta realizada em 10 de julho de 2019.

- COUTO, A.; RUIZ, A.; AGUADO, P.J. (2013). Experimental study of the pressures exerted by wheat stored in slender cylindrical silos, varying the flow rate of material during discharge. Comparison with Eurocode1 part 4. **Powder Technol.** V. 237, p. 450-467.
- DECKERS, H.P.F. **Avaliação da aplicação da norma ACI-313:1997 no dimensionamento de silos multicelulares elevados de concreto armado para café.** 2010, 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras. 2010.
- DESHMUKH, Omkar S. et al. Ring Shear Tester as an in-vitro testing tool to study oral processing of comminuted potato chips. **Food Research International**, v. 123, p. 208-216, 2019.
- DEUTSCHE NORM. **DIN 1055-6:** Basis of design and actions on structures – part 6: design loads for buildings and loads in silos bins. Berlin, Verlaz, 2005.
- DRUCKER, D.C.; PRAGER, W. Soil mechanics and plastic analysis on limit design. **Quarterly of Applied Mathematics**, Providence, v. 10, n. 2, p. 157-165, 1952.
- ENSTAD, G. (1975). On the Theory of Arching in Mass Flow Hoppers. **Chem. Eng. Science**. pp 1273 a 1283.
- EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARTIZATION. Eurocode 1. **EN 1991-4** Part 4: Actions on silos and tanks. Brussels, 2006.
- EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARTIZATION. Eurocode 3. **EN 1993-1-6:** design of steel structures, part 1–6: strength and stability of shell. Brussels (2007).
- EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARTIZATION. Eurocode 3. **EN 1993-4-1:** design of steel structures, part 4–1: silos. Brussels (2007).
- 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**, v. 38, n. 4, p. 498-503, 2018.
- FREITAS E. G. (2001) **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano.** 175p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior.
- GALLEGO, E.V. (2006) **Simulation de empujes del material almacenado en silos con modelos de comportamiento del material no elásticos.** Madrid. 417 p. Phd

- Thesis. Departamneto de Construcción y Vías Rurales. Universidad Politécnica de Madrid. Director de tesis D. Professor Francisco Florentino Ayuga Téllez.
- GALLEGO, E.; RUIZ, A.I; 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.
- GAYLORD, E.D.; GAYLORD, C.N. **Design of steel bins for storage of bulk solids**. New Jersey: Prentice-Hall, 1984. 359p.
- GOMES, F.C. (1994) **Silos para armazenamento de laranjas**. São Carlos. 107 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior.
- GOMES, F.C. (2000) **Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais**. São Carlos. 205p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior.
- GONZÁLEZ-MONTELLANO, C; GALLEGO, E.; RAMÍREZ-GOMES, A.; AYUGA, F.. Three dimensional discrete element models for simulating the filling and emptying of silos: analysis of numerical results. **Computers & chemical engineering**, v. 40, p. 22-32, 2012.
- GRUDZIEŃ, K.; CHANIECKI, Z.; BABOUT, L. Study of granular flow in silo based on electrical capacitance tomography and optical imaging. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 62, p. 186-195, 2018.
- GUAITA, M.; COUTO, A.; AYUGA, F. Numerical simulation of wall pressure during discharge of granular material from cylindrical silos with eccentric hoppers. **Biosystems Engineering**, London, v. 85, n. 1, p. 101-109, May 2003.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDART. **ISO 11697**. Bases for design of structures: Loads due to bulk materials. London, 2012.
- JAMIESON (1903). Grain pressures in deep bins. Transaction Canadian Society of Civil Engineers to <<University of Sheffield>> Departament of Fuel Tecnology and Chemical Engineering.
- JANSSEN, H. A. (1895) Experiments on grain pressures in silos. **Verein Deutscher Ingenieure**, Zeitschrift.
- JENIKE, A. W. (1964) Storage and flow of solids. Salt Lake City, University of Utah. (Bulletin. **Utah Engineering Experiment Station**, nº123).
- JENIKE, A. W.; JOHANSON, J. R. (1968) Bin Loads. **Journal of the Structural Division**, ASCE, v.95, nºST4.
- 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.

- JENIKE, A. W. & JOHANSON, J. R. (1979) **Flowfactor Tester and Consolidating Bench Operating Instructions**. Jenike & Johanson, Inc, North Billerica, Massachusetts – USA, 40p (Manual Técnico).
- LENCZNER (1963). Investigation into the behaviour of sand in model silo. **Structural Engineer**, v.41, pags. 389-398.
- LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B.; FANK, M. Z. Forças verticais e de atrito em silos cilíndricos com fundo plano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 18, n. 6, 2014.
- MADRONA, F. S. **Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica**. 2008. 177 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- MADRONA, F. S., CALIL JÚNIOR, C. Análise das pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 11, n. 49, p. 37-56, 2009.
- MILANI, A. P. (1993) **Determinação das propriedades de produtos armazenados para o projeto de pressões e fluxo em silos**. São Carlos. 272p. Tese (Doutorado). EESC - USP. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior.
- MOHSEIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.
- NASCIMENTO, J. W.B; LOPES NETO, J. P.; MONTROSS, M. D. Horizontal pressures in cylindrical metal silos and comparison with different international standards. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 4, p. 601-611, 2013.
- NASCIMENTO, J. W. B.; BANDEIRA, D. J. **Descarga de silos verticais sem obstrução do fluxo com uso de insert**. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2017, Belém. Anais do Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2017. v. 1. p. 1-5.
- NEDDERMAN, R.M. (1992) **Statics and kinematics of granular materials**. Cambridge University Press, Cambridge.
- NIELSEN, J.; KRISTIANSEN, N. O. (1980). **Related measurements of pressure conditions in full-scale barley silo and in model silo**. In. Internacional Conference on Design of Silos for Strength and Flow, Lancaster, London, section 5, pags. 1-24.
- OOI, J. Y; PHAM, L.; ROTTER, J. M. (1990). Systematic and random features of measured pressures on full-scale silo walls. **Engineering Structural**, v.12, pags. 74-87.

- PALMA, G. (2005) **Pressões e fluxo em silos esbeltos ($H/D \geq 1,5$)**. São Carlos. 109 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. USP. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior.
- PIEPER, K.; SCHÜTZ, M. (1980) Bericht Über das Forschungsvorhaben - Norm-Mess-Silo für Schüttguteigenschaften. **Technische Universität Braunschweig** - Lehrstuhl für Hochbaustatik, Deutschland.
- PIEPER, K., WENZEL, F. (1964). **Druckverhältnisse in silozellen**, Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin.
- PHAM, L. (1985) Variability of bin loads due to bulk solids for structural design. **Civil Engineering Trans.**, v.27, n.1, pags. 73-78.
- RAMÍREZ, A.; NIELSEN, J.; AYUGA, F. Pressure measurements in steel silos with eccentric hoppers. **Powder Technology**, v. 201, n. 1, p. 7-20, 2010.
- RASI, J. R. **Alternativas Estruturais em Paredes de Concreto Pré-moldado de Silos Horizontais**. 2014. 184 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. USP. Orientador Prof. Jasson Rodrigues de Figueiredo Filho.
- RAVENET, J. (1983) **Silo: deformaciones, falhas, explosiones, prevencion de accidentes**. Ed. Tecnicos Asociados. Barcelona.
- REIMBERT, M. & A. (1943) Recherches nouvelles sur les efforts exercés par les matieres pulverulentos ensilees sur les parois des silos. **Annales Institute Technique du Batiment et des Travaux Publics**. Series I. N° 11, pags. 49-60.
- ROBERTS, A.W.; McLEAN, A.G.; ARNOLD, P.C. Determination of bin geometry. Paper 5. Storage, Flow and Handling of Bulk Solids. 1987.
- ROBERTS, I. Pressure of stored grains. **Engineering**, vol.34, pp.339, oct. 27, 1884.
- ROTTER, J.M. (2001) **Pressures, stresses and buckling in metal silos containing eccentrically discharging solids**. 60th Birthday Celebration for Univ-Prof Dipl-Ing Dr.techn. Richard Greiner, Oct. 12, Institute for Steel, Timber and Shell Structures, Technical University Graz, Austria.
- RUIZ, A.; COUTO, 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 II: Construction and validation. **Computers and electronics in agriculture**, v. 85, p. 174-187, 2012.
- SADOWSKI, A. J.; ROTTER, J. M. Steel silos with different aspect ratios: I—Behaviour under concentric discharge. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, n. 10, p. 1537-1544, 2011.
- SALEHI, H.; BERRY, R.; FARNISH, R.; BRADLEY, M. Temperature and time consolidation effect on the bulk flow properties and arching tendency of a

- detergent powder. **Chemical Engineering & Technology**, v. 43, n. 1, p. 150-156, 2020.
- SCHULZE, D. (1996). Silos – Design Variants and Special Types. **Bulk Solids Handling**. V. 16. Nº 2. April/June.
- SCHWEDES, J. (1983), Evolution of bulk solids technology since 1974. Separata da **Revista Bulk Solids Handling**, USA, v.3, n.1, p.1-5.
- SILVA, M.C.A.T. (1993) **Estudo da Variabilidade Pressões em Silos**. São Paulo. 192p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, USP. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior.
- TANAKA, F.M.S.; CAPELLO, E.A.S. Comparação entre cargas hidrostáticas e cargas de grãos no dimensionamento de um reservatório de fertilizante. **III Seminário da Pós-Graduação e Engenharia Mecânica**, UNESP. Bauru. 2009.
- TEIXEIRA, L. G. R.; GOMES, F. C. Determinação dos ângulos de atrito interno, efetivo e do ângulo de atrito com a parede do produto café utilizando a máquina de cisalhamento TSG 70-140. **In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 2003, Goiânia, 2003.
- TIMM, M. W. (2002) **Estudo Crítico da Metodologia de Cálculo para Silos Prismáticos Multicelulares**. Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado) –Escola de Engenharia, UFRS. Orientador Prof. Ignacio Iturrioz.
- WILMS, H. (1985). Calculation of stresses in silos by the method of characteristics. **Bulk Solids Handling**, V.5, n.2, pags. 19-23.
- VALDÉS, A. J.; POZO, J. M. M.; RODRÍGUEZ, P. J. A. (2002) El Eurocódigo 1993-1-6 em el cálculo de pandeo de silos agrícolas metálicos. **Informes de La Construcción**, España, v. 54, n. 480, p. 29-38.
- VIDAL, P.; GALLEGO, E.; GUAITA, M.; AYUGA, F.. Simulation of the filling pressures of cylindrical steel silos with concentric and eccentric hoppers using 3-dimensional finite element models. **Transactions of the ASABE**, v. 49, n. 6, p. 1881-1895, 2006.
- WALKER, D. M. (1966). An Approximate Theory for Pressures and Arching in Hoppers. **Chemical Engineering Science**, v. 21, p. 975-997.
- WANG, Y.; LU, Y.; OOI, J. Y. Finite element modelling of wall pressures in a cylindrical silo with conical hopper using an Arbitrary Lagrangian–Eulerian formulation. **Powder technology**, v. 257, p. 181-190, 2014.
- WANG, Y.; LU, 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.
- YÁÑEZ, A. C.; GUAITA, M. F.; LÓPEZ, P. V. (2001) Análisis de la distribución de presiones estáticas en silos cilíndricos con tolva excéntrica mediante el M.E.F.

- influencia de la excentricidad y comparación con el Eurocódigo 1. **Informes de La Construcción**, España, v. 52, n. 472, p. 17-27.
- ZAKRZEWSKI, M. S. Design of silo for grain storage. **Die Sivelse Ingenieur**. South Africa, 1959. p. 68-69.
- ZAKRZEWSKI, J.k. A theoretical analysis of stresses in silos with vertical walls. **Chemical Engineering Science**, v.28, p. 13-21, 1973.
- ZHENG, Q.J.; YU, A.B. (2015) Finite element investigation of the flow and stress patterns in conical hopper during discharge. **Chemical Engineering Science**. v. 129, p. 49-57.
- ZIENKIEWICZ, O. C. (1970) **The finite element method from intuition to generality appl. mech.** Rev. 23: 249-56.
- ZHONG, Z.; OOI, J. Y.; ROTTER, J. M. The sensitivity of silo flow and wall stresses to filling method. **Engineering structures**, v. 23, n. 7, p. 756-767, 2001.

9. Equipe de pesquisadores

Pesquisadores	Título e Instituição	Atribuição
Wisner Coimbra de Paula	Doutorando em Engenharia Agrícola - Universidade Federal de Lavras (UFLA)	Elaboração e execução das atividades
Francisco Carlos Gomes	Dr. Engenharia de Estruturas – Professor titular da Universidade Federal de Lavras (UFLA)	Orientador
José Wallace Barbosa do Nascimento	Dr. Engenharia Civil – Professor titular da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)	Coorientador
Rômulo Marçal Gandia	Doutorando em Engenharia Agrícola - Universidade Federal de Lavras (UFLA)	Colaborador
Estácio Antunes de Oliveira Júnior	Graduando em Engenharia Agrícola - Universidade Federal de Lavras (UFLA)	Colaborador
Luiz Felipe Souza	Graduando em Engenharia Agrícola - Universidade Federal de Lavras (UFLA)	Colaborador