



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

---



**MARIVONE ZANELLA FANK**

**PRESSÕES EM SILOS VERTICAIS CILÍNDRICOS METÁLICOS:  
DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL E CÁLCULOS TEÓRICOS POR  
NORMAS ESTRANGEIRAS**

Campina Grande, Paraíba

Agosto de 2017

**MARIVONE ZANELLA FANK**

**PRESSÕES EM SILOS VERTICAIS CILÍNDRICOS METÁLICOS:  
DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL E CÁLCULOS TEÓRICOS POR NORMAS  
ESTRANGEIRAS**

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

Orientador: Prof. Dr. José Wallace B. do Nascimento

Co-Orientador: Prof. Dr. Décio Lopes Cardoso

Campina Grande, Paraíba

Agosto de 2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

F212p

Fank, Marivone Zanella.

Pressões em silos verticais cilíndricos metálicos : determinação experimental e cálculos teóricos por normas estrangeiras / Marivone Zanella Fank. – Campina Grande, 2017.

152 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2017.

"Orientação: Prof. Dr. José Wallace B. do Nascimento, Prof. Dr. Décio Lopes Cardoso".

Referências.

1. Fluxo de Grãos. 2. Produtos Agrícolas - Armazenamento. 3. Silos - Problemas Estruturais. I. Nascimento, José Wallace B. do. II. Cardoso, Décio Lopes. III. Título.

CDU 631.24(043)



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE

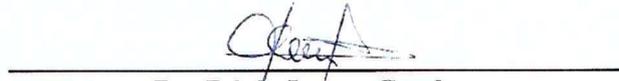
**MARIVONE ZANELLA FANK**

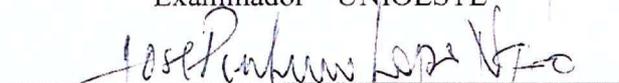
**“PRESSÕES EM SILOS VERTICAIS CILÍNDRICOS METÁLICOS:  
DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL E CÁLCULOS TEÓRICOS POR  
NORMAS ESTRANGEIRAS”**

**APROVADA: 31 de agosto de 2017**

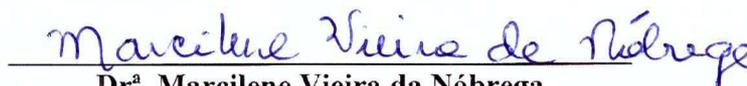
**BANCA EXAMINADORA**

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

  
**Dr. Décio Lopes Cardoso**  
Examinador – UNIOESTE

  
**Dr. José Pinheiro Lopes Neto**  
Examinador - UAEA/CTRN/UFCA

  
**Dr. Marcos Antônio de Souza Simplício**  
Examinador – UAEC/CTRN/UFCA

  
**Dr.ª. Marcilene Vieira da Nóbrega**  
Examinadora – UFERSA/CMA/DENG

***Ofereço***

*Ofereço essa conquista aos meus pais Paulino Zanella e Iraci Zanella.*

***Dedico***

*Dedico esta realização ao meu esposo Lotário Fank e aos nossos filhos Felipe e Murilo, meus grandes incentivadores.*

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho não é resultado apenas de um esforço individual; ele se concretiza por causa de importantes contribuições de pessoas e instituições que foram fundamentais nessa construção. Assim, consciente de não conseguir listar todas as pessoas que ajudaram de alguma maneira na construção deste trabalho, quero expressar meus agradecimentos.

Agradeço à Universidade Federal de Campina Grande - UFCG pela oportunidade de cursar o programa de pós-graduação e pelo empréstimo das células de pressão.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, campus Pato Branco, pelo incentivo e valorização à capacitação e pelo empréstimo do equipamento de aquisição de dados.

À FUNGEO, na pessoa do seu Diretor, o geólogo Gerson Ângelo Lorenzi, sempre parceira em pesquisas desenvolvidas por pesquisadores da UNIOESTE, pelo auxílio técnico prestado e pelo empréstimo das células de carga.

À Universidade Estadual do Paraná, UNIOESTE campus Cascavel, por disponibilizar diversos profissionais para execução do projeto e pelo empréstimo das células de pressão.

Ao Engenheiro Lucas Sartori, representante da empresa CONSILOS, pela parceria de longa data; pela disponibilização e auxílio técnico dos seus engenheiros, bem como, fornecimento de mão de obra especializada para a instalação dos equipamentos e material necessário, viabilizando assim, a plena execução da proposta experimental.

À cooperativa COPAGRIL, por disponibilizar o silo para a instrumentação e todo o apoio de seus funcionários para a implantação do experimento.

Ao Engenheiro Civil, Dr. Luciano Jorge de Andrade Jr, representante da empresa XA Engenharia e Consultoria pelas orientações, bem como, ao Engenheiro Civil Lucas Koehler Severino pelo apoio e suporte às tentativas de se idealizar um modelo numérico em MEF.

Ao Engenheiro Civil Ms. Fábio Luiz Wilrich do Laboratório de Concreto da ITAIPU Binacional pelo auxílio técnico, calibração dos equipamentos, acompanhamento da implantação em campo da instrumentação e pela parceria e amizade de longa data.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão do auxílio financeiro.

Aos professores orientadores, Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento e Dr. Décio Lopes Cardoso, agradeço imensa e carinhosamente pela atenção, dedicação e

confiança, sobretudo pelo conhecimento compartilhado, serenidade e disponibilidade nos momentos de maior tensão.

Ao professor Dr. Rogério Rizzi, do departamento de Computação da Unioeste, agradeço a parceria, as orientações e disponibilidade dos bolsistas Fabrício, Leonardo, Peterson, Juliano e Thiago para as tentativas de desenvolvimento do modelo numérico, bem como, disponibilidade de computadores do laboratório do grupo.

Aos professores do departamento de Engenharia Elétrica da UTFPR - Campus Medianeira, em especial ao Prof. Dr. Estor Gnoato.

A todos os professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFCG pela imensa contribuição em minha capacitação profissional, especialmente o Prof. José Pinheiro Lopes Neto, pelas valiosas contribuições e receptividade.

Ao professor Dr. Marcos Antônio de Souza Simplício pelas contribuições.

Agradeço ainda, a todos meus colegas da pós-graduação, em especial às amigas Delka e Ariadne que sempre me representaram junto à coordenação no período em que estive distante.

Meus cunhados, Eugênio e Cléria que carinhosamente me acolheram em seu lar, contribuindo para a minha caminhada tornar-se mais serena.

Aos meus amados pais Paulino e Iraci, meus irmãos Valdecir, Edemar, Marilei e Claudia e meus filhos Felipe e Murilo, os quais, nos momentos de maior tensão, proporcionaram momentos leves e descontraídos.

Agradeço à minha família pelo apoio, dedicação e principalmente pela compreensão de minhas constantes ausências e momentos de tensão e estresse. Sou imensamente grata a meu esposo Lotário Fank pelo apoio, colaboração, incentivo, amor e carinho incondicional.

Agradeço a Deus por permitir concluir mais esta caminhada e viver esse momento tão significativo em minha vida.

A todos, expresso o meu mais sincero e carinhoso agradecimento.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Definição e classificação .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2</b>	<b>Considerações sobre o projeto de silos .....</b>	<b>23</b>
<b>3.3</b>	<b>Propriedades físicas e mecânicas dos produtos sólidos granulares .....</b>	<b>24</b>
3.3.1	Teor de umidade.....	27
3.3.2	Granulometria.....	28
3.3.3	Peso específico ( $\gamma$ ).....	28
3.3.4	Ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ) e efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ).....	29
3.3.5	Coesão (c).....	33
3.3.6	Ângulo de atrito do grão com a parede do silo ( $\phi_w$ ).....	34
3.3.7	Ângulo de repouso ( $\phi_r$ ).....	36
3.3.8	Função fluxo (FF) e índice de fluxo (ff).....	37
3.3.9	Coeficiente K.....	39
3.3.10	Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), Módulo de elasticidade (E) e ângulo de dilatação ( $\psi$ ) .....	44
<b>3.4</b>	<b>Projeto de fluxo.....</b>	<b>49</b>
<b>3.5</b>	<b>Pressões em silos exercidas pelos produtos armazenados .....</b>	<b>53</b>
3.5.1	Teoria de Janssen para a distribuição das tensões.....	58
<b>3.6</b>	<b>Normas estrangeiras.....</b>	<b>68</b>
3.6.1	Norma EN 1994-4: 2006, Eurocode 1 .....	70
3.6.1.1	Pressões estáticas ou de carregamento nas paredes de silos medianamente esbeltos.....	76
3.6.1.1.1	Pressões simétricas de carregamento .....	77

3.6.1.1.2	Pressão adicional no carregamento .....	79
3.6.1.1.3	Pressões em fundo plano.....	81
3.6.1.2	Pressões dinâmicas ou de descarregamento nas paredes de silos medianamente esbeltos.....	82
3.6.1.2.1	Pressões simétricas no descarregamento .....	82
3.6.1.2.2	Pressão adicional no descarregamento.....	84
3.6.1.2.3	Pressões em fundo plano.....	84
3.6.2	Norma australiana AS 3774 .....	84
3.6.2.1	Pressões estáticas ou de carregamento .....	87
3.6.2.2	Pressões dinâmicas ou de descarregamento .....	88
3.6.3	Norma americana ANSI/ASAE EP433 .....	90
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>92</b>
<b>4.1</b>	<b>Características do silo instrumentado .....</b>	<b>92</b>
<b>4.2</b>	<b>Propriedades do material do silo .....</b>	<b>93</b>
<b>4.3</b>	<b>Caracterização das propriedades físicas e de fluxo dos grãos.....</b>	<b>94</b>
<b>4.4</b>	<b>Instrumentação das partes constituintes do silo.....</b>	<b>95</b>
4.4.1	Calibração das células de carga e células de pressão .....	97
4.4.1.1	Calibração das células de pressão tipo 1 .....	98
4.4.1.2	Calibração das células de pressão tipo 2 .....	99
4.4.1.3	Calibração das células de carga tipo 3.....	100
4.4.2	Instrumentação dos montantes .....	101
4.4.3	Instrumentação das paredes verticais .....	104
4.4.4	Instrumentação do fundo do silo .....	107
4.4.5	Coleta e sistematização dos dados.....	109
4.4.6	Comparação entre os valores experimentais e teóricos.....	109
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>110</b>
<b>5.1</b>	<b>Propriedades dos grãos de milho .....</b>	<b>110</b>
<b>5.2</b>	<b>Pressões teóricas e experimentais .....</b>	<b>111</b>
5.2.1	Ciclo 1 .....	111

5.2.1.1	Pressões verticais no ciclo 1 .....	112
5.2.1.2	Pressões horizontais no ciclo 1.....	117
5.2.1.3	Coeficiente K do ciclo 1 .....	126
5.2.2	Ciclo 2 .....	127
5.2.2.1	Pressões verticais no ciclo 2.....	128
5.2.2.2	Pressões horizontais no ciclo 2.....	132
5.2.2.3	Coeficiente K do ciclo 2.....	141
5.2.3	Ciclo 3 .....	142
5.2.3.1	Pressões verticais no ciclo 3.....	143
5.2.3.2	Pressões horizontais no ciclo 3.....	146
5.2.3.3	Coeficiente K para o ciclo 3 .....	153
5.2.3.4	Pressões de atrito no ciclo 3 .....	154
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>159</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>161</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Partes constituintes de um silo: Silo com fundo plano (A); Silo com fundo cônico (B).....	21
<b>Figura 2.</b> Esquema do aparelho de cisalhamento direto, <i>Jenike Shear Cell</i> .....	26
<b>Figura 3.</b> Estado de tensões em dois pontos no interior do silo e curva característica de pressões resultantes do armazenamento de líquidos e sólidos a granel.....	30
<b>Figura 4.</b> Esquema da célula de Jenike para a determinação do atrito entre os grãos.....	32
<b>Figura 5.</b> Curvas do ensaio para determinação de propriedades físicas do produto.....	32
<b>Figura 6.</b> Representação gráfica nos semicírculos do Mohr do ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e coesão. ....	33
<b>Figura 7.</b> Substituição da base da célula de cisalhamento de Jenike por uma amostra do material da parede.....	34
<b>Figura 8.</b> Curvas para determinação do ângulo de atrito grão-parede.....	35
<b>Figura 9.</b> Comportamento do deslizamento nas chapas corrugadas (trapezoidal e ondulada). ....	36
<b>Figura 10.</b> Representação da determinação do ângulo de repouso.....	37
<b>Figura 11.</b> Função Fluxo dos produtos. ....	38
<b>Figura 12.</b> Variação do comportamento do coeficiente K devido à movimentação relativa da parede do silo. ....	39
<b>Figura 13.</b> Deformação transversal e longitudinal de uma barra: Para tração (A) e Para compressão (B). ....	45
<b>Figura 14.</b> Curva característica da tensão vs deformação. ....	46
<b>Figura 15.</b> Representação da dilatação nas linhas de deslizamento. ....	47
<b>Figura 16.</b> Padrões básicos de fluxo: Fluxo de massa (A); Fluxo de funil tipo tubo (B) e Fluxo de funil misto (C). ....	50
<b>Figura 17.</b> Comportamento do fluxo dos grãos de milho em silo modelo de fundo plano.	50
<b>Figura 18.</b> Determinação gráfica do tipo de fluxo conforme a norma europeia para silo com tremonha plana.....	51
<b>Figura 19.</b> Determinação gráfica do tipo de fluxo conforme a norma europeia para tremonha cônica.....	51
<b>Figura 20.</b> Pressões atuantes no corpo e fundo do silo.....	53
<b>Figura 21.</b> Representação do equilíbrio estático da camada elementar de Janssen.....	58

<b>Figura 22.</b> Características geométricas e denotação de pressões: Geometria (A); Excentricidades (B) e Tensões (C).....	71
<b>Figura 23.</b> Formas de seção transversal: Circular (A); Quadrada (B); Retangular (C) e Hexagonal (D)..	72
<b>Figura 24.</b> Superfície equivalente e diagramas (distribuição de pressões horizontais) em silos baixos ou medianamente esbelto.....	77
<b>Figura 25.</b> Excentricidades .....	79
<b>Figura 26.</b> Distribuição da pressão adicional .....	80
<b>Figura 27.</b> Indicação das componentes à determinação das pressões no fundo de silos planos.....	82
<b>Figura 28.</b> Dimensões das chapas corrugadas. ....	87
<b>Figura 29.</b> Padrões de fluxo: fluxo tipo funil (A); Fluxo tipo <i>plug</i> (B).....	90
<b>Figura 30.</b> Detalhe da implantação dos silos e características geométricas. ....	93
<b>Figura 31.</b> Geometria da chapa metálica constituinte do silo.....	94
<b>Figura 32.</b> Medidor de umidade e temperatura: Modelo do equipamento (A); Resultados observados (B).....	94
<b>Figura 33.</b> Vista do silo em estudo. ....	96
<b>Figura 34.</b> Distribuição das células em $\frac{1}{4}$ do silo: Locação geral, em planta, dos pontos de instrumentação do silo (A); Vista (B). ....	96
<b>Figura 35.</b> Tipos de células a serem utilizadas: Tipo 1 (A); Tipo 2 (B); Tipo 3 (C).....	97
<b>Figura 36.</b> Calibração das células do tipo 1.....	99
<b>Figura 37.</b> Calibração das células do tipo 2.....	99
<b>Figura 38.</b> Calibração das células do tipo 3.....	100
<b>Figura 39.</b> Montagem do equipamento para calibração das células no laboratório. ....	101
<b>Figura 40.</b> Sistema de aquisição de dados: Painel frontal (A); Portas de conexões e <i>slots box</i> (B); <i>Slot</i> (C). ....	101
<b>Figura 41.</b> Distribuição das células nos montantes. ....	102
<b>Figura 42.</b> Posicionamento das células de carga nos montantes. ....	102
<b>Figura 43.</b> Detalhe do posicionamento inicial da célula do montante: Vista (A); Corte (B). ....	103
<b>Figura 44.</b> Detalhe do suporte inicial das células dos montantes: Montagem (A); Peça fletida (B).....	103
<b>Figura 45.</b> Placas que substituíram o suporte inicial das células: Configuração (A); Montagem (B). ....	104

<b>Figura 46.</b> Posicionamento das células na parede do silo: Posição horizontal (A); Posição vertical (B).....	105
<b>Figura 47.</b> Detalhe do posicionamento das células na parede do silo: Detalhe do suporte de fixação (A); Célula instalada (B).....	106
<b>Figura 48.</b> Instalação das células na parede do silo: Alinhamento vertical P1 sendo executado (A); Alinhamentos verticais P1 e P2 prontos (B).....	107
<b>Figura 49.</b> Detalhe da posição das células no fundo do silo: Planta (A); Células instaladas no fundo do silo (B).....	108
<b>Figura 50.</b> Posicionamento das células para determinação do parâmetro K. ....	108
<b>Figura 51.</b> Instalação do sistema de aquisição de dados: Montagem (A); Localização da casa de controle em relação ao silo instrumentado (B). ....	109
<b>Figura 52.</b> Carga e descarga dos grãos de milho no silo para o ciclo 1.....	112
<b>Figura 53.</b> Pressões verticais experimentais em função do carregamento no ciclo 1.....	113
<b>Figura 54.</b> Pressões verticais teóricas e experimentais no carregamento do ciclo 1. ....	114
<b>Figura 55.</b> Pressões verticais teóricas e experimentais no descarregamento.....	116
<b>Figura 56.</b> Pressões horizontais experimentais na profundidade $0,32.z$ em função da carga no silo. ....	118
<b>Figura 57.</b> Pressões horizontais experimentais na profundidade $0,54.z$ em função da carga no silo. ....	119
<b>Figura 58.</b> Pressões horizontais experimentais na profundidade $0,78.z$ em função da carga no silo. ....	120
<b>Figura 59.</b> Pressões horizontais experimentais na profundidade $0,99.z$ em função da carga no silo. ....	121
<b>Figura 60.</b> Pressões horizontais teóricas e experimentais no carregamento para o ciclo 1. ....	122
<b>Figura 61.</b> Pressões horizontais teóricas e experimentais no descarregamento do ciclo 1. ....	124
<b>Figura 62.</b> Pressões verticais e horizontais para avaliação do coeficiente K (ciclo 1)....	127
<b>Figura 63.</b> Carregamento e descarregamento diário de grãos de milho do silo durante o ciclo 2. ....	128
<b>Figura 64.</b> Pressões verticais experimentais no fundo do silo nas fases de carregamento e descarregamento dos grãos de milho (ciclo 2). ....	129
<b>Figura 65.</b> Pressões verticais máximas teóricas e experimentais no fundo do silo no carregamento (ciclo 2). ....	130

<b>Figura 66.</b> Pressões verticais teóricas e experimentais no descarregamento (ciclo 2). ....	131
<b>Figura 67.</b> Pressões horizontais experimentais na profundidade 0,32.z em função da carga no silo no ciclo 2.....	133
<b>Figura 68.</b> Pressões horizontais experimentais na profundidade 0,54.z em função da carga no silo para o ciclo 2.....	134
<b>Figura 69.</b> Pressões horizontais experimentais na profundidade 0,78.z em função da carga no silo do ciclo 2.....	135
<b>Figura 70.</b> Pressões horizontais experimentais na profundidade 0,99.z em função da carga no silo do ciclo 2.....	136
<b>Figura 71.</b> Pressões horizontais teóricas e experimentais no carregamento do ciclo 2....	137
<b>Figura 72.</b> Pressões horizontais teóricas e experimentais no descarregamento do ciclo 2. ....	138
<b>Figura 73.</b> Pressões verticais e horizontais para avaliação do coeficiente K (ciclo 2). ....	141
<b>Figura 74.</b> Carregamento e descarregamento diário de grãos de milho no silo durante o terceiro ciclo. ....	142
<b>Figura 75.</b> Pressões verticais experimentais (ciclo 3). ....	143
<b>Figura 76.</b> Pressões verticais teóricas e experimentais no carregamento do ciclo 3. ....	144
<b>Figura 77.</b> Pressões verticais teóricas e experimentais no descarregamento (ciclo 3). ....	145
<b>Figura 78.</b> Pressões horizontais experimentais na profundidade 0,32.z (ciclo 3). ....	147
<b>Figura 79.</b> Pressões horizontais experimentais na profundidade 0,54.z (ciclo 3). ....	147
<b>Figura 80.</b> Pressões horizontais experimentais na profundidade 0,78.z (ciclo 3). ....	148
<b>Figura 81.</b> Pressões horizontais experimentais na profundidade 0,99.z em função da carga no silo. ....	149
<b>Figura 82.</b> Pressões horizontais teóricas e experimentais no carregamento do ciclo 3....	150
<b>Figura 83.</b> Pressões horizontais teóricas e experimentais no descarregamento do ciclo 3. ....	151
<b>Figura 84.</b> Pressões verticais e horizontais para avaliação do coeficiente K (ciclo 3). ....	154
<b>Figura 85.</b> Força registrada nos montantes em função da carga no silo (ciclo 3). ....	155
<b>Figura 86.</b> Variação da força de atrito na parede com a profundidade no carregamento.	156
<b>Figura 87.</b> Variação da força de atrito na parede com a profundidade no descarregamento. ....	157

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Valores característicos de parâmetros físicos recomendados pela norma AS 3774 para alguns produtos.....	24
<b>Tabela 2.</b> Limites apropriados a serem aplicados aos parâmetros de projeto do silo.....	25
<b>Tabela 3.</b> Propriedade dos produtos .....	26
<b>Tabela 4.</b> Classificação dos produtos conforme sua granulometria .....	28
<b>Tabela 5.</b> Classificação da fluidez dos produtos segundo Jenike .....	38
<b>Tabela 6.</b> Classificação do índice de fluxo de produtos sólidos.....	39
<b>Tabela 7.</b> Formulações para determinação de K de acordo com os principais autores .....	42
<b>Tabela 8.</b> Valores de K encontrados para o milho conforme diferentes formulações.....	42
<b>Tabela 9.</b> Normas e suas respectivas formulações para o parâmetro K .....	43
<b>Tabela 10.</b> Valores das propriedades mecânicas recomendado para diferentes produtos ..	48
<b>Tabela 11.</b> Valores médios das propriedades mecânicas dos produtos estudados .....	48
<b>Tabela 12.</b> Classe das ações em silos .....	73
<b>Tabela 13.</b> Classificação da esbeltes do silo.....	73
<b>Tabela 14.</b> Classificação dos silos segundo a aspereza da parede.....	74
<b>Tabela 15.</b> Classificação dos silos conforme a espessura da parede .....	74
<b>Tabela 16.</b> Combinação dos limites extremos das propriedades para o cálculo das máximas pressões.....	75
<b>Tabela 17.</b> Propriedades físicas do milho e seus respectivos fatores de conversão recomendados pela norma EUROCODE 1 .....	76
<b>Tabela 18.</b> Classificação dos tipos de silos conforme a norma AS 3774 .....	85
<b>Tabela 19.</b> Valores apropriados das propriedades dos produtos.....	86
<b>Tabela 20.</b> Fator de sobrepressão e propriedades do material .....	91
<b>Tabela 21.</b> Propriedades mecânicas do material constituinte do silo .....	93
<b>Tabela 22.</b> Níveis de carregamento utilizados nos ensaios JENIKE .....	95
<b>Tabela 23.</b> Propriedades experimentais do grão de milho.....	110
<b>Tabela 24.</b> Coeficiente efetivo de atrito grão-parede e K conforme respectivos códigos normativos .....	110
<b>Tabela 25.</b> Resultados dos valores experimentais e teóricos da pressão vertical no fundo do silo durante o carregamento.....	115
<b>Tabela 26.</b> Resultados dos valores experimentais e teóricos da pressão vertical no fundo do silo durante o descarregamento .....	116

<b>Tabela 27.</b> Pressões máximas teóricas e experimentais no carregamento.....	123
<b>Tabela 28.</b> Pressões máximas teóricas e experimentais no descarregamento .....	125
<b>Tabela 29.</b> Variação percentual entre as pressões experimentais e teóricas.....	125
<b>Tabela 30.</b> Coeficiente de sobrepressão no ciclo 1.....	126
<b>Tabela 31.</b> Resultados dos valores máximos experimentais e teóricos da pressão vertical no fundo do silo durante o carregamento no ciclo 2 .....	130
<b>Tabela 32.</b> Resultados dos valores experimentais e teóricos da pressão vertical no fundo do silo durante o descarregamento no ciclo 2.....	132
<b>Tabela 33.</b> Pressões máximas teóricas e experimentais no carregamento do ciclo 2.....	138
<b>Tabela 34.</b> Pressões máximas teóricas e experimentais no descarregamento do ciclo 2..	139
<b>Tabela 35.</b> Variação percentual entre as pressões experimentais e teóricas do ciclo 2....	140
<b>Tabela 36.</b> Coeficiente de sobrepressão no ciclo 2.....	140
<b>Tabela 37.</b> Valores experimentais e teóricos da pressão vertical durante o carregamento .....	145
<b>Tabela 38.</b> Resultados dos valores experimentais e teóricos da pressão vertical no fundo do silo durante o descarregamento .....	146
<b>Tabela 39.</b> Pressões máximas teóricas e experimentais no carregamento.....	150
<b>Tabela 40.</b> Pressões máximas teóricas e experimentais no descarregamento .....	152
<b>Tabela 41.</b> Erro percentual entre as pressões experimentais e teóricas .....	152
<b>Tabela 42.</b> Coeficiente de sobrepressão no ciclo 3.....	153
<b>Tabela 43.</b> Força pontual aplicada nos montantes .....	158

## **PRESSÕES EM SILOS VERTICAIS CILÍNDRICOS METÁLICOS: DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL E CÁLCULOS TEÓRICOS POR NORMAS ESTRANGEIRAS**

**RESUMO** – O fluxo de grãos é um fenômeno dinâmico que apresenta não linearidade, responsável pela ocorrência de problemas estruturais em silos, assumindo particular interesse no Brasil pelo fato do país não possuir norma de dimensionamento e projeto dessas estruturas. Buscou-se neste trabalho contornar essa limitação pela avaliação das pressões por instrumentação de um silo em verdadeira grandeza e utilização de três normas estrangeiras, EN 1991-4, ANSI/ASAE EP433 e AS 3774. A instrumentação deu-se por células de carga e de pressão ao longo das paredes, no fundo e nos montantes do silo. Foram obtidos os perfis das pressões horizontais, verticais e de arrasto, durante as fases de carregamento, estocagem e descarregamento de grãos de milho. A distribuição das pressões verticais no fundo do silo mostrou ser variável ao longo do seu raio, em acordo com a formulação do código AS 3774, alternativa à hipótese simplificadora de distribuição uniforme dos demais. Foi também observado experimentalmente a não ocorrência de sobrepressão, corroborando com as normas EN 1991-4 e ANSI/ASAE EP433 para o tipo de fluxo desta análise. A variação das pressões horizontais com a altura do silo indicou que a norma americana subestima os esforços e as normas europeia e australiana dão valores próximos entre si e aos experimentais. O coeficiente K mostrou-se variável durante o fluxo, refletindo mudança no estado de tensões para a condição passiva no descarregamento. A transferência das cargas aos montantes foi de 35 %, sendo que as normas ANSI/ASAE EP433, EN-1991-4 e AS 3774 majoram essa transferência em 8,34 %, 60,30 % e 143,62 %, respectivamente, refletindo divergência entre essas prescrições, o que destaca a importância de se buscar um código normativo aplicado à realidade brasileira.

**Palavras-chave:** fluxo de grãos, armazenamento, estrutura, tensões, instrumentação.

# **PRESSURES IN VERTICAL CYLINDRICAL METALLIC SILOS: EXPERIMENTAL DETERMINATION AND THEORETICAL CALCULATIONS BY FOREIGN NORMS**

**ABSTRACT** - The grain flow is a dynamic phenomenon that presents nonlinearity, responsible for the occurrence of structural problems in silos, assuming particular interest in Brazil because the country does not have a design standard of these structures. The aim of this work was to overcome this limitation by evaluating the pressures by instrumentation of a silo in true magnitude and using three foreign standards, EN 1991-4, ANSI/ASAE EP433 and AS 3774. The instrumentation was made by load and pressure cells along the walls, bottom and uprights of the silo. The horizontal, vertical and trawl pressure profiles were obtained during the loading, storage and unloading phases of corn grains. The vertical pressure distribution in the silo bottom was shown to be variable along its radius, according to the code AS 3774 formulation, alternative to the simplifying hypothesis of uniform distribution of the others. It was also observed experimentally the non-occurrence of overpressure, corroborating with the EN 1991-4 and the ANSI/ASAE EP433 standards for the flow type of this analysis. The horizontal pressure change with the height of the silo indicated that the American code underestimates the efforts and the European and Australian standards give values close to each other and to the experimental ones. The K coefficient showed to be variable during the flow, reflecting change in the stress state for the passive condition at the discharge. The charge transfer to the uprights was 35%, being that ANSI/ASAE EP433, EN-1991-4 and AS 3774 codes increased the transfer by 8.34%, 60.30% and 143.62%, respectively, reflecting divergence between these prescriptions, which highlights the importance of seeking a normative code applied to the Brazilian reality.

**Key words:** grain flow, storage, structure, stresses, instrumentation.

## 1 INTRODUÇÃO

A produção brasileira de grãos cresceu significativamente nas últimas décadas e na safra 2016-17 alcançou 234,33 milhões de toneladas de grãos segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2017). Essa tendência ao crescimento do volume de produção persiste para anos vindouros, o que pode também aumentar o déficit de armazenagem que é de 58,5 milhões de toneladas. Torna-se imperativo por parte das autoridades e de todos os agentes da cadeia produtiva o planejamento para ampliar a capacidade de armazenagem, além de encontrar soluções para os problemas estruturais das unidades de armazenagem que com muita frequência se apresentam.

Para atender essa demanda, novas e maiores estruturas de armazenamento devem ser construídas e, para que sejam seguras, eficientes e econômicas, é essencial que sejam sanadas muitas das incertezas sobre seu dimensionamento. Problemas de ruptura nos silos existentes são recorrentes, visto que há um desconhecimento do real comportamento dessas estruturas, evidenciado pela não existência de uma norma brasileira de projetos e dimensionamento de silos, levando os projetistas a utilizarem normas estrangeiras cujos parâmetros divergem e, além disso, não retratam as características intrínsecas aos grãos brasileiros. É importante lembrar que um silo é concebido para armazenar uma gama diversificada de sólidos a granel e estes por sua vez, variam muito em suas propriedades, fazendo com que um silo projetado para armazenar adequadamente um determinado material se torne ineficiente e perigoso para armazenar outro.

A complexidade estrutural dos silos tem sido objeto de interesse para engenheiros e pesquisadores há mais de um século, seja por meio de modelos matemáticos, numéricos ou trabalhos experimentais. Dentre os temas estudados, a distribuição das pressões tem se destacado nas diversas áreas de pesquisa relacionadas às estruturas de armazenamento. Contudo, a heterogeneidade dos parâmetros dos produtos armazenados torna complexa a previsão das tensões atuantes e a forma de distribuição destas nas paredes e fundo dos silos, principalmente quando se trata das pressões dinâmicas na descarga. Na previsão dessas pressões, as normas se baseiam na teoria de Janssen, formulada em 1895, que consiste em determinar as pressões no estado estático e corrigi-las por meio de coeficientes multiplicadores de sobrepressão. Assim, paradoxalmente, aplica-se uma abordagem estática para modelagem de um fenômeno dinâmico.

O elevado registro de ocorrências de colapsos de silos demonstra o quanto se desconhece do real comportamento mecânico dessas estruturas. A grande quantidade de

variáveis envolvidas dificulta um formalismo matemático capaz de expressar adequadamente o fenômeno e que se aplique com uma aceitável margem de segurança e economia.

A complexidade dos fluxos de grãos em silos ainda não é suficientemente compreendida para que os critérios de dimensionamento estabelecidos nas normas sejam capazes de abranger todas as situações envolvidas no fenômeno; além disso, os dados relativos à interação entre o meio granular e a estrutura de confinamento, como disponibilizados na literatura, embutem efeitos de escala que nem sempre são contabilizados acuradamente nos modelos de comportamento estrutural.

Compreende-se, dessa forma, que a instrumentação de estruturas em escala real é uma abordagem adequada à aquisição de dados, por mensurar fidedignamente a interação entre o meio granular e a estrutura de confinamento, viabilizando a disponibilização de valores mais próximos aos reais à parametrização realizada.

Assim, postulando que as pesquisas no Brasil devam se pautar pela formação de bancos de dados acerca das especificidades dos grãos, do reconhecimento da complexidade estrutural das unidades armazenadoras e da inexistência de normatização, objetivou-se com este trabalho medir as pressões em silos verticais por instrumentação de um silo em escala real, eliminando incertezas relacionadas ao fator escala, comparando os valores experimentais com os calculados por códigos normativos.

Acredita-se ainda, que tais procedimentos podem trazer substancial contribuição a uma futura e adequada padronização dos projetos e dimensionamentos dos silos e, desta forma, mitigar os problemas de colapsos destas estruturas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Mensurar experimentalmente e avaliar as pressões de um silo em escala real, comparando-as com as calculadas pelos códigos normativos EN 1991-4, AS 3774 e ANSI/ASAE EP433, contribuindo com um âmbito de pesquisa que assegure um procedimento coerente para a quantificação das pressões em um dado modelo de silo.

### **2.2 Objetivos específicos**

- a) Determinar as propriedades físicas e de fluxo de grãos de milho necessárias à obtenção das pressões por meio das formulações teóricas;
- b) Obter os diagramas das pressões teóricas no silo calculadas segundo as normas EN 1991-4, AS 3774 e ANSI/ASAE EP 433 e compará-los com os diagramas das pressões experimentais para avaliar se as normas superestimam ou subestimam os esforços no tipo de silo e de fluxo analisados;
- c) Avaliar experimentalmente a ocorrência de sobrepressão nas paredes do silo, de modo a quantificar a magnitude das pressões nas condições dinâmicas no armazenamento de grãos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Definição e classificação

Conforme a norma europeia EN 1991-4 (EN, 2006), silos são estruturas utilizadas para o armazenamento e a conservação de produtos sólidos particulados, a granel ou pulverulentos, sendo largamente utilizados na agricultura, indústria e mineração. Tais estruturas também são denominadas internacionalmente como *bin* e *bunker* (Lopes Neto, 2009), variando de acordo com o país ou autor que as utilize.

Estas estruturas são constituídas por cobertura, corpo e fundo, podendo este se apresentar de forma plana ou cônica (tremonha), conforme ilustrado na Figura 1A e 1B.

A.



B.



Figura 1. Partes constituintes de um silo: Silo com fundo plano (A); Silo com fundo cônico (B). Fonte: CONSILOS (2016).

O compartimento onde o produto fica armazenado é denominado de célula, podendo o silo ser construído com uma ou mais células (Lobato, 2013). Estas células possuem aberturas no topo e na base, por onde se faz o enchimento e o esvaziamento, respectivamente, sendo o produto descarregado pela ação da gravidade ou por meio de equipamentos apropriados, mecânicos ou pneumáticos. A célula de fundo plano requer menos altura para um determinado volume de material armazenado. O seu custo inicial é

baixo, comparado a outros tipos, e uma das razões pela qual a construção pode ser econômica é que o produto repousa sobre o solo, do qual ele é isolado apenas por uma laje impermeável (Freitas, 2005).

Existe uma grande variedade na tipologia dos silos existentes, tanto por sua forma que pode ser circular, quadrada, retangular ou poligonal, como pelo tipo do material empregado em sua construção, que pode ser madeira, alvenaria, concreto e aço (Garbazza, 2011). No Brasil, os silos cilíndricos construídos a partir de chapas metálicas corrugadas são os mais utilizados para o armazenamento de produtos granulares, por serem de baixo custo e de fácil montagem (Andrade Junior e Calil Junior, 2007). Estas características também fazem com que este tipo de estrutura seja a preferida na maioria dos países industrializados (Ayuga, 2008).

Segundo Cheung (2007) os silos, além de serem classificados de acordo com o tipo do material empregado em sua construção, tipo de fundo e da forma geométrica da célula, também são enquadrados de acordo com a vedação, instalação em relação ao solo e suas dimensões conforme os detalhes a seguir:

- 1) Classificação quanto à entrada de ar (vedação): silos herméticos, semi-herméticos e abertos;
- 2) Quanto à sua instalação em relação à superfície do solo: elevados, superficiais, enterrados e semienterrados;
- 3) De acordo com as dimensões, os silos podem ser separados em:
  - a) Silos baixos ou altos, em função da relação entre a altura (H) e o diâmetro (D);
  - b) Silos verticais ou horizontais, segundo a direção à qual a estrutura se desenvolve.

Existem divergências entre pesquisadores e normas no se refere à classificação dos silos. De acordo com Andrade Júnior e Calil Júnior (2007), em função da relação altura/diâmetro (H/D), os silos são classificados em: curtos quando  $H/D \leq 0,5$ ; médios se  $0,5 \leq H/D < 1,5$ ; e longos para  $H/D > 1,5$ . Já as normas estrangeiras DIN 1055-6 (Deutsche Norm, 2005) e EN 1991-4 (EN, 2006), especificam a seguinte classificação:

- Baixo:  $0,4 \leq \frac{H}{D} < 1,0$
- Medianamente esbelto:  $1,0 \leq \frac{H}{D} < 2,0$
- Esbelto:  $\frac{H}{D} \geq 2,0$

### 3.2 Considerações sobre o projeto de silos

Para que o projeto de uma estrutura seja seguro, econômico e eficiente é necessário que em seu dimensionamento sejam consideradas todas as possíveis solicitações que possam ocorrer durante sua vida operacional. Nos silos, além das ações comuns a outras estruturas como peso próprio, peso de equipamentos, vento, sismos e recalques, existem aquelas decorrentes do produto armazenado tais como pressões verticais e horizontais (estáticas ou dinâmicas) e de atrito nas paredes (Silva e Carvalho, 2015).

A predição exata das forças que atuam no corpo de um silo é um dos principais problemas no que tange ao quesito dimensionamento dessas estruturas, uma vez que, tanto a intensidade quanto a distribuição do carregamento dependem do comportamento do produto, da interação entre o produto armazenado e a parede do silo e, ainda, das propriedades de fluxo durante o processo de carregamento e descarregamento (Lopes Neto et al., 2014a).

Silos mal projetados podem apresentar problemas funcionais como redução ou interrupção da vazão de descarga, problemas estruturais, como deformação e ruptura da estrutura, resultando em perdas materiais e humanas (Dogangun et al., 2009). Apesar dos avanços nos métodos de dimensionamento estrutural de silos para armazenamento de produtos agrícolas, muitos destes problemas persistem, identificando que ainda há muito para se compreender sobre o comportamento do material granular quando armazenado (Ayuga, 2008; Ramírez et al., 2010a).

O projeto completo de um silo inclui o projeto estrutural e o projeto de fluxo: o primeiro deve garantir segurança e estabilidade para que a estrutura resista às solicitações sem atingir os estados limites (último e de serviço) e o segundo deve garantir a funcionalidade da unidade, visando à completa descarga do produto sem que apareçam problemas de obstrução de fluxo (Madrona, 2008). Para tanto, o conhecimento das propriedades físicas do produto a ser armazenado é determinante, pois são elas que definem o tipo de fluxo e a intensidade das pressões que vão ocorrer durante a vida útil do silo.

As estimativas de cargas em silos são apoiadas em duas teorias: a de Jenike (1964), para as estimativas de cargas de fluxo em silos, estando esta diretamente relacionada à determinação das propriedades físicas e de fluxo dos produtos armazenados, e a de Janssen (1895), para estimativa de cargas iniciais ou de carregamento no silo. Janssen conduz um equilíbrio estático no desenvolvimento das suas formulações, as quais

apresentam parâmetros que somente podem ser acuradamente determinados por meio do ensaio de Jenike, este sim, um procedimento que considera as condições dinâmicas de fluxo.

Assim, para o correto dimensionamento e concepção do projeto de um silo, aplicando as formulações advindas destas teorias, a primeira etapa constitui na determinação das propriedades físicas e mecânicas dos produtos a serem armazenados, uma vez que o tipo de fluxo bem como a intensidade e a distribuição das tensões na estrutura são dependentes destas.

### 3.3 Propriedades físicas e mecânicas dos produtos sólidos granulares

De acordo com as formulações propostas por diversos pesquisadores e normas técnicas estrangeiras (Calil Junior e Cheung, 2007; Madrona e Calil Junior, 2009; Lopes Neto, 2009; Costa et al., 2014), as principais propriedades a serem determinadas são: teor de umidade, granulometria, peso específico ( $\gamma$ ), coesão ( $c$ ), ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ), efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ), ângulo de repouso ( $\phi_r$ ), ângulo de atrito grão-parede ( $\phi_w$ ), índice de fluxo ( $ff$ ), função fluxo ( $FF$ ) e o coeficiente  $K$ .

As normas estrangeiras fazem recomendações de valores destas propriedades para alguns produtos, a exemplo da norma Australiana AS 3774 que recomenda os valores conforme mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores característicos de parâmetros físicos recomendados pela norma AS 3774 para alguns produtos

Produto	Efetivo ângulo de atrito interno [°]		Ângulo de atrito grão-parede [°]						Peso específico [KN.m <sup>-3</sup> ]	
	Inf.	Sup.	Tipo D1		Tipo D2		Tipo D3		Médio	Sup.
			Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.		
Açúcar	23	30	15	23	25	28	25	35	8,0	10
Cevada	26	33	15	24	18	27	25	32	7,0	8,5
Cimento	40	50	20	25	23	28	28	33	13,0	16
Farinha de trigo	23	30	15	23	25	28	25	35	6,5	7,5
Milho	28	33	15	25	20	30	25	32	7,0	8,5
Trigo	26	32	15	25	18	30	25	32	7,5	9

Fonte: adaptado de Australian Standard (AS 3774, 1996).

Os valores D1, D2 e D3 dizem respeito ao tipo do material empregado na parede do silo, sendo respectivamente, parede polida, parede lisa e parede rugosa. Os limites superior e inferior devem ser empregados para contemplar uma faixa de variação das propriedades, uma vez que estas podem variar com o tempo de armazenamento. E para obter as combinações mais desfavoráveis, faz-se necessário considerar estas variações, utilizando o menor valor possível (limite inferior) e o maior valor possível (limite superior) de acordo com o parâmetro considerado.

Na Tabela 2 são apresentados os limites apropriados das principais propriedades segundo a norma AS 3774.

Tabela 2. Limites apropriados a serem aplicados aos parâmetros de projeto do silo

Aplicação	Peso específico	Ângulo de atrito grão-parede	Efetivo ângulo de atrito interno	Parâmetro K
Máxima pressão horizontal na parede ( $p_h$ )	Superior	Inferior	Inferior	Superior
Máxima pressão vertical ( $p_v$ )	Superior	Inferior	Superior	Inferior
Máxima força de atrito na parede ( $p_w$ )	Superior	Superior	Inferior	Superior

Fonte: adaptado de Australian Standard (AS 3774, 1996).

As normas recomendam que estes valores sejam utilizados em situações nas quais o custo dos ensaios não justifique a realização dos mesmos, sendo adequadas para pequenas instalações. Para produtos não constantes nas normas, as mesmas trazem recomendações e procedimentos de ensaios clássicos consagrados, destacando o ensaio de cisalhamento direto realizado no aparelho amplamente conhecido como *Jenike Shear Cell*.

Basicamente, o aparelho consiste de uma célula de cisalhamento circular que é colocada sobre a base da máquina; um pendural com pesos, para aplicação de uma carga vertical, por gravidade, na célula; uma haste de carga acionada eletromecanicamente, a qual promove a ação de cisalhamento e se move horizontalmente a uma velocidade constante entre 1 e 3 mm.min<sup>-1</sup>; uma célula de carga para medir a força de cisalhamento e um registrador para indicação dessa força (Silva et al., 2011).

Na Figura 2 é ilustrada uma vista superior e uma lateral do aparelho de cisalhamento direto.

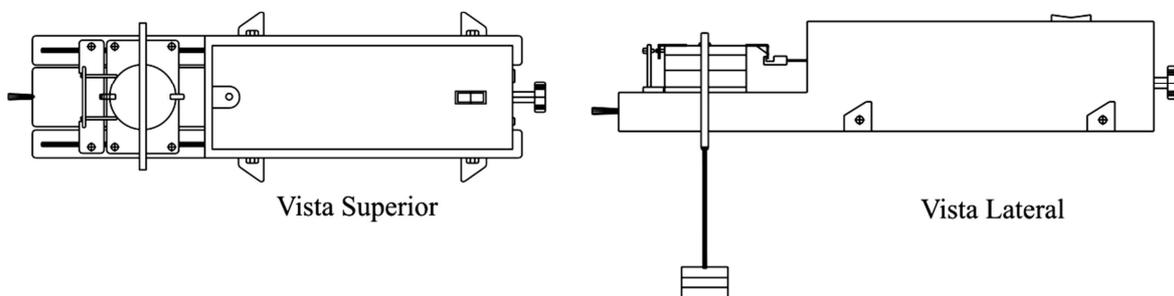


Figura 2. Esquema do aparelho de cisalhamento direto, *Jenike Shear Cell*, (Lopes Neto e Nascimento, 2013).

O *Jenike Shear Test* é baseado no ensaio de cisalhamento direto em solos, com adição de procedimentos de consolidação da amostra, torção (*twist*), para representar o comportamento do produto quando armazenado. No equipamento podem ser determinadas as condições de fluxo esperadas a ocorrerem no silo, sendo possível determinar, diretamente, os parâmetros de peso específico consolidado, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito do produto com a parede, coesão, e indiretamente o índice de fluxo e a função fluxo (Cheung, 2007).

Alguns destes parâmetros foram investigados por Lopes Neto e Nascimento (2013), para três tipos de produtos, sendo que os respectivos valores encontrados são os constantes na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedade dos produtos

Produto	$\gamma_c$ (N.m <sup>-3</sup> )		$\phi_i$ (°)		$\phi_e$ (°)		$\phi_w$ (°)		c (Pa)	ff
	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup		
Milho em grãos	7395,1	7405,5	21,1	22,9	23,9	25,0	13,2	15,8	400,6	13,6
Milho triturado	7441,4	7638,1	25,3	33,3	34,3	38,8	23,0	23,9	935,3	3,8
Farelo de soja	6564,2	6640,1	32,8	35,1	34,1	35,5	23,4	25,0	128,0	54,3

$\gamma_c$  – peso específico consolidado;  $\phi_i$  – ângulo de atrito interno;  $\phi_e$  – efetivo ângulo de atrito interno;  $\phi_w$  – ângulo de atrito do grão com a parede de aço rugoso; c – coesão das partículas; ff – índice de fluxo.

Ao longo do tempo, novas ferramentas e novos métodos vêm sendo empregados no dimensionamento estrutural dos silos, gerando a necessidade de obtenção de parâmetros referentes aos produtos armazenados que outrora não eram comumente usados. Para as análises numéricas, por exemplo, é necessária a parametrização de modelos constitutivos, os quais necessitam de propriedades mecânicas dos produtos armazenados, tais como: módulo de elasticidade ( $E$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e ângulo de dilatação ( $\psi$ ).

Valores correspondentes para estas propriedades ainda são pouco encontrados na literatura técnica, motivo pelo qual estão sendo estudadas por diversos autores, destacando os trabalhos realizados por Ramirez et al. (2010b), Moya et al. (2002, 2006 e 2013) e Costa et al. (2014).

O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas dos produtos agrícolas é de fundamental importância para o dimensionamento e o projeto racional e seguro dos silos, pois as pressões que se desenvolvem estão relacionadas diretamente com estas. Assim, para um melhor entendimento, nos itens seguintes serão explicadas as principais propriedades dos produtos armazenados que devem ser avaliadas.

### **3.3.1 Teor de umidade**

O teor de umidade ou quantidade relativa de água presente no grão influencia nos valores das demais propriedades físicas do produto (Ribeiro et al. 2007; Silva e Correa, 2008; Silva et al. 2011) e os grãos ao serem armazenados devem apresentar porcentagem de umidade ideal à estocagem, com o propósito de garantir a qualidade do produto e da estrutura armazenadora. O milho em grãos, por exemplo, para ser armazenado deve apresentar teor de umidade próximo a 13%, valor este obtido por meio do processo de secagem em secadores e durante o armazenamento é mantido por meio de ventilação e aeração.

Em trabalho realizado com grãos de café, Silva et al. (2011), observaram que a variação no teor de umidade influenciou no ângulo de repouso, no ângulo de atrito interno, na força de coesão e no ângulo de atrito interno com a parede, influenciando, conseqüentemente, no fluxo de descarga do silo. O excesso de água nos grãos, além de comprometer a qualidade do produto, gera um aumento nas forças adesivas entre os grãos, interferindo na coesão e dificultando o fluxo devido ao ganho de resistência, sendo sua determinação um procedimento fundamental para os cálculos de conservação, gastos

energéticos, desenvolvimento de equipamentos e estruturas de armazenagem (Costa, 2013).

### 3.3.2 Granulometria

Granulometria ou análise granulométrica é o processo que visa definir o tamanho dos grãos de acordo com determinadas faixas pré-estabelecidas, sendo realizada pelo método do peneiramento, utilizando a série de peneiras padronizadas pela NBR7181 (ABNT, 2004). Por meio da distribuição granulométrica é possível calcular o diâmetro médio dos grãos, o qual também é importante para o cálculo da quantidade de partículas por superfície ou por volume.

O tamanho dos grãos influencia no tipo de fluxo que se desenvolverá durante as operações de descarga do silo, uma vez que produtos granulares são, via de regra, não coesivos, de fluxo livre e geralmente com pouca ou nenhuma coesão, ao contrário dos produtos pulverulentos, que são coesivos e, a presença elevada de material fino, pó, junto à amostra de grãos pode ocasionar fluxo não-livre (Calil Junior e Cheung, 2007).

De acordo com a norma australiana AS 3774 (1996), os produtos sólidos granulares podem ser classificados conforme o diâmetro de suas partículas de acordo com o apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Classificação dos produtos conforme sua granulometria

Classificação do produto	Diâmetro das partículas (mm)
Pó	< 0,15
Grão Fino	< 3,00
Grão Grosso	< 12,00
Granular	> 12,00
Irregular	Fibras, fibras alongadas e outros

Fonte: adaptado de Garbazza (2011).

### 3.3.3 Peso específico ( $\gamma$ )

Sendo definido como a relação entre a quantidade de massa de partículas sólidas pelo seu volume total, Eq.1, e multiplicado pela aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ), o

peso específico do produto armazenado é utilizado tanto para determinação do tipo de fluxo quanto para o cálculo das tensões exercidas nas paredes do silo.

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad (1)$$

em que:

M - massa das partículas sólidas (kg);

V - volume total (m<sup>3</sup>).

O peso específico dos produtos armazenados apresenta correlação com a sua umidade, bem como com o tipo de carregamento, taxa e a altura de queda durante este processo, ainda, com o tempo de armazenamento e com as sobrepressões que se desenvolvem (Garbazza, 2011). Esses são motivos pelos quais seu valor diverge entre pesquisas e normas, a exemplo dos grãos de milho, em que Moya et al. (2013) sugerem o valor de 7,5 kN.m<sup>-3</sup> para o peso específico aparente ( $\gamma_a$ ), e 12,63 kN.m<sup>-3</sup> para o peso específico consolidado ( $\gamma_c$ ), enquanto a norma EN 1991-4 (2006), recomenda os valores inferiores e superiores de 7,0 kN.m<sup>-3</sup> e 8,0 kN.m<sup>-3</sup> respectivamente.

Conforme Calil Junior (1990) são definidos pelo menos três distintos valores para o peso específico: solto ( $\gamma$ ), compactado ou consolidado ( $\gamma_c$ ) e aerado ou aparente ( $\gamma_a$ ). Para os cálculos das ações atuantes no silo, recomenda-se a utilização do peso específico consolidado, valor determinado por meio de ensaios no aparelho *Jenike Shear Cell*. Já o peso específico aparente é utilizado na estimativa da capacidade de armazenamento do silo, sendo válidas as relações:  $\gamma_a = 0,75\gamma$  e  $\gamma_c = 1,25\gamma$ .

### 3.3.4 Ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ) e efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ )

O ângulo de atrito entre os grãos diz respeito às condições internas do produto armazenado, sendo uma medida de fricção entre os grãos, dependente da rugosidade, da forma e do tamanho das partículas e também do nível de pressões médias aplicadas aos grãos, sendo que um aumento nas pressões de confinamento torna a amostra mais densa, o que permite dizer que o ângulo de atrito entre os grãos varia de acordo com o peso específico e índices de vazios (Nascimento e Calil Junior, 2009).

A principal diferença entre os produtos granulares armazenados e os fluidos é a capacidade dos grãos de transmitir tensões tangenciais oriundas do atrito entre os grãos e as paredes do silo, enquanto que os fluidos possuem somente o estado de tensão hidrostática com tensões tangenciais nulas (Roberts, 1995).

As pressões exercidas pelos grãos nas paredes do silo diferem às dos líquidos conforme ilustrado na Figura 3, na qual as curvas características da pressão horizontal ( $p_h$ ), em função da altura ( $h$ ), identificam a diferença no comportamento quando o produto armazenado é líquido e quando é um sólido granular. Sendo que para os líquidos, a pressão horizontal tem crescimento linear, tomada pela multiplicação do peso específico pela altura analisada. Já para materiais sólidos, esta relação não é verdadeira, pois parte dos esforços é absorvido pelo atrito entre o grão e a parede de contenção.

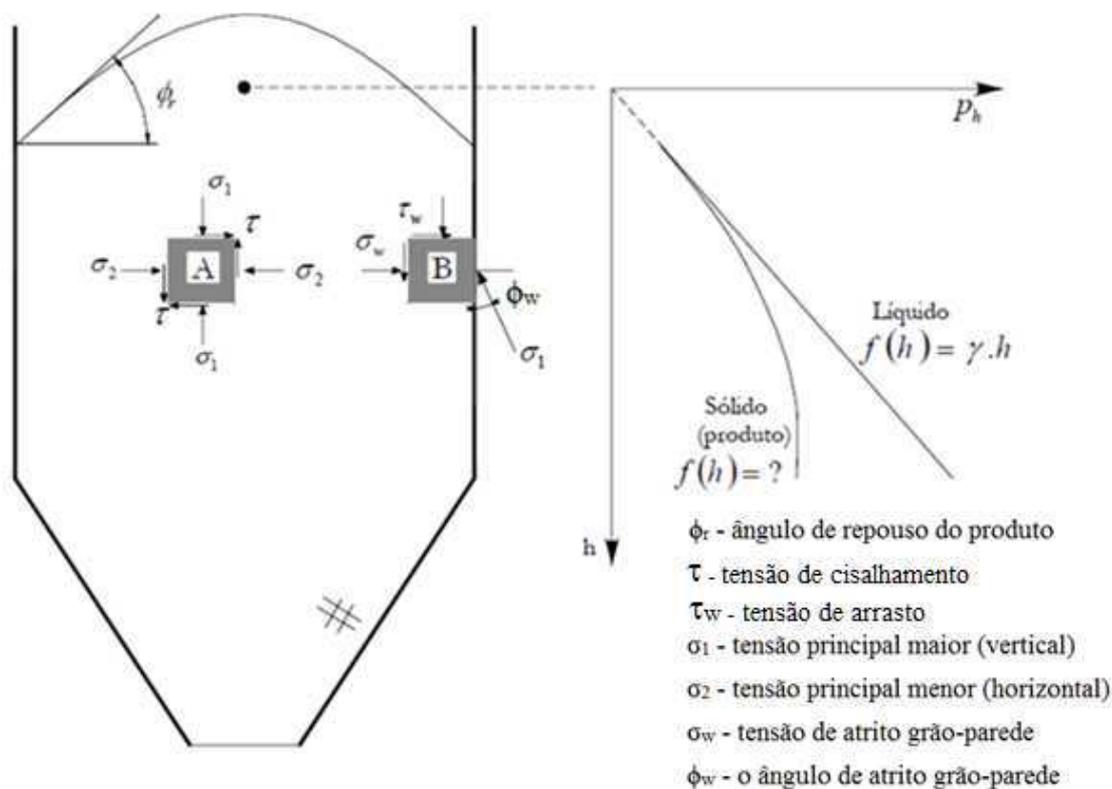


Figura 3. Estado de tensões em dois pontos no interior do silo e curva característica de pressões resultantes do armazenamento de líquidos e sólidos a granel (Cheung, 2007).

No processo de armazenamento de grãos, dois tipos de atrito podem ser distinguido: o atrito externo, que é o atrito do produto armazenado contra o material da parede do silo ou equipamento, e o interno, que é o atrito do produto armazenado contra outro, ou seja, atrito grão-grão. O atrito interno é diferente para cada produto, sendo

dependente do tipo e da superfície do produto, da pressão na superfície do produto (compressão) e da umidade do mesmo (Silva et al, 2006).

Produtos granulares quando armazenados apresentam comportamento que pode ser descrito por meio do critério de ruptura ao deslizamento de Mohr-Coulomb, o qual assume a relação linear entre a tensão normal e a tensão cisalhante (Cheung, 2007; Madrona e Calil Junior, 2009; Gallego et al., 2010). Por este critério, a ruptura ocorre localmente quando é atingido um valor limite da tensão de cisalhamento, influenciada pela tensão normal atuante no mesmo plano, sendo a condição de ruptura por deslizamento expressa pela Eq. 2.

$$\tau(\sigma) = c + \sigma \operatorname{tg}(\phi_i) \quad (2)$$

onde  $\tau$  é a tensão cisalhante no plano de ruptura,  $\sigma$  é a tensão normal no plano de ruptura,  $c$  é a coesão e  $\phi_i$  é o ângulo de atrito interno.

Desta forma, a determinação das propriedades de fluxo dos grãos depende do conhecimento das envoltórias de Mohr-Coulomb, determinadas pela relação entre a tensão cisalhante e a tensão normal, empregando o ensaio de cisalhamento *Jenike Shear Cell*.

Reis (2011), em conformidade com Cheung (2007) e Vieira (2009), resume o ensaio da seguinte maneira: o ensaio de cisalhamento é realizado em duas etapas, a primeira é a consolidação da amostra para obtenção do fluxo de estado estável e do pré-cisalhamento para a definição do lugar geométrico de deslizamento. Na segunda etapa do teste, com diferentes valores de tensões normais, menores que os utilizados na primeira fase, determinam-se as tensões de cisalhamento necessárias para o deslizamento do produto. Uma abordagem detalhada do ensaio bem como as definições e confecções das envoltórias aos semicírculos de Mohr podem ser encontradas em Calil Junior e Cheung (2007).

Para a determinação do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno no aparato *Jenike Shear Cell*, uma amostra do produto é colocada na célula de cisalhamento do aparelho sob uma tensão normal qualquer (Figura 4). Em seguida, é aplicada a carga de pré-cisalhamento, sendo realizados movimentos de translação (consolidação) para acomodar o produto. Desta forma, a amostra é pré-cisalhada, ou seja, o equipamento imprime força de cisalhamento à amostra, sendo este procedimento realizado até o instante em que a tensão cisalhante atinge o valor máximo, limite em que as tensões

passam a ser constantes, dizendo-se então que a amostra está consolidada, atingindo o estado de fluxo estável, sendo possível definir seu plano de deslizamento.

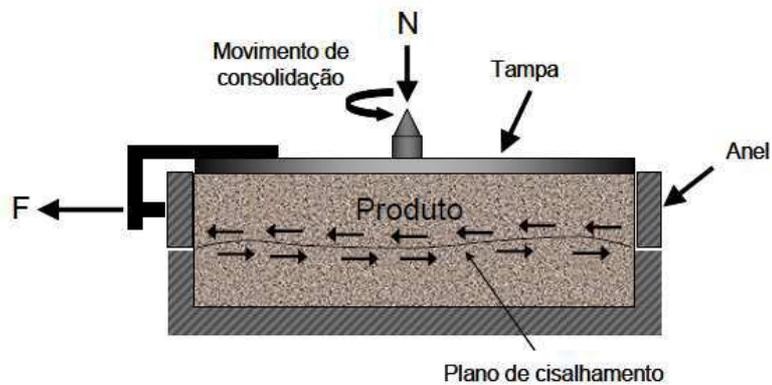


Figura 4. Esquema da célula de Jenike para a determinação do atrito entre os grãos (Calil Junior e Cheung, 2007).

Na sequencia a amostra é cisalhada por meio da aplicação de cargas de cisalhamento, sendo os valores de tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) e de tensão normal ( $\sigma$ ) do material utilizados para traçar as curvas  $\tau$  versus  $\sigma$ , possibilitando o traçado da reta que define o lugar geométrico de deslizamento, conforme ilustrado na Figura 5

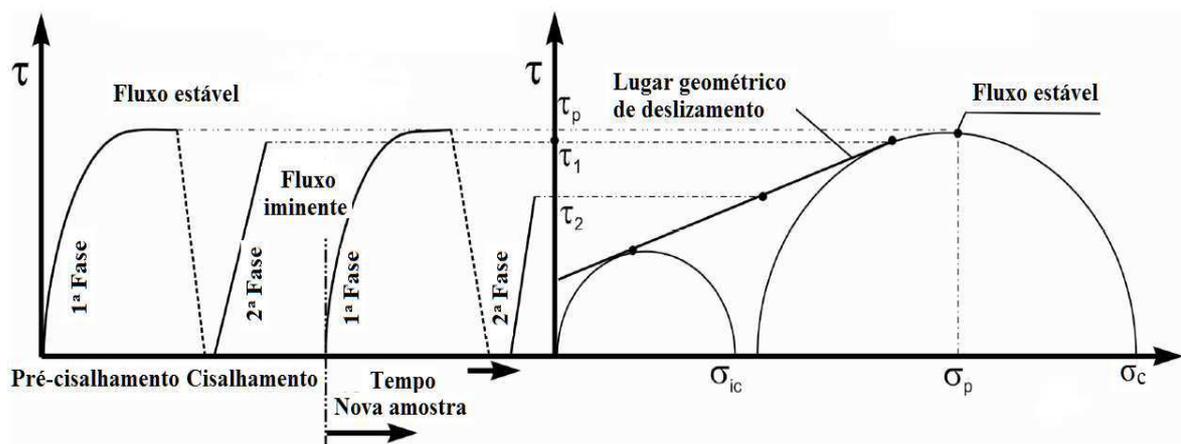


Figura 5. Curvas do ensaio para determinação de propriedades físicas do produto (Calil Junior e Cheung, 2007).

De acordo com a Figura 5. Curvas do ensaio para determinação de propriedades físicas do produto (Calil Junior e Cheung, 2007). Figura 5, a tensão confinante de ruptura ( $\sigma_c$ ) é expressa como o maior valor de tensão normal de pré-cisalhamento, enquanto que a tensão inconfina ( $\sigma_{ic}$ ) corresponde ao maior valor da tensão normal após o pré-

cisalhamento, quando o círculo de Mohr atinge a origem do plano. Para o traçado do maior semicírculo, o valor de tensão cisalhante de pré-cisalhamento ( $\tau_p$ ) corresponde a uma tensão normal principal ( $\sigma_p$ ) (Vieira, 2009).

Conhecendo estes valores, é possível traçar os semicírculos de Mohr, sendo o lugar geométrico de deslizamento definido pela reta que tangencia os semicírculos. O ângulo de inclinação desta reta em relação ao eixo horizontal das tensões normais define o ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ). O efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ), será o ângulo formado entre a linha tangente ao maior semicírculo, passando pela origem, conforme mostrado na Figura 6. Destacando que, quando o produto não é de fluxo livre, a reta que caracteriza o lugar geométrico de deslizamento não passa pela origem, identificando o valor da coesão ( $c$ ) existente entre os grãos, tomado como sendo o intercepto dessa reta com o eixo vertical das tensões cisalhantes. Para materiais não coesivos, o efetivo ângulo de atrito interno coincide com o ângulo de atrito interno, ocorrendo o escoamento livre do material.

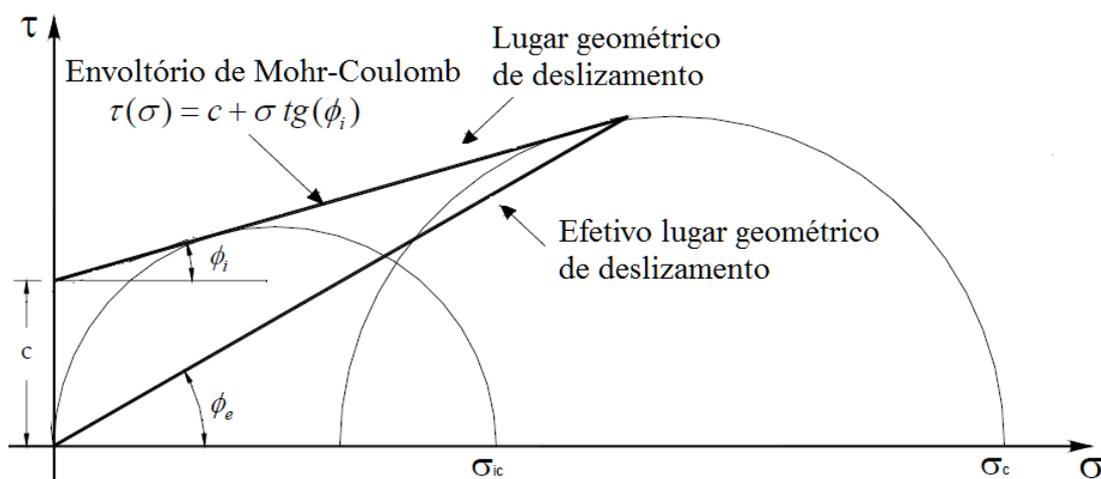


Figura 6. Representação gráfica nos semicírculos do Mohr do ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e coesão. Fonte: Adaptado de Lopes Neto (2009).

### 3.3.5 Coesão ( $c$ )

A coesão é a tensão de cisalhamento sob a tensão normal nula e está diretamente relacionada ao grau de consolidação dos grãos, ou seja, quanto mais consolidados estiverem os grãos, maior será a coesão destes.

A determinação da coesão também pode ser realizada por meio do ensaio *Jenike Shear Cell*. No caso dos grãos de milho, objeto de estudo desta pesquisa, apesar de seu valor ser pequeno, variando de acordo com a maior ou menor quantidade de pó presente na

amostra, foi obtido mediante o referido ensaio, onde a mesma é encontrada estendendo-se o lugar geométrico de deslizamento até interceptar o eixo das tensões cisalhantes ( $\tau$ ), descrevendo assim a coesão de um estado não consolidado (Garbazza, 2011).

### 3.3.6 Ângulo de atrito do grão com a parede do silo ( $\phi_w$ )

Medida do atrito existente entre os grãos e a parede do silo, o atrito grão-parede ( $\phi_w$ ) depende da rugosidade, da forma e do tamanho das partículas e da rugosidade do material empregado na parede, sendo, portanto, maior quando a parede apresentar maior rugosidade. Sua determinação se dá por meio de ensaios no aparelho de cisalhamento de Jenike. Neste caso, aplica-se o mesmo procedimento de cisalhamento, porém, a base da célula de cisalhamento é substituída por uma amostra do material da parede em análise, como ilustrado na Figura 7, e define-se o lugar geométrico da parede para uma série de pressões de consolidação.

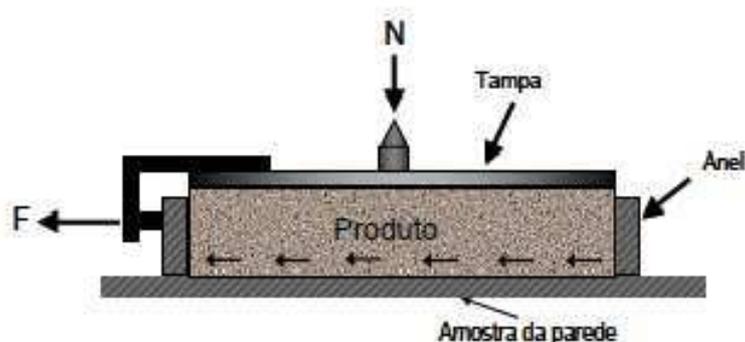


Figura 7. Substituição da base da célula de cisalhamento de Jenike por uma amostra do material da parede.

A tensão de cisalhamento ( $\tau_w$ ), necessária para mover a célula de cisalhamento com o produto armazenado sobre o material da parede, é medida sob diferentes níveis de tensões normais ( $\sigma_w$ ) (Cheung e Calil Junior, 2007; Madrona, 2008; Lopes Neto, 2009; Medeiros, 2012; Costa, 2013). A relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal à parede formará uma reta que definirá o lugar geométrico de deslizamento com a parede e sua inclinação em relação ao eixo  $\sigma$  será o ângulo de atrito do produto com o material da parede do silo ( $\phi_w$ ), conforme ilustrado na Figura 8.

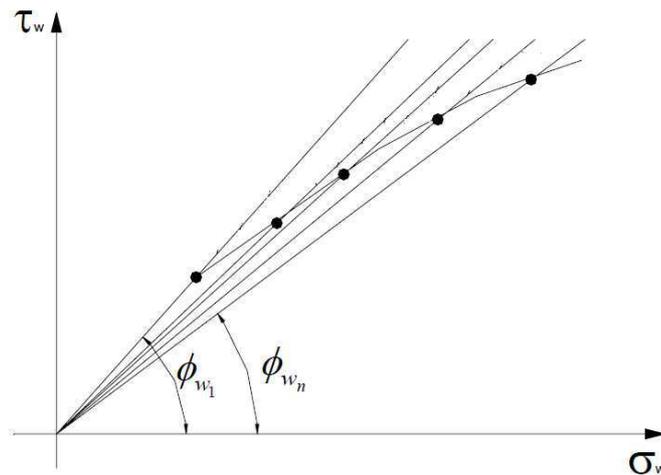


Figura 8. Curvas para determinação do ângulo de atrito grão-parede. Fonte: Adaptado de Jenike (1964).

A relação que define o ângulo de atrito grão-parede ( $\phi_w$ ) é expressa na Eq. 3, bem como o respectivo coeficiente de atrito do grão com a parede ( $\mu_w$ ), sendo determinado pela Eq. 4.

$$\phi_w = \arctg\left(\frac{\tau_w}{\sigma_w}\right) \quad (3)$$

$$\mu_w = \operatorname{tg} \phi_w \quad (4)$$

Com o objetivo de aumentar a inércia da chapa sem aumentar significativamente o consumo de material, as chapas que compõem as paredes dos silos são corrugadas em forma de ondas ou trapézio, conforme mostrado na Figura 10. Desta forma, o atrito desenvolvido se divide em duas partes, uma devido ao contato do grão com a parede e outra entre os grãos estacionários na corrugação da parede. A norma europeia EN 1991-4 (2006), em concordância com a alemã DIN (2005), recomenda que o coeficiente de atrito efetivo ( $\mu_{ef}$ ), para as paredes de chapas de aço corrugadas, seja calculado mediante o uso da Eq. 5, considerando um fator de contato ( $a_w$ ), definido conforme Eq.6.

$$a_w = \frac{b_w}{b_w + b_i} \quad (5)$$

$$\mu_{ef} = (1 - a_w)\tan(\phi_i) + a_w\mu_w \quad (6)$$

onde  $\mu_w$  é o coeficiente de atrito do produto com a parede ensaiada sem a corrugação,  $b_i$  e  $b_w$  representam os comprimentos relativos dentro de uma onda completa da parede e estão indicados na Figura 9, e  $\phi_i$  é o ângulo de atrito interno.

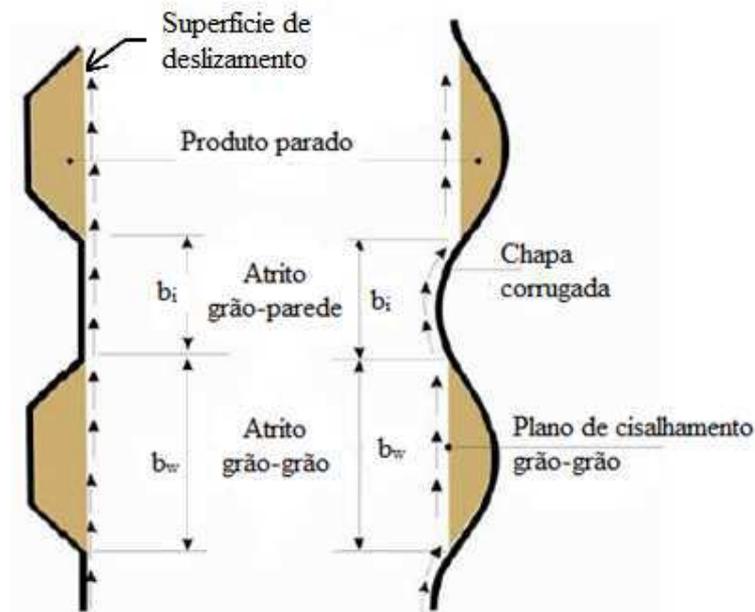


Figura 9. Comportamento do deslizamento nas chapas corrugadas (trapezoidal e ondulada). Adaptado de EN 1991-4 (EN, 2006).

Para chapas onduladas, a norma europeia recomenda o valor de 0,2 para o fator de contato ( $a_w$ ), indicando que 20% do atrito é mobilizado entre os grãos e a chapa ondulada e os 80% restantes são mobilizados entre grãos.

### 3.3.7 Ângulo de repouso ( $\phi_r$ )

O ângulo de repouso corresponde ao ângulo formado entre a superfície livre do produto em repouso com o plano horizontal, Figura 10, definido pelos grãos menos instáveis e não confinados situados próximos ou na superfície. No caso de pressões de confinamento nulas, ou em produtos depositados em um estado solto, o ângulo de repouso é igual ao ângulo de atrito interno, diferindo deste, conforme as pressões impostas e, segundo Calil Junior e Cheung (2007), pode ser tomado como um indicador do potencial do produto em fluir.

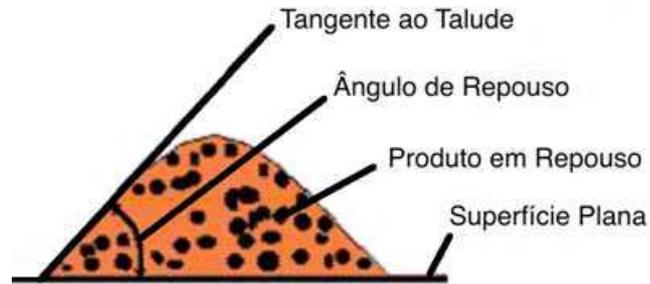


Figura 10. Representação da determinação do ângulo de repouso (Batista, 2009).

O ângulo de repouso sofre influência de outros parâmetros físicos como, por exemplo, teor de umidade, tamanho dos grãos, forma e constituição externa do grão, sendo recomendado que em sua determinação, a superfície onde o mesmo será depositado seja bem rugosa e que a altura de queda livre ( $h$ ) esteja entre  $\phi_{\text{partícula}} > h > 10 \text{ cm}$ , sendo  $\phi_{\text{partícula}}$  o diâmetro médio do grão (Calil Junior e Cheung, 2007).

### 3.3.8 Função fluxo (FF) e índice de fluxo (ff)

Também classificadas como propriedades de fluxo, a função fluxo e o índice de fluxo são de fundamental importância para o projeto de fluxo de silos, servem para caracterizar a escoabilidade ou fluidez do produto, evitando o surgimento de problemas durante o processo de descarga (Calil Junior e Cheung, 2007; Lopes Neto 2009).

Lopes Neto et al. (2009a e 2009b) comentam que a função fluxo serve para estimar a capacidade dos sólidos em fluir por gravidade. O conhecimento destas propriedades propicia um adequado projeto de fluxo e conseqüentemente maximiza operações de descargas, transilagem, dosagem e empacotamento, evitando inseguranças quanto ao tipo de fluxo e obstruções de descarga (Juliano et al., 2006).

A função fluxo é definida pela relação entre a tensão principal de consolidação ( $\sigma_c$ ) e a tensão confinada de deslizamento ( $\sigma_{ic}$ ), conforme a Eq. 7.

$$FF = \frac{\sigma_c}{\sigma_{ic}} \quad (7)$$

O produto apresenta maior fluidez quanto maior o fator fluxo, podendo ser classificado de acordo com os valores da Tabela 5 (Jenike, 1964).

Tabela 5. Classificação da fluidez dos produtos segundo Jenike

Função Fluxo	Classificação
$FF < 2$	Muito coesivo
$2 < FF < 4$	Coesivo
$4 < FF < 10$	Flui facilmente
$FF > 10$	Fluxo livre

Graficamente, valores de  $\sigma_c$  versus  $\sigma_{ic}$  geram a curva FF ilustrada na Figura 11.

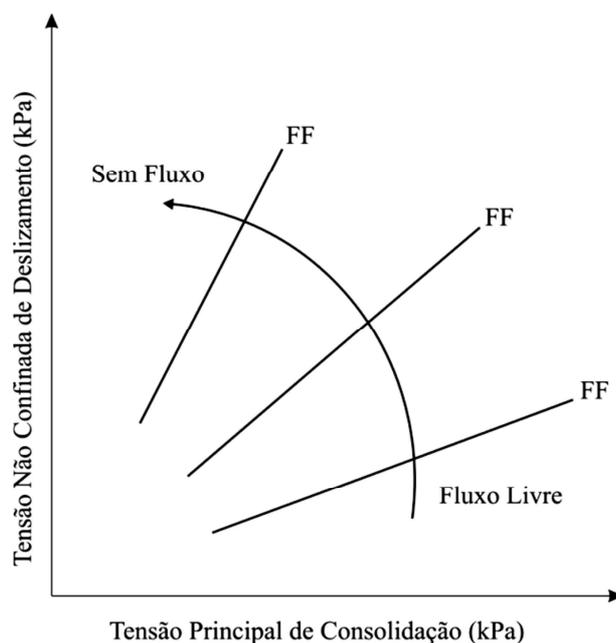


Figura 11. Função Fluxo dos produtos (Lopes Neto, 2009).

A curva mais próxima ao eixo horizontal representa um produto de fluxo fácil e, seguindo uma direção anti-horária, o produto tende a apresentar maior resistência ao escoamento (Lopes Neto et al., 2007).

No caso de grãos de milho, produto em estudo nesta tese, por serem ditos de fluxo livre devido à pouca ou a inexistência de coesão, geralmente não apresentam problemas de obstrução do fluxo e, portanto, considera-se que não possuem função fluxo (Calil Junior e Cheung, 2007).

Por sua vez, o índice de fluxo (ff) é definido por Jenike (1964) como sendo o inverso da inclinação de FF em relação ao eixo horizontal, variando de fluxo fácil até a condição de ausência de fluxo, conforme a Tabela 6.

Tabela 6. Classificação do índice de fluxo de produtos sólidos (Lopes Neto e Nascimento, 2013)

ff	Tipo de fluxo
$ff < 1$	Sem fluxo
$1 < ff < 2$	Muito coesivo
$2 < ff < 4$	Coesivo
$4 < ff < 10$	Fácil

Em acréscimo, Lopes Neto et al. (2012); Lopes Neto e Nascimento (2013), investigando as propriedades de fluxo de produtos agrícolas, encontraram valores para o índice de fluxo do milho em grãos equivalentes ao tipo de fluxo livre de acordo com a classificação sugerida por Jenike (1964).

### 3.3.9 Coeficiente K

A relação entre as pressões verticais e as horizontais dos produtos armazenados é denominada de parâmetro ou coeficiente K, sendo sua determinação objeto de estudo em diversos trabalhos dada sua importância para o cálculo das pressões exercidas pelos produtos armazenados nas paredes e fundo do silo (Nascimento e Calil Junior, 2009). Sendo dependente do movimento lateral entre o material armazenado e a parede, o comportamento do coeficiente K varia conforme ilustrado na Figura 12, onde podem ser distinguidos três estados de tensão associados a K: estado ativo ( $K_a$ ), estado passivo ( $K_p$ ) e estado em repouso ( $K_o$ ).

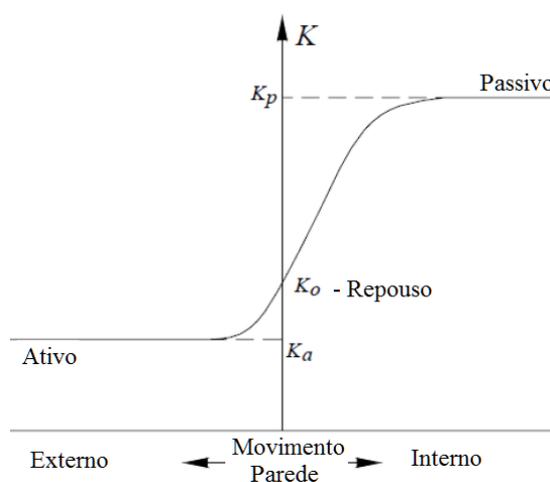


Figura 12. Variação do comportamento do coeficiente K devido à movimentação relativa da parede do silo (Calil Junior e Cheung, 2007).

O processo de enchimento do silo corresponde à condição de empuxo ativo, o armazenamento corresponde à condição de empuxo no repouso e o descarregamento à condição de empuxo passivo. Tais condições são avaliadas quantitativamente por meio do coeficiente de empuxo ou relação entre pressões, coeficiente K.

Os coeficientes  $K_o$ ,  $K_a$  e  $K_p$  são relacionados às tensões verticais e horizontais conforme as Eqs. 8, 9 e 10, respectivamente.

$$K_o = \frac{\sigma_{ho}}{\sigma_v} \quad (8)$$

$$K_a = \frac{\sigma_{ha}}{\sigma_v} \quad (9)$$

$$K_p = \frac{\sigma_{hp}}{\sigma_v} \quad (10)$$

sendo  $K_o$  o coeficiente de empuxo no repouso,  $\sigma_{ho}$  a tensão horizontal no repouso,  $\sigma_v$  a tensão vertical,  $K_a$  o coeficiente de empuxo ativo,  $\sigma_{ha}$  a tensão horizontal ativa,  $\sigma_{hp}$  a tensão horizontal passiva e  $K_p$  o coeficiente de empuxo passivo.

A tensão vertical é função do peso específico do produto armazenado e da espessura da camada sobre o plano horizontal em análise, aumentando linearmente com a profundidade conforme Eq. 11. Consequentemente, as tensões horizontais variam para diferentes planos horizontais situados em diferentes profundidades.

$$\sigma_v(z) = \gamma z \quad (11)$$

sendo  $z$  a profundidade da camada situada sobre o plano horizontal.

Assim, as tensões horizontais no estado de repouso, no estado ativo e passivo são determinadas pelas Eqs. 12, 13 e 14, respectivamente.

$$\sigma_{ho} = K_o \gamma z \quad (12)$$

$$\sigma_{ha} = K_a \gamma z \quad (13)$$

$$\sigma_{hp} = K_p \gamma z$$

$$\sigma_{hp} = K_p \gamma z \quad (14)$$

O coeficiente  $K_o$  pode ser obtido pela relação sugerida por Jáki em 1948, expressa na equação Eq. 15, em função do efetivo ângulo de atrito interno,  $\phi_e$ .

$$K_o = 1 - \text{sen}(\phi_e) \quad (15)$$

Os coeficientes  $K_a$  e  $K_p$  podem ser determinados com o emprego do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, mediante a seguinte analogia: no estado ativo, correspondente à condição de carregamento do silo, a tensão principal máxima possui direção vertical e a tensão principal mínima, direção horizontal. Ou seja, neste estado, a tensão vertical ( $\sigma_v$ ) é a principal máxima e a tensão horizontal ( $\sigma_h$ ), é a principal mínima. Já no estado passivo, quando os grãos começam a fluir, as tensões principais se invertem; desta forma, a maior tensão principal, na linha que passa pelo centro do silo, atua na direção horizontal ( $\sigma_h$ ), e conseqüentemente, a menor tensão principal passa a ser vertical ( $\sigma_v$ ) (Madrona, 2009).

Assim, os coeficientes  $K_a$  e  $K_p$  podem ser deduzidos do círculo de Mohr, considerando que o atrito com a parede é zero, sendo calculados pela Eq. 16 e Eq. 17.

$$K_a = \frac{1 - \text{sen}(\phi_e)}{1 + \text{sen}(\phi_e)} \quad (16)$$

$$K_p = \frac{1 + \text{sen}(\phi_e)}{1 - \text{sen}(\phi_e)} \quad (17)$$

Contudo, na teoria clássica de dimensionamento de silos, a de Janssen (1985), parte do pressuposto de que a carga vertical do produto é transferida para a parede do silo por atrito, gerando uma tensão cisalhante, fazendo com que as tensões verticais e horizontais, nas paredes do silo, não sejam tensões principais, tornando as Eqs. 16 e 17 inaplicáveis, fato este muitas vezes negligenciado na aplicação destas equações (Nascimento e Calil Junior, 2009).

Diferentes recomendações e diversas formulações são sugeridas por normas vigentes e pesquisadores consagrados para a determinação deste parâmetro. Na Tabela 7 são apresentadas algumas das fórmulas sugeridas e seus respectivos autores.

Tabela 7. Formulações para determinação de K de acordo com os principais autores

Autor	Equação proposta
Aoki (1978)	$K = \left[ 1 + 2 \operatorname{tg}^2 \phi_e + \frac{4\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\phi_e)}}{3\mu_w^2} \left\{ \operatorname{tg}^3 \phi_e - (\operatorname{tg}^2 \phi_e - \mu_w^2)^{\frac{3}{2}} \right\} \right]^{-1}$
Frazer (1984)	$K = \frac{1}{\frac{1 + \sin^2 \phi_e}{\cos^2 \phi_e} + \frac{2 \sin \phi_e}{\cos^2 \phi_e} \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \phi_w}{\operatorname{tg}^2 \phi_e}}}$
Hartmann (1966)	$K = \frac{1 - \sin^2 \phi_e}{1 + \sin^2 \phi_e}$
Jaky (1948)	$K = \frac{(1 - \sin \phi_e) \left( 1 + \frac{2}{3} \sin \phi_e \right)}{1 + \sin \phi_e}$
Rankine-Koenen (1895)	$K = \frac{1 - \sin \phi_e}{1 + \sin \phi_e}$
Walker (1966)	$K = \frac{1 + (\sin^2 \phi_e) - 2\sqrt{\sin^2 \phi_e - \mu^2 \cos^2 \phi_e}}{4\mu^2 + \cos^2 \phi_e}$

Fonte: Cheung (2007).

Nascimento e Calil Júnior (2009) calcularam o valor de K para os grãos de milho utilizando equações propostas por alguns autores, sendo seus respectivos resultados constantes na Tabela 8. Os autores obtiveram o valor de K experimentalmente, por meio de um silo piloto e na comparação com os resultados teóricos, apontam a formulação de Jaky, como sendo a mais eficiente. Tal resultado, segundo os autores, deve-se ao fato desta formulação não levar em consideração o ângulo de atrito com a parede.

Tabela 8. Valores de K encontrados para o milho conforme diferentes formulações (Nascimento e Calil Junior, 2009)

Autor	Koenen	Jaky	Walker [D <sub>1</sub> ]	Walker [D <sub>2</sub> ]	Hartman	Frazer [D <sub>1</sub> ]	Frazer [D <sub>2</sub> ]
Média	0,34	0,45	0,35	0,35	0,60	0,36	0,35
Desvio padrão	0,0143	0,0155	0,157	0,0164	0,0206	0,0531	0,0290
Coef. de variação	4,26%	3,46%	4,54%	4,69%	3,41%	14,86%	8,33%

D<sub>1</sub> – parede de aço liso; D<sub>2</sub> – parede de aço rugoso.

Também nos códigos normativos são encontradas diferentes recomendações para a determinação do parâmetro K, como pode ser observado na Tabela 9, onde são apresentadas algumas das formulações constantes em diferentes normas. A divergência entre os resultados obtidos por estas recomendações identifica a existência de muitas incertezas no cálculo da relação entre as pressões verticais e as pressões horizontais.

Tabela 9. Normas e suas respectivas formulações para o parâmetro K

Norma	Equação adotada
Americana ACI 313 (1991)	$K = \frac{1 - \sin \phi_i}{1 + \sin \phi_i}$
Americana ANSI/ASAE EP433 (2002)	$K = 0,5$
Australiana AS 3774 (1997)	$K = \frac{1 + (\sin^2 \phi_e) - 2\sqrt{\sin^2 \phi_e - \mu_w^2 \cos^2 \phi_e}}{4\mu_w^2 + \cos^2 \phi_e} \geq 0,35$
Alemã DIN 1055 (2005)	$K = 1,2 (1 - \sin \phi_i)$
Europeia EN 1991-4 (2006)	$K = 1,1 (1 - \sin \phi_i)$
Internacional ISO 11697 (1997)	$K = 1,1(1 - \sin \phi_i)$
Francesa SNBATI (1975)	$K = \frac{1 - m \sin \phi_i}{1 + m \sin \phi_i} \cos^2 \phi_w$ $m = \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \phi_w}{\tan \phi_i}\right)^2}$

Fonte: Lopes Neto (2009).

A determinação do parâmetro K foi objeto de estudo de diversos trabalhos, para vários produtos, como o realizado por Ayuga (1995), em que foi determinado o valor de K em função do tipo de parede. O autor concluiu que para paredes absolutamente lisas ( $\phi_w = 0$ ), a equação de Rankine-Koenen é a adequada, já para paredes muito rugosas ( $\phi_w = \phi_e$ ), a adequada é a equação de Hartmann, e para os casos intermediários a formulação proposta pela norma SNBATI retorna valores próximos da realidade.

Kibar et al. (2010) investigaram as propriedades físicas e mecânicas de grãos de arroz. Em suas análises, para a determinação do parâmetro K utilizaram três formulações diferentes, observaram que K diminui linearmente com o aumento do teor de umidade dos

grãos, sendo o maior valor aquele calculado pela formulação proposta pela norma europeia.

Lopes Neto et al. (2014b) obtiveram valores experimentais de K para areia seca e compararam com os valores sugeridos pelas normas estrangeiras, observando divergências entre os valores, havendo maior concordância com os valores sugeridos pela norma EUROCODE 1 (EN, 2006), enquanto os resultados da DIN 1055 foram os que mais se afastaram dos valores experimentais, superestimando-os em 45%.

Assim sendo, fica claro que não existe um acordo entre pesquisadores e normas do que seria uma formulação adequada para a determinação do parâmetro K, sendo imprescindível que, para cálculos mais acurados, o valor de K específico ao produto a ser armazenado seja obtido experimentalmente, mediante ensaios padronizados.

### **3.3.10 Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), Módulo de elasticidade (E) e ângulo de dilatação ( $\psi$ )**

Também ditos parâmetros mecânicos dos grãos, estas propriedades são de fundamental importância para modelar com acurácia as cargas atuantes nas paredes e fundo dos silos. Porém, eles não são usuais nas teorias tradicionais, e seus valores são encontrados em número reduzido de trabalhos científicos e apenas para alguns produtos (Moya et al., 2002, 2006 e 2013; Costa et al., 2014).

As teorias tradicionais, especialmente a desenvolvida por Janssen em 1895, são usadas pelas normas estrangeiras para dimensionamento de silos, sendo alicerçadas no conhecimento de propriedades do produto comumente encontradas na literatura, tais como o ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ), o coeficiente de atrito grão-parede ( $\mu_w$ ) e o peso específico ( $\gamma$ ), não contemplando o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), o módulo de elasticidade (E) e o ângulo de dilatação ( $\psi$ ), propriedades indispensáveis para parametrizar o comportamento do produto ensilado (Moya et al., 2013).

Para vários pesquisadores (Gallego, 2006; Madrona, 2008; Gallego et al., 2010; González-Montellano et al., 2011), produtos granulares podem ser bem representados pelo critério elastoplástico, no qual a parte elástica é definida pelos parâmetros módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do produto. Por sua vez, a plastificação é definida adotando o critério de Drucker-Prager, sendo necessário neste caso também o conhecimento do ângulo de dilatação.

O coeficiente de Poisson pode ser entendido da seguinte maneira: um material quando submetido à tração ou compressão sofre, além da deformação axial, uma deformação transversal. Poisson (1781-1840) demonstrou que estas duas deformações eram proporcionais uma em relação à outra, dentro dos limites da Lei de Hooke, faixa elástica. Por exemplo, quando uma barra é tracionada, o alongamento axial é acompanhado por uma contração lateral, isto é, a largura da barra torna-se menor e seu comprimento cresce, situação inversa acontece quando uma barra é comprimida, sua largura aumenta e seu comprimento diminui, como ilustrado na Figura 13.

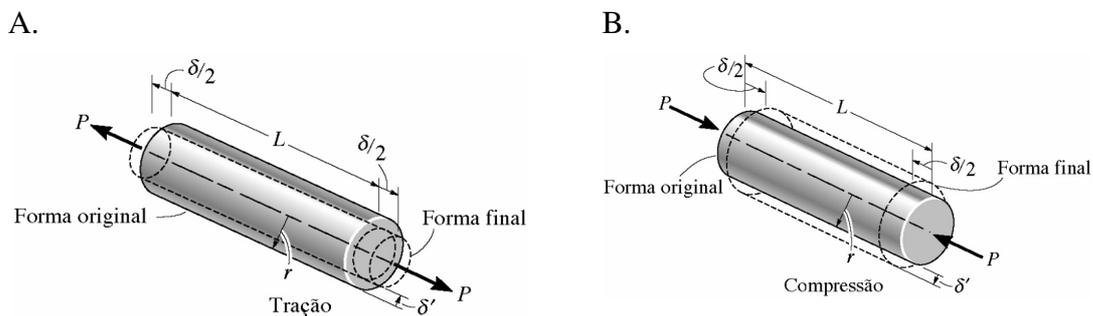


Figura 13. Deformação transversal e longitudinal de uma barra: Para tração (A) e Para compressão (B). Fonte: Hibbeler (2004).

A relação entre as deformações transversal e longitudinal é constante dentro da região elástica, e é conhecida como relação ou coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), expressa matematicamente pela Eq. 18.

$$\nu = - \frac{\epsilon_{\text{lat}}}{\epsilon_{\text{long}}} \quad (18)$$

sendo  $\epsilon_{\text{lat}}$  a deformação lateral ou radial e  $\epsilon_{\text{long}}$  a deformação longitudinal, definidas pela Eq. 19 e Eq. 20 respectivamente.

$$\epsilon_{\text{long}} = \frac{\delta}{L} \quad (19)$$

$$\epsilon_{\text{lat}} = \frac{\delta'}{L} \quad (20)$$

sendo L o comprimento inicial da barra,  $\delta$  a variação do comprimento e  $\delta'$  a variação radial da barra.

Rotter (2001), mediante ensaios experimentais, mostrou que o coeficiente de Poisson está relacionado ao coeficiente K no interior do produto no estado estático ( $K_0$ ), conforme a Eq. 21.

$$\nu = \frac{K_0}{1 + K_0} \quad (21)$$

Sendo esta relação, por vezes, utilizada para determinar de forma indireta o coeficiente de Poisson, na impossibilidade da determinação experimental deste.

Já o módulo de elasticidade (E) ou módulo de Young, é a razão entre um incremento da tensão aplicada e um incremento da deformação resultante, dentro do limite elástico, em que a deformação é totalmente reversível e proporcional à tensão. A partir da curva tensão-deformação, obtida por meio de ensaios de compressão, podem-se obter parâmetros que caracterizam a resposta do material quando submetido a uma carga (Ribeiro et al., 2007).

A curva tensão versus deformação, Figura 14, mostra uma região aproximadamente linear, onde o material é completamente elástico, sendo válida, para esta região, a Lei de Hooke, expressa matematicamente pela Eq. 22. Na região elástica a deformação é reversível, ou seja, o material retorna completamente ao seu formato original após a retirada da carga aplicada. A partir daí, aplicação de tensões maiores ocasiona deformações plásticas no material, sendo estas permanentes.

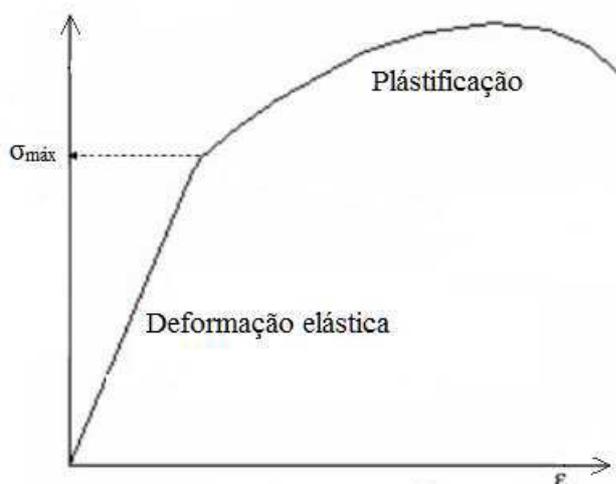


Figura 14. Curva característica da tensão vs deformação.

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (22)$$

sendo

$E$  – módulo de elasticidade (Pa);

$d\sigma$  – incremento de tensão (Pa);

$d\varepsilon$  – incremento de deformação ( $\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$ ).

Por sua vez, o ângulo de dilatância ( $\psi$ ) está relacionado à dilatação volumétrica do produto quando este é submetido ao cisalhamento. Corresponde ao ângulo formado entre a linha de deslizamento da amostra e a direção real do deslizamento, conforme ilustrado na Figura 15 (Costa et al., 2014; Madrona e Calil Junior, 2009), podendo ser obtido em ensaios de cisalhamento direto ou triaxiais.

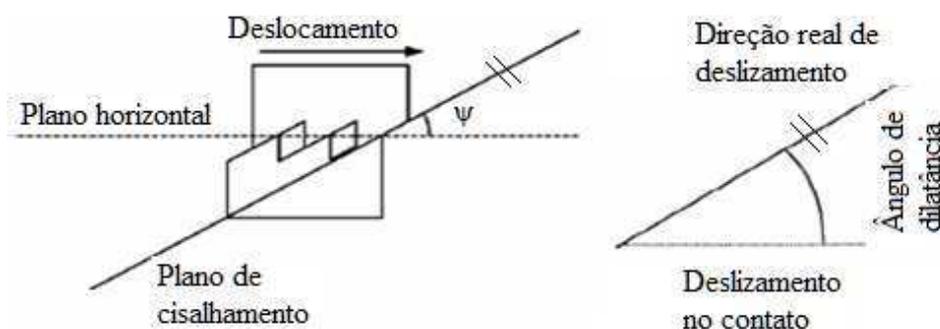


Figura 15. Representação da dilatância nas linhas de deslizamento (Madrona e Calil Junior, 2009).

O ângulo de dilatância determina a direção da deformação plástica e pode ser relacionado com o ângulo de atrito interno da seguinte maneira (Guaita et al., 2003):

- Se eles forem iguais, ocorre uma deformação plástica normal à superfície de deslizamento com expansão volumétrica do produto;
- Se o ângulo de dilatância for menor que o ângulo de atrito interno do produto, a expansão volumétrica será menor;
- Seu valor pode variar de  $0^\circ$  até o valor do ângulo de atrito interno sendo que, em sendo zero, não haverá expansão volumétrica.

A dilatância do produto vem sendo citada por pesquisadores como uma das prováveis causas do aumento das pressões nas etapas dinâmicas nos processos de armazenamento dos grãos em silos (Ramirez et al., 2009a e 2010b).

As propriedades mecânicas dos grãos têm sido objeto de estudo de pesquisadores, os quais, após ensaios experimentais, fazem recomendações acerca dos valores a serem adotados quando do emprego destes parâmetros. Moya et al. (2013) determinaram experimentalmente as propriedades mecânicas de produtos agrícolas comumente armazenados em silos, sugerindo os valores constantes na Tabela 10.

Tabela 10. Valores das propriedades mecânicas recomendado para diferentes produtos

Produto	Propriedade		
	Dilatância [°]	Módulo de Elasticidade [kPa]	Coefficiente de Poisson
Cevada	4,9	9111	0,36
Milho	32,7	35733	0,31
Aveia	0	4037	0,41
Girassol	9,7	4329	0,33
Lentilha	24,3	19886	0,35
Trigo	23,1	19658	0,37

Costa et al. (2013) determinaram as propriedades mecânicas dos grãos de arroz, milho triturado e farinha de mandioca, cujos resultados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Valores médios das propriedades mecânicas dos produtos estudados

Produto	Teor de umidade [b.u] %	Propriedade			
		$\nu$ carregamento	$\nu$ descarregamento	E [MPa]	$\psi$ [°]
Arroz	10	0,15	0,15	13,83	15,48
	12	0,14	0,20	13,99	17,06
	14	0,12	0,16	10,43	21,69
Milho triturado	10	0,12	0,20	7,56	24,34
	12	0,13	0,19	6,30	29,47
	14	0,12	0,24	5,28	32,44
Farinha de mandioca	10	0,12	0,13	2,65	78,75
	12	0,12	0,13	3,42	75,63

Dada a importância da utilização de valores representativos nas análises e a falta de ensaios padronizados para a obtenção destas propriedades, sua determinação tem sido objeto de estudo de trabalhos científicos, contudo, não existe um consenso sobre quais valores seriam mais adequados para estes parâmetros, tampouco existem dados experimentais suficientes disponíveis para a comparação de valores teóricos.

### 3.4 Projeto de fluxo

Comprovadamente, o tipo de fluxo que vai ocorrer durante a vida operacional de um silo influencia na intensidade e distribuição das pressões resultantes nas paredes e no fundo destas estruturas, sendo, portanto, primordial o levantamento de informações acerca do fluxo para a obtenção de projetos bem dimensionados, que resultem em estruturas seguras e eficientes técnica e economicamente (Chen et al., 2007).

O tipo de fluxo que irá ocorrer durante a descarga de um silo determina as características de descarga do produto, se haverá ou não a formação de zonas sem movimentação, o tipo de segregação que irá ocorrer e se o silo será esvaziado completamente. O fluxo tem tipologia definida de acordo com as características físicas do produto armazenado, geometria do silo e rugosidade da parede (Calil Junior, 1990).

A descarga por gravidade é o processo adotado para a maioria dos silos verticais que armazenam as *commodities* agrícolas a granel, sendo o modo de operação mais econômico, com comprovada eficiência, desde que dimensionado corretamente. Nesta condição, os principais tipos de fluxo que podem ocorrer, conforme estabelecido por Jenike em 1964, são: fluxo de massa e fluxo de funil (tubo ou misto).

Entende-se por fluxo de massa aquele cujo produto entra, substancialmente, em movimento, em todas as partes do silo no momento do processo de descarregamento. Já o fluxo de funil tipo tubo é aquele em que apenas uma parte por vez do produto entra em movimento através de um canal vertical, permanecendo as outras em condição estática.

Por sua vez, o fluxo de funil tipo misto é quando no processo de descarga, ocorre tanto o fluxo de massa quanto o de funil simultaneamente, conforme ilustrados nas Figura 16 (A, B e C). O fluxo misto é caracterizado quando os limites do canal de fluxo chegam a interceptar as paredes do silo ainda durante o processo de descarregamento, sendo característicos de silos esbeltos cuja relação  $H/D \geq 2$  (Sadowski e Rotter, 2010 e 2011a).

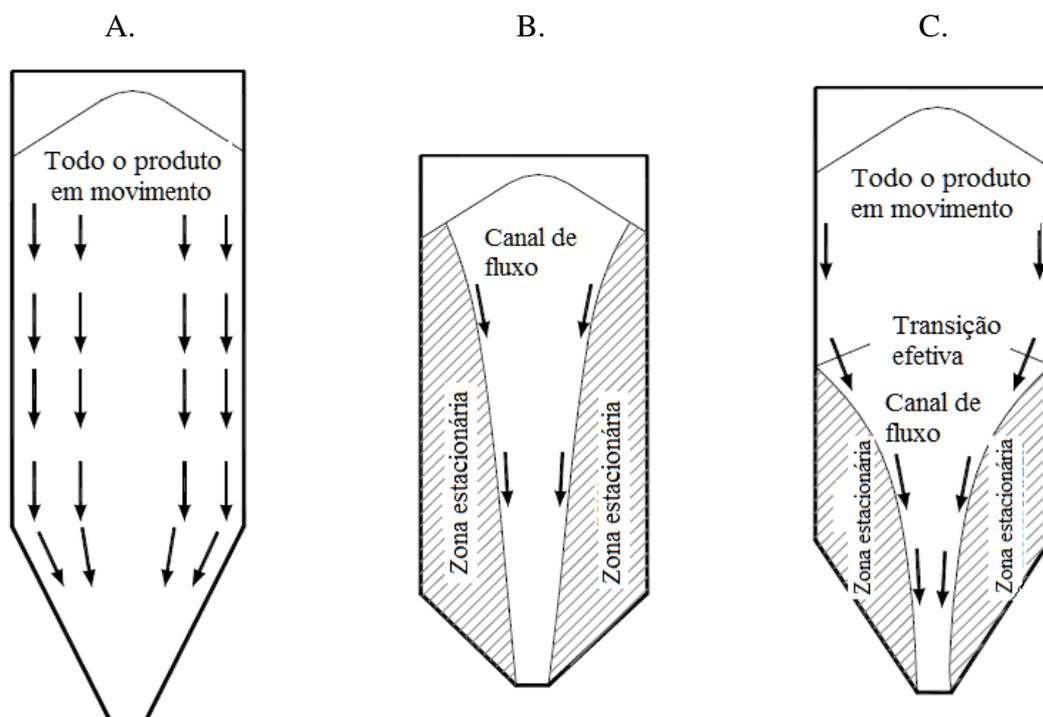


Figura 16. Padrões básicos de fluxo: Fluxo de massa (A); Fluxo de funil tipo tubo (B) e Fluxo de funil misto (C). Fonte: EN 1991-4 (2006).

Lopes Neto e Nascimento (2013) avaliaram teórica e experimentalmente o fluxo para três tipos de produtos, incluindo grãos de milho, armazenados em um silo modelo de fundo plano. Os autores constataram que os grãos de milho apresentaram fluxo do tipo misto conforme ilustrado na Figura 17, em que, inicialmente, ocorreu a formação do fluxo de massa com todo produto em movimento descendente, até atingir uma relação altura/diâmetro ( $H/D$ ) de aproximadamente 1,3. A partir de então, predominou o fluxo de funil sendo caracterizado por uma porção imobilizada do produto enquanto outra se encontrava em movimento.

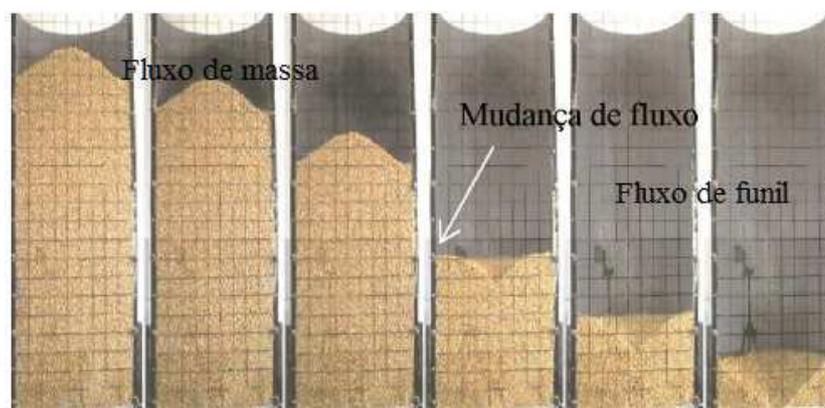


Figura 17. Comportamento do fluxo dos grãos de milho em silo modelo de fundo plano (Lopes Neto e Nascimento, 2013).

Objeto de estudo em vários trabalhos científicos, a principal teoria que aborda a determinação do tipo de fluxo é a de Jenike, sendo inclusive a adotada pelas principais normas estrangeiras, incluindo a EN 1991-4 (2006), cuja determinação sugerida é feita graficamente pelos gráficos ilustrados nas Figura 18 e Figura 19. Cheung e Calil Junior (2007) correlacionaram vantagens e desvantagens a cada tipo de fluxo, ponderando que a escolha do mesmo deve ser coerente com o sistema de armazenamento e que não existe o sistema ideal e sim o mais adequado ao processo, evitando que problemas funcionais, tais como a formação de abóbadas ou arcos (mecânicos ou coesivos) ocorra, pois o bom desempenho operacional de um silo depende, diretamente, da garantia de um adequado escoamento do material armazenado.

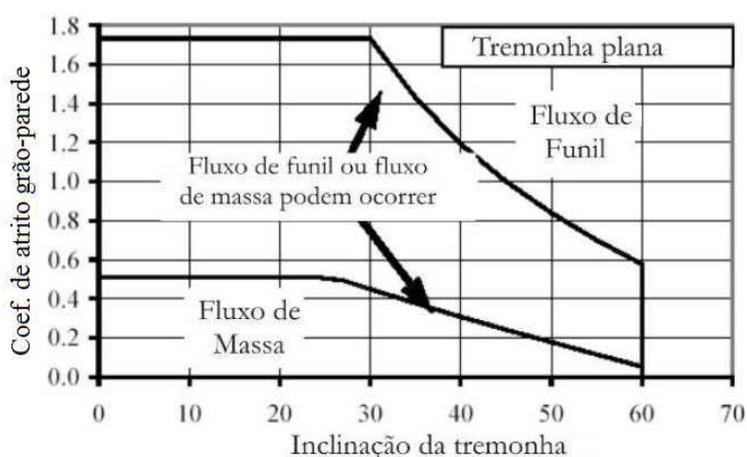


Figura 18. Determinação gráfica do tipo de fluxo conforme a norma europeia para silo com tremonha plana (EN 1991-4, 2006).

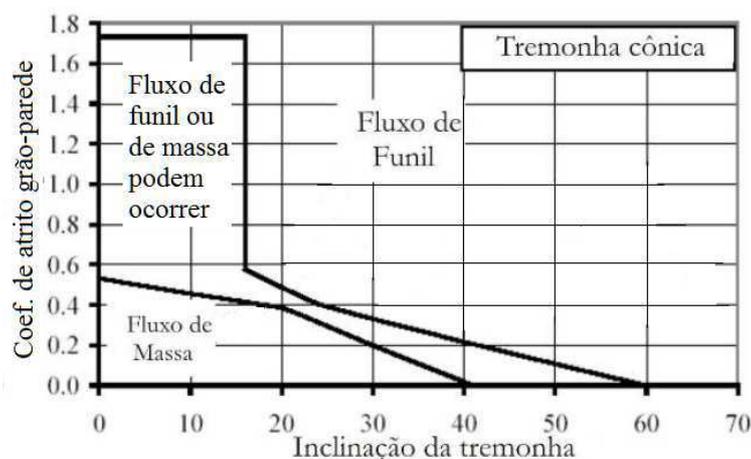


Figura 19. Determinação gráfica do tipo de fluxo conforme a norma europeia para tremonha cônica (EN 1991-4, 2006).

Cheung e Calil Junior (2007) correlacionaram vantagens e desvantagens a cada tipo de fluxo, ponderando que a escolha do mesmo deve ser coerente com o sistema de armazenamento e que não existe o sistema ideal e sim o mais adequado ao processo, evitando que problemas funcionais, tais como a formação de abóbadas ou arcos (mecânicos ou coesivos) ocorra, pois o bom desempenho operacional de um silo depende, diretamente, da garantia de um adequado escoamento do material armazenado.

A formação de abóbadas ou arcos é um grave problema enfrentado por indústrias que utilizam silos, uma vez que são capazes de interromper totalmente o descarregamento, resultando em interrupção inesperada de todo processo de produção (Lopes Neto et al., 2012; Lopes Neto e Nascimento 2013). Além de serem prejudiciais ao processo de descarga, tanto as abóbadas como os arcos representam grande perigo à integridade estrutural do silo e aos operários, pois seu desprendimento tende a gerar um efeito de sucção do ar localizado na parte logo acima da superfície da massa armazenada, simultaneamente ocorrendo um acréscimo abrupto de pressão na zona de transição entre corpo e tremonha do silo, podendo causar deformações na parede e cobertura do silo (Palma e Calil Junior, 2008; Batista, 2009; Lopes Neto et al, 2009).

Estes problemas só serão evitados mediante a disponibilização e utilização de propriedades adequadas ao produto armazenado, considerando as condições mais severas de atuações, visto que estas estão diretamente relacionadas tanto ao projeto de fluxo quanto às pressões em silos. Infelizmente, esta não é uma tarefa trivial, pois estas propriedades variam largamente de um produto para outro, de uma variedade para outra, dependem das condições ambientais, temporais, de armazenagem, entre outras, dificultando o estabelecimento de modelos padronizados.

Atualmente, em busca de aumentar o conhecimento acerca das propriedades e do padrão de fluxo dos produtos armazenados, muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas, tanto experimentais quanto numéricas. Porém, na parte experimental, os resultados têm o inconveniente do efeito escala, uma vez que em sua maioria é realizada em escala reduzida dado o elevado custo envolvido para as análises em grande escala e, ainda, nem sempre a instrumentação consegue retornar bons resultados. No padrão de fluxo, por exemplo, uma das dificuldades está relacionada com a opacidade das paredes das estruturas reais, impedindo a medição direta e a observação do padrão de fluxo desenvolvido (Zheng et al. 2015; Couto et al., 2013a; Vidal et al., 2006a).

Assim, apesar dos avanços já alcançados no estudo do fluxo de produtos armazenados em silos, ainda há muita lacuna a ser preenchida a fim de evitar que erros de

projetos ocorram por falta de informações adequadas sobre o produto e seu comportamento quando ensilado, enfatizando a necessidade de que novas pesquisas continuem sendo realizadas e que seja fortalecida cada vez mais a parceria entre instituições e setor privado, com o propósito de fazer chegar até o consumidor final os bons resultados das pesquisas.

### 3.5 Pressões em silos exercidas pelos produtos armazenados

Todo projeto estrutural, independentemente do tipo da estrutura, do material empregado ou da complexidade arquitetônica, deve garantir que a mesma desempenhe as funções para as quais foi concebida com eficiência, economia, durabilidade e segurança. Pode-se dizer que uma estrutura é segura se ela for capaz de resistir ileso a todas as ações que vierem a solicitá-la, da construção até o final de sua vida útil. No caso dos silos, a boa concepção do projeto estrutural necessita da quantificação e da distribuição das pressões nas paredes verticais e no fundo do silo, desenvolvidas durante os processos de carregamento, armazenamento e descarregamento dos produtos, sendo estas, as principais ações a serem consideradas em seu dimensionamento (Palma e Calil Junior, 2008).

O produto armazenado exerce pressões nas paredes verticais e no fundo do silo da seguinte maneira: na parede vertical, atuam pressões perpendiculares, denominadas pressões horizontais ( $p_h$ ) e pressões tangenciais devido ao atrito do produto com a parede, denominadas pressões de atrito ( $p_w$ ). No fundo do silo atuam pressões verticais ( $p_v$ ) conforme ilustrado na Figura 20. Para cada uma das etapas operacionais do silo, existe um comportamento diferente das pressões, sendo necessária a análise no carregamento, no armazenamento e na descarga.

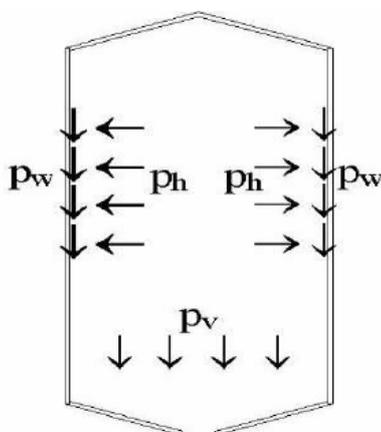


Figura 20. Pressões atuantes no corpo e fundo do silo (Palma e Calil Junior, 2008).

A análise das pressões nas paredes dos silos foi investigada por diversos pesquisadores. Existem teorias e aproximações para a sua distribuição que variam entre as condições estáticas e dinâmicas. Dentre as principais destacam-se: Janssen (1895), Walker (1966), Walters (1973), Benink (1989) entre outras. Nesta tese, a teoria de Janssen será analisada, detalhando as hipóteses adotadas e discutindo sua aplicabilidade.

Objeto de estudo há mais de um século, os silos constituem estruturas intrigantes e instigam pesquisadores até os dias atuais. Há relatos de que os primeiros silos foram projetados e construídos admitindo-se a hipótese de que os produtos armazenados comportavam-se como líquidos, com aplicação da teoria hidrostática para o cálculo das pressões. Em 1892, Roberts, na Inglaterra, realizou os primeiros testes para determinar as pressões laterais e verticais em silo, considerando que parte do peso do produto armazenado era transferida por atrito para as paredes dos silos, resultando em esforços de compressão nas paredes. A existência deste atrito faz com que as pressões horizontais que o produto exerce nas paredes não aumentem indefinidamente com a altura como as pressões hidrostáticas, mas apresentem um crescimento que tende exponencialmente a um valor máximo.

Em 1895, Janssen confirmou as hipóteses de Roberts, vindo a fornecer uma das mais importantes contribuições para o desenvolvimento da teoria sobre pressões em silos (Gomes e Calil Junior, 2005), sendo seu modelo utilizado e adotado até hoje como base de cálculo em diversas normas como a alemã DIN 1055 (2005) e a europeia EN 1991-4 (2006) para a previsão de pressões estáticas, considerando coeficientes de sobrepressão para a obtenção das pressões dinâmicas.

Com a constatação da existência do atrito dos grãos com as paredes, surgiram novas teorias que, além de considerar o arraste nas paredes, também fazem diferenciação para as condições estáticas e dinâmicas, com a constatação de que nesta última, as pressões horizontais sobrepujam-se às verticais (Calil Junior, 1990). Portanto, a intensidade das pressões horizontais e verticais é diferente para a situação de enchimento e do tempo em que o silo permanece cheio para a situação de descarga. A primeira denomina-se de pressões iniciais ou estáticas e a segunda, de pressões de fluxo ou dinâmicas. Pressões iniciais ou estáticas se desenvolvem quando o silo inicialmente vazio é carregado sem que qualquer produto seja retirado. Pressões de fluxo ou dinâmicas se desenvolvem quando algum produto é retirado do silo.

A exata predição da distribuição de cargas no corpo do silo é um dos principais problemas no que tange ao quesito dimensionamento destas estruturas, uma vez que são

dependentes do comportamento do produto, da interação entre o produto armazenado e a parede do silo e, ainda, das propriedades de fluxo durante o processo de carregamento e descarregamento (Martinez et al, 2002).

Devido a isso, e com base em seus experimentos, diversas formulações foram produzidas por pesquisadores para gerar diferentes teorias. Segundo Calil Junior e Nascimento (1997), existem três grupos de pesquisa claramente definidos: os que estudam as ações e deformações em silos reais e modelos reduzidos: os que se dedicam a melhorar os modelos do comportamento dos produtos, ou seja, leis constitutivas dos produtos armazenados e os que estudam os esforços nas estruturas tanto estáticos como dinâmicos, normalmente com base no método dos elementos finitos.

Em se tratando do Brasil, a maioria das pesquisas sobre silos foram conduzidas na Universidade de São Paulo (USP) sob a orientação do professor Carlito Calil Junior, apresentando importantes resultados que podem ser encontrados em Gomes e Calil Junior (2005), Freitas e Calil Junior (2005), Palma e Calil Junior (2008), Madrona e Calil Junior (2009), Nascimento e Calil Junior (2009), Calil Junior et al. (2011) e Cheung et al. (2015), sendo estas as publicações de algumas das pesquisas mais recentes dentre as muitas já realizadas.

Outro grupo de pesquisa que tem contribuído com informações relevantes sobre o projeto e dimensionamento de silos é o Grupo de Construções Rurais e Ambiente, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) sob a orientação dos professores José Wallace Barbosa do Nascimento e José Pinheiro Lopes Neto, o qual investiga as propriedades dos produtos armazenados, as características do fluxo de produtos granulares e pulverulentos e as pressões desenvolvidas nas paredes e fundo de silos. Os resultados de algumas destas pesquisas estão em Lopes Neto et al. (2012), Lopes Neto e Nascimento (2013), Lopes Neto et al. (2013a), Lopes Neto et al. (2013b), Lopes Neto et al. (2014a), Lopes Neto et al. (2014b) e Costa et al. (2014).

Na Universidade Federal de Lavras (UFLA), o professor Francisco Carlos Gomes coordena outro grupo de pesquisa sobre estruturas de armazenamento, desenvolvendo importantes trabalhos sobre o tema, destacando-se os seguintes: Gomes e Deckers (2010), Gomes e Calil Junior (2009), Silva et al. (2011), dentre outras pesquisas em dissertações de mestrado.

Internacionalmente, a literatura que trata sobre o dimensionamento de silos é vasta, muitos pesquisadores investigaram e investigam estas estruturas, denotando a existência de muitas lacunas a serem preenchidas. Estas pesquisas tratam de diversos

aspectos construtivos e de projeto como: a compressão axial na parede do silo originada pela mobilização do atrito grão-parede, o comportamento das pressões durante os processos de operação estáticos e dinâmicos do silo, a utilização de inserções internas à estrutura para evitar obstruções do fluxo, descargas excêntricas, propriedades físicas e mecânicas dos produtos armazenados, entre outras.

Sadowski e Rotter (2011b) indicam que em silos cilíndricos com descarga concêntrica a compressão axial na parede do silo, oriunda do atrito entre a parede e o produto armazenado, é acumulativa com a profundidade, de modo que o risco de deformação é substancialmente aumentado na direção da base do silo.

Ao mensurar as ações ocasionadas por grãos de trigo em um silo cilíndrico de paredes lisas com relação altura/diâmetro (H/D) igual a 2, Ruiz et al. (2012) verificaram que as pressões foram máximas nos primeiros segundos da descarga atingindo diferenças acima de 20% entre as fases estática e dinâmica. Couto et al. (2013a e 2013b) constataram que as pressões dentro do silo em estado estático não são constantes e a variação do fluxo durante a descarga implica em variação de pressão não associada e que além disso, o estado de sobrepressão durante a descarga deve-se principalmente à compactação do material em certas regiões do silo e em muito menor grau à dilatância. Além disso, valores de pressão obtidos durante a descarga ultrapassaram, em alguns casos, os fornecidos pelo método de cálculo proposto pela norma EN 1991-4 (2006).

A necessidade de estruturas eficientes e economicamente competitivas é confrontada com desafios estruturais que seriam mais bem entendidos com experimentos *in situ*. Contudo, na literatura atual poucos relatos de experimentos em escala real são encontrados, devido principalmente ao custo elevado e à complexidade envolvida na instrumentação. Por vezes, experimentos são realizados em silos presentes em indústrias, estes por sua vez, apresentam maior dificuldade de controle das variáveis envolvidas. Por outro lado, a utilização de silos modelos (em escala reduzida) também não é simplória, uma vez que existem os problemas decorrentes do efeito escala (Ramirez et al., 2014).

Neste sentido, Couto et al. (2012) descrevem o projeto de uma estação de teste em grande escala para determinar pressões em silos. A instalação consiste de um silo metálico cilíndrico, equipado com células de carga para medir as pressões e equipamentos que permitem correlacionar o comportamento das pressões de acordo com o carregamento e descarregamento do silo. Em Ruiz et al. (2012) são apresentados alguns resultados obtidos nesta estação de teste em comparação aos valores obtidos pela norma EN 1991-4 (2006).

Segundo os autores, os bons resultados obtidos demonstram que a concepção teórica da estação de teste é eficiente e oferece múltiplas possibilidades para futuras pesquisas.

Nos silos, tanto o carregamento quanto o descarregamento concêntricos é a solução técnica mais desejável, sendo o contrário, por vezes, a razão para regimes de fluxos não previsíveis, amassamento, oscilação de cargas e distribuição assimétrica das pressões. No entanto, por diversos fatores, entre eles circunstâncias espaciais, esta condição não é alcançada (Ramirez et al., 2010a). Vários autores têm realizado trabalho experimental em silos com descarga excêntrica nos quais são sugeridos vários métodos para prever as cargas nestas condições (Rotter, 2001; Ayuga et al., 2001; Guaita et al., 2003; Vidal et al., 2006a e 2008; Sadowski e Rotter, 2010 e 2011c; Gallego et al., 2011; Zhu et al., 2012). De acordo com Sadowski e Rotter (2013), no caso de silos com descarga excêntrica, as pressões tendem a ser mais elevadas no lado oposto ao orifício de descarga.

Estudos experimentais em silos modelos foram realizados em várias pesquisas, como em Coetzee e Els (2009), Balevicius et al (2011) e Sielamowicz et al. (2011). O problema com esses tipos de ensaios é o alto risco de cometer erros devido à escala, uma vez que os valores experimentais obtidos num silo teste de escala reduzida podem não representar com fidelidade fenômenos em silos de outros tamanhos.

Ainda, estudos numéricos e teorias para prever o comportamento do material ensilado foram desenvolvidos por vários pesquisadores a exemplo de Vidal et al. (2006b, 2008) e Ding et al. (2011), no entanto, a maioria carece de validação experimental.

Nos códigos normativos, as pressões devem ser determinadas por meio de diferentes formulações matemáticas, conforme a esbelteza do silo, definida de acordo com a relação altura/diâmetro ( $H/D$ ). No entanto, não há consenso entre as normas e nem mesmo entre pesquisadores sobre esta classificação (Nascimento et al., 2013).

Dentre as inúmeras questões sobre as pressões desenvolvidas nas paredes dos silos decorrentes do produto sólido armazenado a granel, o que é conhecido e amplamente aceito é que as maiores pressões nas paredes ocorrem durante a descarga (Ayuga et al, 2001; EN 1991-4, 2006), muito embora a determinação da magnitude e distribuição destas ainda apresenta dificuldades consideráveis, uma vez que é um fenômeno complexo, que depende, dentre outros fatores, do tipo de fluxo que o produto armazenado apresenta.

Em suma, apesar de serem investigadas desde o final do século 19, e mesmo após os avanços no conhecimento, as tensões a serem consideradas no projeto estrutural de um silo para o armazenamento de produtos sólidos a granel ainda é um tema que carece de melhor entendimento e consenso entre códigos normativos e pesquisadores, uma vez que

muitos aspectos ainda permanecem divergentes e outros não resolvidos (Ayuga, 2008; Dogangun et al., 2009).

### 3.5.1 Teoria de Janssen para a distribuição das tensões

Janssen, em 1895, propôs uma teoria conhecida como método da camada elementar, que consiste na suposição do equilíbrio de uma massa de produto em repouso, como apresentado na Figura 21.

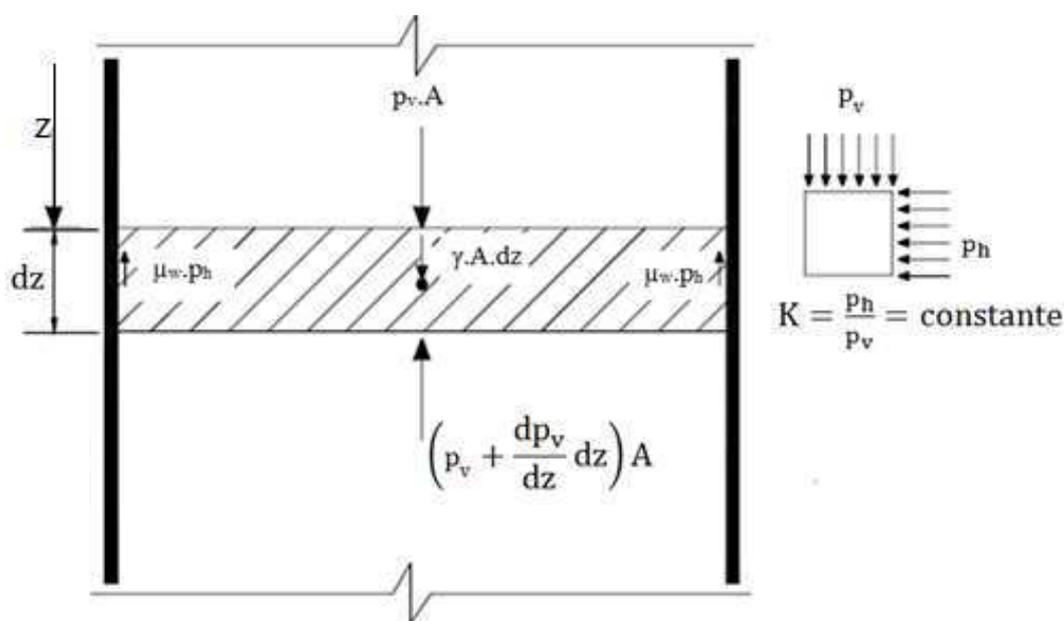


Figura 21. Representação do equilíbrio estático da camada elementar de Janssen (Calil Junior e Cheung, 2007).

Esta teoria, embora seja válida apenas para a condição de carregamento, uma vez que ela é deduzida através do equilíbrio estático, é a formulação mais usada para o dimensionamento de silos até os dias de hoje, sendo adotada pela maioria dos códigos normativos vigentes para o cálculo da pressão estática ou inicial no carregamento. Na condição dinâmica, as pressões são obtidas por meio da utilização de coeficientes de sobrepressão aplicados às pressões estáticas. Para determinar empiricamente as distribuições das tensões segundo o modelo de Janssen, é necessário avaliar a pressão horizontal em função da profundidade e das tensões verticais (Silva Neto, 2013; Reis, 2011).

As hipóteses da modelagem de Janssen são as seguintes (Calil Junior e Cheung, 2007):

1. As pressões horizontais ( $p_h$ ) são constantes no mesmo plano horizontal;
2. O valor do ângulo de atrito do produto com a parede ( $\phi_w$ ) é constante;
3. O peso específico do produto ( $\gamma$ ) é uniforme;
4. As paredes do silo são totalmente rígidas;
5. A relação entre as pressões horizontais e verticais ( $K = p_h/p_v$ ) é constante em toda a altura do silo.

Na formulação de Janssen o equilíbrio, num elemento de altura  $dz$ , do produto armazenado de peso específico  $\gamma$ , fica estabelecido pela pressão vertical e pelo seu incremento,  $p_v$  e  $p_v + dp_v$ , respectivamente, e as pressões devidas ao atrito sobre as paredes produzido pela pressão horizontal  $p_h$ . Assim, se  $A$  designa a área da seção transversal do silo e  $U$  o seu perímetro, então, da definição da pressão horizontal tem-se a Eq. 23.

$$p_h = \frac{F_h}{A} \quad (23)$$

Para calcular a pressão de atrito na parede ( $p_w$ ), segundo os pressupostos admitidos, observa-se que vale a Eq. 24:

$$p_w = p_h \tan(\phi_w) = p_h \mu_w \quad (24)$$

em que  $\mu_w$  é o coeficiente de atrito estático, de modo que  $\tan(\phi_w) = \mu_w$ , sendo  $\phi_w$  o ângulo de atrito do grão na parede. Então a força na parede causada pelo atrito dos grãos é calculada pelo produto da pressão pela área lateral, conduzindo à Eq. 25:

$$F_w = p_h U dz \mu_w \quad (25)$$

A força devido ao peso dos grãos,  $W$ , atuando na direção para baixo no sistema de referência implicitamente admitido na Figura 21, é avaliada observando-se que  $W = \gamma V$ , onde  $V$  é o volume da fatia elementar, que é obtido como  $V = A dz$ . Assim, o peso dos grãos é equacionado pela Eq. 26.

$$W = \gamma A dz \quad (26)$$

Considerando que as forças envolvidas estão em condição de equilíbrio, têm-se como válidas as expressões matemáticas da Eq. 27.

$$(p_v A) + (\gamma A dz) = (p_h U dz \mu_w) + \left( \left( p_v + \frac{dp_v}{dz} dz \right) A \right) \quad (27)$$

resultando na Eq. 28:

$$(\gamma A dz) - (p_h U dz \mu_w) - (dp_v A) = 0 \quad (28)$$

Sendo, por hipótese,  $K = \frac{p_h}{p_v}$ , então  $p_v = \frac{1}{K} p_h$ , de modo que uma estimativa para

$dp_v$  é  $dp_v = \frac{1}{K} dp_h$ . Assim sendo, escreve-se a Eq. 29.

$$p_h U dz \mu_w + \frac{1}{K} dp_h A = \gamma A dz \quad (29)$$

que, quando dividimos essa expressão por  $A \neq 0$ , obtém-se Eq. 30:

$$\frac{\mu_w U}{A} p_h dz + \frac{1}{K} dp_h = \gamma dz \quad (30)$$

Para separar as variáveis, basta dividir, heurísticamente, todos os termos por  $dz$ , obtendo a Eq. 31.

$$\frac{\mu_w U}{A} p_h + \frac{1}{K} \frac{dp_h}{dz} = \gamma \quad (31)$$

ou seja, vale a Eq. 32

$$\frac{1}{K} \frac{dp_h}{dz} = \gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h \quad (32)$$

Isolando, heurísticamente,  $dz$  tem-se a equação Eq. 33:

$$dz = \frac{1}{K} \frac{1}{\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h} dp_h \quad (33)$$

E a expressão de Eq.33 está em variáveis separadas, podendo ser resolvida por integração elementar como na Eq. 34:

$$\begin{aligned} \int dz &= \int \frac{1}{K} \frac{1}{\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h} dp_h \\ &= \frac{1}{K} \int \frac{1}{\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h} dp_h \end{aligned} \quad (34)$$

Fazendo uma substituição de variáveis chamando-se de  $\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h = u$  obtém-se  $-\frac{\mu_w U}{A} dp_h = du$ , ou seja,  $dp_h = -\frac{A}{\mu_w U} du$ . Então a expressão na Eq. 34 é escrita como na Eq.35:

$$\begin{aligned} \int dz &= -\frac{1}{K} \int \frac{1}{u} \frac{A}{\mu_w U} du \\ &= -\frac{1}{K} \frac{A}{\mu_w U} \int \frac{1}{u} du \end{aligned} \quad (35)$$

que resolvida fornece a Eq. 36:

$$\begin{aligned} z &= -\frac{1}{K} \frac{A}{\mu_w U} \ln(u) + c \\ &= -\frac{1}{K} \frac{A}{\mu_w U} \ln\left(\gamma - \frac{\mu U}{A} p_h\right) + c \end{aligned} \quad (36)$$

Aplicando a condição de contorno, em  $z = 0$  vale  $p_h = 0$ , determina-se a constante de integração  $c$  pela Eq. 37.

$$\begin{aligned}
0 &= -\frac{1}{K} \frac{A}{\mu_w U} \ln\left(\gamma - \frac{\mu U}{A} 0\right) + c \\
&= -\frac{1}{K} \frac{A}{\mu_w U} \ln(\gamma) + c
\end{aligned}
\tag{37}$$

ou seja,  $\frac{A}{K\mu_w U} \ln(\gamma) = c$ , que substituída na Eq. 37 fornece a expressão da Eq. 38:

$$\begin{aligned}
z &= -\frac{1}{K} \frac{A}{\mu_w U} \ln\left(\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h\right) + \frac{A}{K\mu_w U} \\
&= \frac{A}{K\mu_w U} \left[ \ln \gamma - \ln\left(\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h\right) \right] \\
&= \frac{A}{K\mu_w U} \ln\left(\frac{\gamma}{\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h}\right)
\end{aligned}
\tag{38}$$

ou seja, podendo-se escrever como na Eq.39:

$$z = -\frac{A}{K\mu_w U} \ln\left(\frac{\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h}{\gamma}\right)
\tag{39}$$

que é manipulada algebricamente para explicitar a pressão horizontal em função da profundidade, visto que pelas suposições adotadas tem-se  $p_h = p_h(z)$ . Com efeito, reescreve-se a Eq. 39 através das pertinentes operações algébricas e usando as propriedades da função exponencial, como na Eq. 40:

$$\ln\left(\frac{\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h}{\gamma}\right) = -\frac{K\mu_w U}{A} z
\tag{40}$$

$$\frac{\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h}{\gamma} = e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z}$$

$$\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h = \gamma e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z}$$

$$\frac{\mu_w U}{A} p_h = \gamma \left( 1 - e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z} \right)$$

fornecendo a Eq. 41, também conhecida como equação geral da formulação de Janssen:

$$p_h = \frac{\gamma A}{\mu_w U} \left( 1 - e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z} \right) \quad (41)$$

Da suposição de Janssen,  $K = \frac{p_h}{p_v}$ , então  $p_v = \frac{1}{K} p_h$ , portanto, a tensão vertical  $p_v$  é

obtida pela eq. 42:

$$p_v = \frac{\gamma A}{K\mu_w U} \left( 1 - e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z} \right) \quad (42)$$

Observe que se a condição de contorno em  $z = 0$  é tal que  $p_h = p_{h,0}$ , com  $p_{h,0} \neq 0$ , avalia-se a constante de integração  $c$  na Eq. 37 como  $c = \frac{1}{K} \frac{A}{\mu_w U} \ln \left( \gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_{h,0} \right)$ , que substituída na equação Eq. 38, conduz a Eq. 43.

$$z = -\frac{1}{K} \frac{A}{\mu_w U} \ln(u) + c$$

$$= -\frac{1}{K} \frac{A}{\mu_w U} \ln \left( \gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h \right) + \frac{1}{K} \frac{A}{\mu_w U} \ln \left( \gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_{h,0} \right) \quad (43)$$

$$= \frac{A}{K\mu_w U} \left[ \ln \left( \gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_{h,0} \right) - \ln \left( \gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h \right) \right]$$

$$= \frac{A}{K\mu_w U} \ln \left( \frac{\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_{h,0}}{\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h} \right)$$

$$= - \frac{A}{K\mu_w U} \ln \left( \frac{\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h}{\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_{h,0}} \right)$$

A Eq. 43 é manipulada algebricamente para explicitar a pressão horizontal em função da profundidade, também através das pertinentes operações algébricas e usando as propriedades da função exponencial, obtendo-se a Eq. 44:

$$- \frac{K\mu_w U}{A} z = \ln \left( \frac{\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h}{\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_{h,0}} \right)$$

$$\frac{\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h}{\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_{h,0}} = e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z}$$
(44)

$$\gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_h = \left( \gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_{h,0} \right) e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z}$$

$$\frac{\mu_w U}{A} p_h = \gamma - \left( \gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_{h,0} \right) e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z}$$

de modo a se obter uma aproximação a  $p_h$  pela Eq.45:

$$p_h = \gamma \frac{A}{\mu_w U} - \frac{A}{\mu_w U} \left( \gamma - \frac{\mu_w U}{A} p_{h,0} \right) e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z}$$

$$= \frac{\gamma A}{\mu_w U} - \frac{\gamma A}{\mu_w U} e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z} + \frac{A}{\mu_w U} \frac{\mu_w U}{A} p_{h,0} e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z}$$
(45)

$$= \frac{\gamma A}{\mu_w U} \left( 1 - e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z} \right) + p_{h,0} e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z}$$

que é a solução geral para a pressão horizontal, quando da condição de contorno, em  $z = 0$  onde se tem que  $p_{h,0} \neq 0$ . Observe que de  $p_v = \frac{1}{K} p_h$  tem-se  $p_{v,0} = \frac{1}{K} p_{h,0}$  também se obtém a Eq. 46:

$$\begin{aligned} p_v &= \frac{\gamma A}{K\mu_w U} \left( 1 - e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z} \right) + \frac{p_{h,0}}{K} e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z} \\ &= \frac{\gamma A}{K\mu_w U} \left( 1 - e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z} \right) + p_{v,0} e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z} \end{aligned} \quad (46)$$

Um usual parâmetro  $K$  na formulação de Janssen foi obtido por Walker (1966) sob as hipóteses que o produto ensilado está em ruptura e, simultaneamente, está deslizando ao longo de uma parede rugosa. O autor empregou o método do círculo de Mohr para incluir o coeficiente de atrito com a parede,  $\phi_w$ , na equação de pressão, para obter a formulação apresentada como na Eq. 47.

$$K = \frac{1 + \sin^2(\phi_i) - 2\sqrt{(\sin^2(\phi_i) - \mu_w \cos^2(\phi_i))}}{4\mu_w^2 + \cos^2(\phi_i)} \quad (47)$$

Por sua vez, a força de arrasto atua na compressão da parede, opera de cima para baixo no sistema de referência adotado, e é obtida pela integração das pressões de atrito desenvolvidas entre os grãos e a parede durante o descarregamento. As pressões de atrito são determinadas pela Eq. 48.

$$p_w = \mu_w p_h \quad (48)$$

Sendo a teoria de Janssen desenvolvida para condições estáticas e, considerando que as forças de arrasto são mobilizadas na condição dinâmica, isto é, durante a descarga dos grãos do silo, as normas EN 1991-4 e AS 3774 recomendam que para a determinação das tensões de atrito desenvolvidas na parede do silo, seja aplicado às tensões horizontais

um coeficiente dinâmico de arrasto,  $C_w$ . Integrando a Eq. 48 acrescida do coeficiente dinâmico de arrasto obtém-se a força de arrasto para toda a profundidade do silo, Eq. 49.

$$\begin{aligned}
 p_w &= \int p_{w,d} dz \\
 &= \int C_w \mu_w p_h dz \\
 &= C_w \mu_w \int p_h dz \\
 &= C_w \mu_w \int \frac{\gamma A}{\mu_w U} \left( 1 - e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z} \right) dz
 \end{aligned} \tag{49}$$

Realizando a integração de  $z = 0$  até  $z = h$ , obtém-se a Eq. 50.

$$\begin{aligned}
 p_w &= C_w \mu_w \int_0^h \frac{\gamma A}{\mu_w U} \left( 1 - e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z} \right) dz \\
 &= C_w \mu_w \left[ \int_0^h \frac{\gamma A}{\mu_w U} dz - \int_0^h e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z} dz \right] \\
 &= C_w \mu_w \left[ \frac{\gamma A}{\mu_w U} z - \int_0^h e^{-\frac{K\mu_w U}{A} z} dz \right]
 \end{aligned} \tag{50}$$

Resolve-se a Eq. 50 fazendo-se uma substituição no termo da integral como  $u = -\frac{K\mu_w U}{A} z$ , de modo a se obter  $du = -\frac{K\mu_w U}{A} dz$ , isto é,  $-\frac{A}{K\mu_w U} du = dz$ . Assim, a expressão é reescrita como na Eq. 51:

$$\begin{aligned}
 p_w &= C_w \mu_w \left[ \frac{\gamma A}{\mu_w U} z + \int e^u \frac{A}{K\mu_w U} du \right] \\
 &= C_w \mu_w \left[ \frac{\gamma A}{\mu_w U} z + \frac{A}{K\mu_w U} \int e^u du \right]
 \end{aligned} \tag{51}$$

$$=C_w \mu_w \left[ \frac{\gamma A}{\mu_w U} z + \frac{A}{K \mu_w U} e^u + c \right]$$

$$=C_w \mu_w \left[ \frac{\gamma A}{\mu_w U} z + \frac{A}{K \mu_w U} e^{-\frac{K \mu_w U}{A} z} + c \right]$$

Para determinar a constante de integração  $c$  emprega-se a condição de contorno. Sabendo que em  $z=0$  tem-se  $p_w=0$ , para obter a Eq. 52:

$$0=C_w \mu_w \left[ \frac{\gamma A}{\mu_w U} 0 + \frac{A}{K \mu_w U} e^{-\frac{K \mu_w U}{A} 0} + c \right] \quad (52)$$

$$0=C_w \mu_w \left( \frac{A}{K \mu_w U} + c \right)$$

De modo que para  $C_w \mu_w \neq 0$  tem-se  $\frac{A}{K \mu_w U} + c = 0$ , isto é,  $c = -\frac{A}{K \mu_w U}$ . Fazendo as substituições, obtêm-se a Eq.53, expressão generalizada para determinação da força de arrasto na parede do silo.

$$p_w = C_w \mu_w \left( \frac{\gamma A}{\mu_w U} z + \frac{A}{K \mu_w U} e^{-\frac{K \mu_w U}{A} z} - \frac{A}{K \mu_w U} \right)$$

$$= C_w \frac{\mu_w A}{\mu_w U} \left( \gamma z + \frac{1}{K} e^{-\frac{K \mu_w U}{A} z} - \frac{1}{K} \right)$$

$$= C_w \frac{A}{U} \left[ \gamma z + \frac{1}{K} \left( e^{-\frac{K \mu_w U}{A} z} - 1 \right) \right] \quad (53)$$

$$p_w = C_w \frac{A}{U} \left[ \gamma z - \frac{1}{K} \left( 1 - e^{-\frac{K \mu_w U}{A} z} \right) \right]$$

A força de arrasto máxima ocorrerá na base da parede em  $z = h$ , levando à expressão Eq. 54:

$$p_w = C_w \frac{A}{U} \left[ \gamma h - \frac{1}{K} \left( 1 - e^{-\frac{K\mu_w U_h}{A}} \right) \right] \quad (54)$$

Dada a relevância teórica e prática do modelo de Janssen, vários autores realizaram estudos no sentido de aperfeiçoar o realizado, e entre os trabalhos destaca-se, historicamente e tecnicamente, o de Walker (Walker, 1966) “*An approximate theory for pressures and arching in hoppers*”. Uma discussão da abordagem do autor é vista no artigo original, mas as principais concepções estão bem sistematizadas em Nedderman (1992) e Seville et al. (1997).

A principal crítica à modelagem realizada por Janssen é a suposição por ele realizada de que as tensões verticais e horizontais são tensões principais e que a tensão de cisalhamento vertical na parede é não nula. Com efeito, se  $\sigma_{rr}(z)$  é uma tensão principal, o plano em que ela atua, que é a parede do silo, é um plano principal, onde as tensões de cisalhamento verticais  $\tau_w(z)$  devem ser nulas de acordo com a Teoria da Resistência dos Materiais, contradizendo o assumido por Janssen de que vale a relação  $\tau_w(z) = \mu_w \sigma_{rr}(z)$ , com  $\mu_w > 0$ .

Walker (1966) corrigiu em certa medida essa inconsistência ao modelar a distribuição da tensão real na região da parede. Em sua análise considerou o fato que se assumido que o material tende a deslizar para baixo na parede do silo, haverá uma tensão de cisalhamento direcionada para cima exercida pela parede sobre os grãos. Em Nedderman (1992) se discute que esta abordagem de Walker às distribuições de pressão é tecnicamente mais satisfatória que a de Janssen, embora as evidências experimentais fossem insuficientemente precisas para mostrar que tal refinamento fornecesse uma melhor predição da distribuição das tensões.

### 3.6 Normas estrangeiras

Muitas são as normas estrangeiras que especificam procedimentos para calcular os esforços nas paredes dos silos devidos aos processos de armazenamento de produtos sólidos a granel. Cabe ressaltar que apesar da realização de estudos experimentais e progressos alcançados nos últimos 50 anos, a maioria destas normas adotam as formulações de Janssen, denotando tamanha importância da contribuição dada por Janssen,

uma vez que, mesmo após 100 anos de sua publicação, sua teoria é a adotada por praticamente todas as normas (Ayuga et. al., 2001).

Segundo discutido por Cheung et al. (2015) a primeira norma para o cálculo de pressões em silos foi a norma Alemã, DIN 1055-6 (Deustsch Norm, 1964), sendo revisada em 1987 e 2005. No ano seguinte, foi publicada a norma Russa, SN-302-65 (1965); já os Estados Unidos, em 1977 publicaram a ACI 313-77 (ACI, 1977), passando por revisões em 1983, 1991 e 1997. Também em 1977 foi publicada a norma Argentina, IRAM 8015:1977, norma com procedimentos simplificados para o cálculo de silos metálicos para armazenamento de cereais em grãos e é direcionada para os requisitos de dimensionamento da estrutura de aço.

Na Grã-Bretanha foi publicada em 1974, a norma BS 5061, sendo posteriormente substituída pela BS EN 1991-4:2006, mundialmente conhecida como EUROCODE 1. Na Austrália, em 1990 foi publicada a norma AS 3774, a qual foi revisada em 1996, ficando mais completa e abrangente que a primeira, sendo a percussora da BS EN 1991-4:2006. Em 1988, foi publicada a norma ANSI/ASAE EP433, pela American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Por sua vez, a ISO 11697 foi publicada em 1995, numa versão resumida e limitada, não tendo muita aceitação internacional (Cheung et al., 2015).

Dentre as normas estrangeiras existentes, Carson e Craiga (2015), citam as quatro seguintes como principais:

1. EN 1991-4 “EUROCODE 1 – *Actions on structures – Part 4: Silos and Tanks*”;
2. ACI 313 “*Standard practice for design and construction of concrete silos and stacking tubes for storing granular materials*”;
3. ANSI/ASAE EP433 “*Loads exerted by free-flowing grain on bins*”;
4. AS 3774 “*Loads on bulk solids containers*”

No Brasil, apesar do empenho realizado por pesquisadores em Universidades Brasileiras, não existe uma norma específica para o cálculo das pressões exercidas pelos produtos armazenados sobre as paredes dos silos, levando os projetistas a adotarem procedimentos de dimensionamento destas estruturas conforme especificações dos códigos normativos de outros países, destacando como de maior utilização a ISO 11697, EN 1991-4, a AS 3774 e a DIN 1005 (Palma e Calil Júnior, 2008).

Apesar destas normas serem compostas com base em um vasto e avançado estudo no campo dos silos verticais, ainda existem incertezas consideráveis com relação às pressões que atuam nos silos, uma vez que as recomendações normativas divergem e

muitas condições de projeto não são contempladas por elas, obrigando os engenheiros de projeto a optarem por uma das duas opções (Carson e Craig, 2015):

- 1) Ser conservador em estimar as cargas aplicadas, opção que pode se tornar antieconômica e não garantindo que a estrutura não venha a apresentar falhas;
- 2) Contar com a experiência de outros engenheiros de cálculos que já tenham desenvolvido outras estruturas similares e que deram certo.

Neste sentido, esta pesquisa se propõe a analisar a norma europeia EN 1991-4 (2006), cuja versão atual, segundo Gallego (2006), conduz a valores de pressões equivalentes aos obtidos pelas recomendações contidas na DIN 1055 (2005), a norma australiana AS 3774 (1990) e a norma americana ANSI/ASAE EP433 (2002), sendo estas as normas aplicadas pelos calculistas de silos e empresas fornecedoras da maioria destas estruturas no Brasil.

### **3.6.1 Norma EN 1994-4: 2006, Eurocode 1**

Esta norma explora uma extensa pesquisa sobre silos ao longo dos últimos 30 anos. Foi extensivamente revisada por especialistas de engenharia civil, mecânica e química antes da sua adoção, e é amplamente reconhecida como padrão mais avançado neste tipo de estruturas no mundo (Carson e Craig, 2015).

Os Eurocódigos compreendem um grupo de normas para projetos estruturais para edificações e obras de engenharia, subdividem-se em nove, dentre os quais o Eurocodigo 1 é denominado como base de projeto e ações em estruturas. Este é subdividido e na parte 4 encontram-se as recomendações para as ações em silos e depósitos (Scalabrin, 2008).

Assim como outras tantas normas, a Eurocode 1 adota a formulação proposta por Janssen para o cálculo das pressões horizontais, pressões verticais e pressões de atrito com a parede na condição estática e adota coeficiente de majoração ou sobrepressão aplicados às pressões estáticas para a determinação das pressões dinâmicas. A aplicabilidade desta norma está restrita a silos com as seguintes características:

- i) Silos com características geométricas iguais às mostradas na Figura 22.
- ii) Silos com características de seções transversais iguais às mostradas na Figura 23.
- iii) Onde o carregamento produz efeitos de inércia e cargas de impacto desprezíveis;

- iv) Apresentem as seguintes características dimensionais: relação altura/diâmetro,  $h_b/d_c < 10$ ; altura total,  $h_b < 100$  m e diâmetro,  $d_c < 60$  m.
- v) O diâmetro máximo do produto armazenado deve ser menor que  $0,03 d_c$ ;
- vi) A transição reside em um único plano horizontal (Figura 22 A);
- vii) Não devem conter nenhum tipo de estrutura interna, tais como cone invertido ou vigas transversais;
- viii) Deve ser projetado para um intervalo definido de propriedades dos sólidos particulados.

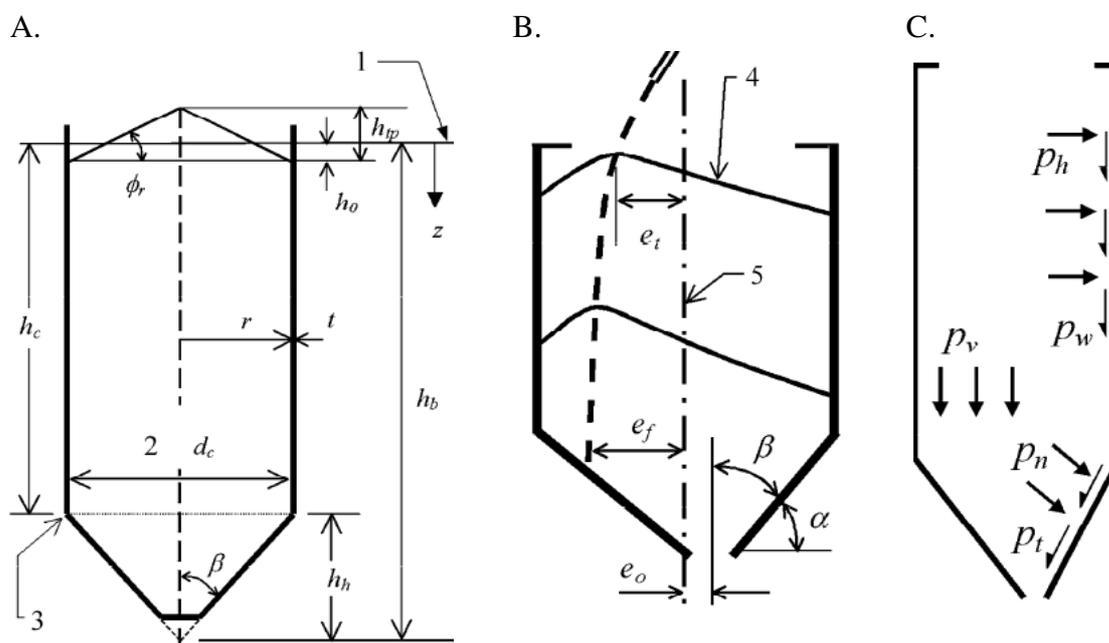


Figura 22. Características geométricas e denotação de pressões: Geometria (A); Excentricidades (B) e Tensões (C). Fonte: Eurocode 1 (2006).

sendo

$h_c$  – altura do corpo do silo até a superfície equivalente;

$h_h$  – altura da tremonha;

$h_b$  – altura total, até a superfície equivalente;

$d_c$  – diâmetro do cilindro;

$r$  – raio;

$t$  – espessura da parede;

$h_{tp}$  – altura da cobertura;

$h_o$  – altura da superfície equivalente em relação a horizontal virtualmente nivelada;

- $\beta$  – inclinação da tremonha em relação ao eixo vertical;  
 $\alpha$  – inclinação da tremonha em relação ao eixo horizontal;  
 $e_t$  – excentricidade de topo;  
 $e_f$  – excentricidade de fundo;  
 $e_o$  – excentricidade de descarga;  
 $p_n$  – pressão normal na tremonha;  
 $p_t$  – pressão tangencial na tremonha.

sendo que os números de 1 a 5 denotam o seguinte:

- 1) Superfície equivalente;
- 2) Dimensões internas;
- 3) Transição;
- 4) Superfície na condição completa;
- 5) Linha central do silo.

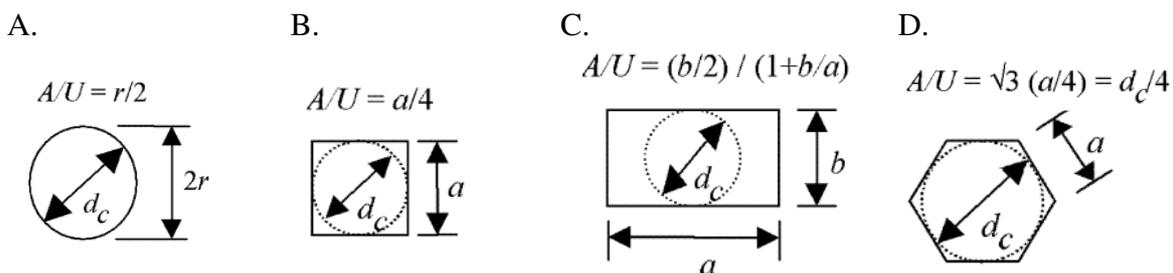


Figura 23. Formas de seção transversal: Circular (A); Quadrada (B); Retangular (C) e Hexagonal (D). Fonte: Eurocode 1 (2006).

Para tanto, e para garantir a correta aplicação desta norma, são necessários alguns conhecimentos preliminares básicos sobre a estrutura que se deseja dimensionar e do produto que será armazenado, isso porque, a norma classifica os silos em função destes parâmetros:

1. Características geométricas do silo, como altura, diâmetro, excentricidade do orifício de descarga, espessura da parede, entre outras;
2. Propriedades dos produtos armazenados no silo: peso específico, ângulo de atrito grão-parede, ângulo de atrito dos grãos, coesão, etc.

Com efeito, e de acordo com a Eurocode 1, há de se considerar diferentes classes e tipos de silos para o cálculo das pressões durante o enchimento e a descarga, que variam

em função do tipo de material e da rugosidade da parede, do sistema de esvaziamento (centrado ou excêntrico), de enchimento (centrado ou excêntrico), da secção do silo e da altura do material ensilado.

Neste sentido, os silos são divididos em três classes de confiabilidade de ações, de acordo com sua capacidade de armazenamento, desde pequenas e simples estruturas, classe 1, a grandes e complexas, classe 3, com a finalidade de reduzir riscos de falhas. Estas distinções permitem um adequado procedimento a ser usado para as condições dadas e diminuem questionamentos sobre a complexidade e perigos na adoção de simplificações em excesso. Detalhes dessas três classes são fornecidos na Tabela 12.

Tabela 12. Classe das ações em silos (Eurocode 1, 2006)

Classe	Descrição
Classe 1	Silos com capacidade abaixo de 100 toneladas
Classe 2	Todos os silos que não pertencem às classes 1 e 3
Classe 3	<p>Silos com capacidade acima de 10000 toneladas;</p> <p>Silos com capacidade acima de 1000 toneladas em que ocorrem pelo menos umas das seguintes situações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ descarga excêntrica com <math>e_o/d_c &gt; 0,25</math>;</li> <li>○ silos horizontais, baixos, com excentricidade de carregamento <math>e_t/d_c &gt; 0,25</math></li> </ul>

A norma também classifica os silos em função da sua relação altura/diâmetro,  $h_c/d_c$ , uma vez que esta relação influencia significativamente as magnitudes e padrões de normalidade das tensões exercidas pelo sólido a granel armazenado nas paredes do silo e, conseqüentemente, também o comportamento estrutural do mesmo. Esta classificação é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13. Classificação da esbeltes do silo (Eurocode 1, 2006)

Relação H/D	Classificação
$h_c/d_c \geq 2$	Esbelto
$1 < h_c/d_c < 2$	Medianamente esbelto
$0,4 < h_c/d_c \leq 1$	Baixo
$h_c/d_c \leq 0,4$	Silo horizontal

Também na norma são feitas distintas classificação do silo segundo a rugosidade da parede, sendo categorizado conforme mostrado na Tabela 14 e de acordo com a relação entre o diâmetro do corpo do silo e a espessura da chapa da parede,  $d_c/t$ , conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 14. Classificação dos silos segundo a aspereza da parede

Categoria	Descrição	Material
D1	Baixa fricção	- Aço inoxidável laminado a frio; - Aço inoxidável polido; - Superfície revestida; - Alumínio polido; - Polietileno
D2	Fricção moderada	- Aço carbono leve, liso (construção soldada ou aparafusada); - Revestimento do moinho de aço inoxidável; - Aço carbono galvanizado; - Alumínio oxidado; - Superfície revestida para resistência à corrosão ou desgaste abrasivo.
D3	Alta fricção	- Concreto; - Aço carbono envelhecido; - Aço resistente a abrasão; - Cerâmico.
D4	Irregular	- Paredes corrugadas horizontalmente; - Revestimento perfilado com nervuras horizontais; - Paredes não padronizadas com grandes irregularidades.

Tabela 15. Classificação dos silos conforme a espessura da parede

Relação de esbeltes	Classe do silo
$h_c/t > 200$	Parede delgada
$h_c/t < 200$	Parede grossa

A norma ainda faz distinções para o procedimento de cálculo entre os tipos de fluxo, massa ou funil, e para os silos com tremonha, de acordo com a inclinação desta.

Referente às propriedades dos produtos, na referida norma são encontradas tabelas próprias com valores ditos superiores e inferiores de parâmetros físicos e mecânicos de alguns produtos comumente armazenados em silos, e formulações matemáticas para a determinação dos produtos não contemplados, indicando métodos de ensaios para obtenção dos mesmos. Para considerar a variabilidade das propriedades dos produtos armazenados com o tempo, a norma estabelece que sejam utilizados os valores extremos das propriedades de modo a se obter a combinação mais crítica para cada situação e com isso, minimizar possíveis falhas da estrutura.

Na Tabela 16 pode ser observada a combinação destes valores limites de acordo com a situação de cálculo desejada.

Tabela 16. Combinação dos limites extremos das propriedades para o cálculo das máximas pressões

Aplicação	Valor característico recomendado			
	Peso específico	Coef. de atrito grão-parede	Ângulo de atrito interno	Parâmetro K
	( $\gamma$ )	( $\mu_w$ )	( $\phi_i$ )	
Pressão horizontal máxima ( $p_h$ )	Superior	Inferior	Inferior	Superior
Pressão vertical máxima ( $p_v$ )	Superior	Inferior	Superior	Inferior
Pressão de atrito máxima ( $p_w$ )	Superior	Superior	Inferior	Superior

Silos enquadrados na Classe 1 na avaliação das ações podem ser projetados com o uso dos valores médios das propriedades físicas dos produtos. No entanto, para os pertencentes às outras classes (Classe 2 e Classe 3), os valores devem ser aumentados ou diminuídos por um fator de conversão,  $a_K$ ,  $a_{\mu_w}$ ,  $a_{\phi_i}$ , para parâmetro K, coeficiente de atrito grão-parede e ângulo de atrito interno respectivamente, fornecidos pela norma de acordo com o produto armazenado.

No caso específico do milho, a norma estabelece a relação apresentada na Tabela 17.

Tabela 17. Propriedades físicas do milho e seus respectivos fatores de conversão recomendados pela norma EUROCODE 1

Propriedade	Valor médio	Fator de conversão, a	Valor inferior	Valor superior
Ângulo de atrito interno, $\phi_i$	31	1,14	$\phi_{imed} / a_{\phi i}$	$\phi_{isup} \cdot a_{\phi i}$
Coef. de atrito grão-parede, $\mu_w$	0,26*	1,24	$\mu_{wmed} / a_{\mu w}$	$\mu_{wmed} \cdot a_{\mu w}$
Parâmetro K	0,53	1,14	$K_{med} / a_K$	$K_{med} / a_K$

\* valor correspondente à parede do tipo D2

Como já mencionado, para a determinação da pressão normal na parede vertical do silo, a Eurocode 1 recomenda a equação de Janssen, considerando que nos silos de classe 3 é obrigatório considerar uma parcela de carga adicional para contemplar as excentricidades de enchimento e esvaziamento e a anisotropia do produto ensilado, atuando simultaneamente às cargas simétricas tanto no carregamento quanto na descarga. Sendo que as pressões de descarga, segundo a norma, são determinadas mediante a aplicação de coeficientes de sobrepressão acrescidos às pressões estáticas. Para silos baixos, a parcela de pressão adicional pode ser desprezada bem como para os de mediana esbeltez, enquadrados na classe 1 de ações. Para os silos medianamente esbeltos com classe de ações 2 ou 3 deve-se considerar a pressão adicional.

De acordo com a norma, as cargas sobre as paredes verticais dos silos devem ser determinadas conforme sua esbeltez,  $h_c/d_c$ , sendo que a mesma apresenta distintas formulações para cada caso, esbelto, medianamente esbelto, baixo e horizontal. Neste sentido, como o silo em estudo se enquadra na classificação de esbeltez mediana,  $1 < h_c/d_c < 2$ , será detalhado a seguir as formulações para este tipo de silo conforme a Eurocode 1.

### 3.6.1.1 Pressões estáticas ou de carregamento nas paredes de silos medianamente esbeltos

As pressões de carregamento são referentes à condição do silo completamente cheio, com o produto em repouso e são compostas pela combinação das pressões simétricas de carregamento e de uma pressão adicional dado que o silo pertence à classe 2 de ações.

### 3.6.1.1.1 Pressões simétricas de carregamento

Para esta análise, a norma estabelece que as pressões sejam consideradas simétricas ou uniformemente distribuídas a uma dada profundidade,  $z$  (Figura 24).

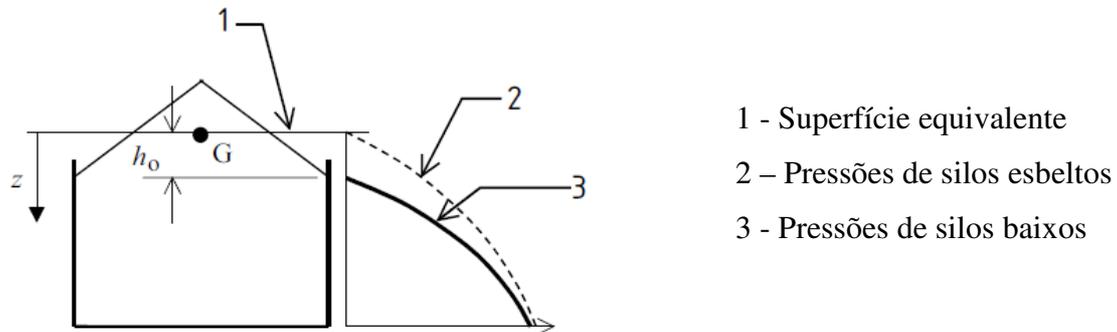


Figura 24. Superfície equivalente e diagramas (distribuição de pressões horizontais) em silos baixos ou medianamente esbelto (Eurocode, 2006).

Os valores da pressão horizontal de carregamento ( $p_{hf}$ ) e da compressão na parede por atrito ( $p_{wf}$ ), a qualquer profundidade após o enchimento, devem ser calculados pelas Eqs. 55 e 56 respectivamente.

$$p_{hf} = p_{ho} Y_R \quad (55)$$

$$p_{wf} = p_{hf} \mu_w \quad (56)$$

sendo as variáveis das equações obtidas por meio das Eqs 57 a 60.

$$p_{ho} = \gamma K z_o = \gamma \frac{1}{\mu_w} \frac{A}{U} \quad (57)$$

$$Y_R = \left( 1 - \left\{ \left( \frac{z - h_o}{z_o - h_o} \right) + 1 \right\}^n \right) \quad (58)$$

$$z_o = \frac{1}{\mu_w K U} \frac{A}{U} \quad (59)$$

$$n = -(1 + \tan \phi_r) \left(1 - \frac{h_o}{z_o}\right) \quad (60)$$

onde

$h_o$  é a distância entre  $z$  e o ponto mais alto de contato entre a parede vertical e o produto armazenado, conforme a Figura 24, e para o caso de silos com seção circular,

$$h_o = \frac{r}{3} \tan (\phi_r);$$

$\gamma$  é o peso específico;

$\mu_w$  é o coeficiente de atrito grão-parede;

$K$  é a razão entre a pressão vertical e horizontal,  $K = 1,1(1 - \sin \phi_i)$ ;

$z$  é a profundidade abaixo da superfície equivalente;

$A$  é a área do plano em corte transversal do silo;

$U$  é o perímetro do silo;

$\phi_r$  é o ângulo de repouso do produto;

$\phi_i$  é o ângulo de atrito interno.

Já o valor da pressão vertical de carregamento,  $p_{vf}$ , deve ser determinado pela Eq.

61:

$$p_{vf} = \gamma z_v \quad (61)$$

na qual  $z_v$  é obtido conforme Eq. 62.

$$z_v = h_o - \frac{1}{n+1} \left( z_o - h_o - \frac{(z - z_o - 2h_o)^{n+1}}{(z_o - h_o)^n} \right) \quad (62)$$

A força vertical de compressão por atrito,  $P_{wf}$ , resultante na parede por unidade de comprimento do perímetro, atuando em uma profundidade  $z$  após o carregamento deve ser calculada pela Eq. 63:

$$\begin{aligned} P_{wf}(z) &= \int_0^z p_{wf}(z) dz \\ &= \mu_w p_{ho} (z - z_v) \end{aligned} \quad (63)$$

### 3.6.1.1.2 Pressão adicional no carregamento

Considerada atuando numa faixa de altura,  $s$ , determinada pela Eq. 64. A pressão adicional ( $p_{pf}$ ) deve ser utilizada para considerar incertezas provenientes de pequenas excentricidades acidentais durante o processo de enchimento do silo e imperfeições geométricas da parede, sendo determinada pela Eq. 65.

$$s = \frac{\pi d_c}{16} \cong 0,2d_c \quad (64)$$

$$p_{pf} = C_{pf} p_{hf} \quad (65)$$

sendo a pressão horizontal ( $p_{hf}$ ) calculada pela Eq. 55 na altura,  $z$ , no nível de aplicação da pressão adicional e  $C_{pf}$  é o coeficiente de pressão estática adicional calculado pela Eq. 66.

$$C_{pf} = 0,21C_{op} \left[ 1 + 2 \left( \frac{2e_f}{d_c} \right)^2 \right] \left( 1 - e^{-1,5 \left[ \left( \frac{h_c}{d_c} \right) - 1 \right]} \right) \geq 0 \quad (66)$$

sendo,

$e_f$  - excentricidade máxima no carregamento, conforme ilustrado na Figura 26;

$C_{op}$  - fator de acréscimo para as cargas adicionais provocadas pelos sólidos armazenáveis, fornecido pela norma e no caso específico de grãos de milho,  $C_{op}=0,9$ ;

$e_o$  - representa a excentricidade do centro da saída (Figura 25).

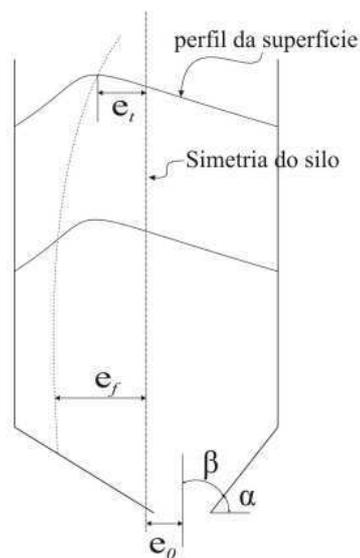


Figura 25. Excentricidades (Lopes Neto, 2009).

Para o caso de silos cilíndricos de paredes rígidas como os de concreto, por exemplo, a pressão adicional deve ser considerada constante e atuando em lados opostos do silo. Já para os silos circulares de paredes finas,  $d_c / t > 200$ , considera-se uma variação no valor da pressão adicional, de maneira que de um lado do silo ela tem direção para dentro e do lado oposto para fora, ou seja, varia de um valor máximo  $p_{pf}$  à um valor mínimo de  $-p_{pf}$ , conforme ilustrada na Figura 26.

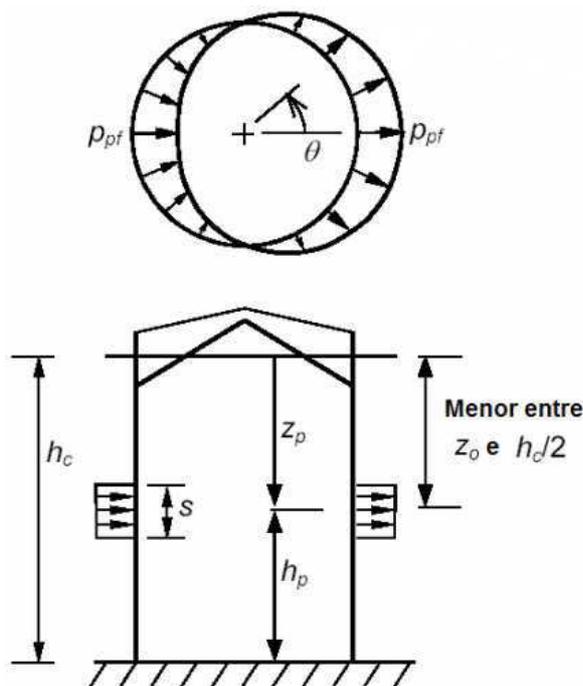


Figura 26. Distribuição da pressão adicional (EUROCODE, 2006; Madrona, 2008).

Assim, a variação da pressão adicional é expressa em termos de uma distribuição de pressões assimétricas ( $p_{pfs}$ ) conforme a Eq. 67.

$$p_{pfs} = p_{pf} \cos(\Theta) \quad (67)$$

sendo  $\Theta$  a coordenada circunferencial e a pressão  $p_{pf}$  calculada pela Eq. 64.

A altura  $z_p$  que define a posição da pressão adicional deve ser considerada a partir da superfície equivalente e tomada entre o menor dos seguintes valores:  $z_0$  e  $0,5 h_c$ , sendo  $z_0$  calculado pela Eq. 59.

Por sua vez, a força horizontal adicional total ( $F_{pf}$ ), sobre um silo circular de parede fina deve ser determinada pela Eq. 68.

$$F_{pf} = \frac{\pi}{2} S d_c p_{pf} \quad (68)$$

### 3.6.1.1.3 Pressões em fundo plano

Entende-se por silo de fundo plano aqueles que apresentam inclinação  $\alpha \leq 5^\circ$ . Nos silos esbeltos ( $h_c/d_c \geq 2$ ) a pressão vertical no fundo do silo pode ser considerada uniforme, e determinada pela Eq. 69.

$$p_{vfs} = C_b p_{vf} \quad (69)$$

sendo  $p_{vf}$  obtido pela Eq. 61 e  $C_b = 1,2$  para silos cuja classe de avaliação das ações seja 2 ou 3 segundo a norma.

Para os silos de medianamente esbeltos ( $1 < h_c/d_c < 2$ ) as pressões no fundo não apresentam o mesmo comportamento, sendo potencialmente maiores sendo determinadas conforme a Eq. 70:

$$p_{vfb} = p_{vb} + \Delta p_b \left( \frac{2,0 - \frac{h_c}{d_c}}{2,0 - \frac{h_{tp}}{d_c}} \right) \quad (70)$$

na qual  $\Delta p_b$  e  $p_{vtp}$  são obtidos pelas Eqs. 71 e 72 respectivamente.

$$\Delta p_b = p_{vtp} - p_{vho} \quad (71)$$

$$p_{vtp} = \gamma h_{tp} \quad (72)$$

sendo

$p_{vb}$  - componente da pressão vertical uniforme obtido a partir da Eq. 69 com  $z = h_c$ ;

$h_c$  - representa a profundidade da base do silo abaixo da superfície equivalente, conforme ilustrada na Figura 28;

$p_{vho}$  - pressão vertical na base da pilha superior formado pelo ângulo de repouso dos grãos armazenados no topo do silo, calculada pela Eq. 61 com  $z = h_o$ ;

$h_o$  - profundidade abaixo da superfície equivalente da base da pilha superior, ilustrada na Figura 28;

$h_{tp}$  - altura total da pilha superior, ilustrada na Figura 27.

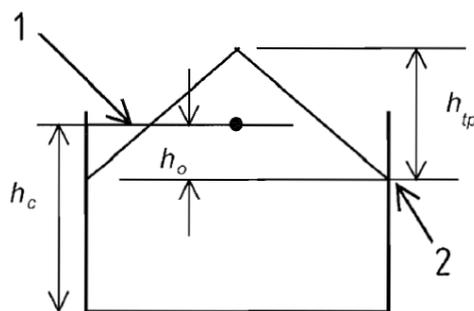


Figura 27. Indicação das componentes à determinação das pressões no fundo de silos planos (Eurocode, 2006).

O valor de  $p_{vfb}$  calculado pela Eq. 70, de acordo com a norma, representa a pressão vertical no fundo do silo, próxima ao centro. Ainda, estas considerações podem ser tomadas tanto para a condição de carregamento quanto para o descarregamento dos grãos do silo.

### 3.6.1.2 Pressões dinâmicas ou de descarregamento nas paredes de silos medianamente esbeltos

As pressões dinâmicas ou de descarregamento, assim como as estáticas, também são compostas de duas parcelas, uma referente às pressões simétricas de descarga e outra de pressão adicional.

#### 3.6.1.2.1 Pressões simétricas no descarregamento

Para as pressões simétricas, assim como outras normas, a EUROCODE 1 adota coeficientes de sobrepressão,  $C_h$  e  $C_w$ , aplicados às pressões estáticas horizontais e de atrito respectivamente, para determinar as pressões dinâmicas. Este coeficiente representa um possível aumento transitório na pressão que ocorre nas paredes do silo durante o processo de descarregamento. Desta forma, a pressão horizontal dinâmica,  $p_{hd}$ , e a pressão de atrito dinâmica,  $p_{wd}$ , são calculadas pelas Eqs. 73 e 74.

$$p_{hd} = C_h p_{hf} \quad (73)$$

$$p_{wd} = C_w p_{wf} \quad (74)$$

sendo  $C_h$  e  $C_w$  os coeficientes de sobrepressão horizontal e de atrito respectivamente e cujos valores recomendados pela norma para silos medianamente esbeltos,  $1,0 < h_c/d_c < 2,0$ , enquadrados nas classes de avaliação de ações 2 e 3 devem ser determinados pelas Eq. 75 e Eq. 76.

$$C_h = 1,0 + 0,15C_s \quad (75)$$

$$C_w = 1,0 + 0,1C_s \quad (76)$$

nas quais, o fator de ajuste de esbeltez ( $C_s$ ) é definido pela Eq. 77.

$$C_s = \frac{h_c}{d_c} - 1,0 \quad (77)$$

Para os silos de esbeltez intermediárias da classe 1 de ações, onde forem utilizados valores médios das propriedades  $K$  e  $\mu_w$  do material, os coeficientes de sobrepressão horizontal e de atrito na descarga devem ser tomados como nas Eqs. 78 e 79:

$$C_h = 1,0 + \left[ 0,15 + 1,5 \left( 1 + 0,4 \frac{e}{d_c} \right) C_{op} \right] C_s \quad (78)$$

$$C_w = 1,0 + 0,4 \left( 1 + 0,4 \frac{e}{d_c} \right) C_s \quad (79)$$

sendo  $e = \text{máx}(e_f, e_o)$

Por sua vez, o valor característico da força vertical de compressão por atrito na descarga,  $P_{wd}$ , resultante na parede por unidade de comprimento do perímetro, em qualquer profundidade  $z$  deve ser calculada pela Eq. 80:

$$\begin{aligned}
 P_{wd}(z) &= \int_0^z p_{wd}(z) dz \\
 &= C_w \mu_w P_{ho} (z - z_v)
 \end{aligned}
 \tag{80}$$

#### 3.6.1.2.2 Pressão adicional no descarregamento

A pressão adicional dinâmica para silos com mediana esbeltez devem ser calculadas de maneira análoga ao cálculo das pressões adicionais no carregamento, utilizando-se as mesmas formulações e coeficientes.

#### 3.6.1.2.3 Pressões em fundo plano

Determinada utilizando os mesmos procedimentos e equações para as pressões de carregamento já detalhadas.

### 3.6.2 Norma australiana AS 3774

Assim como a norma europeia, a norma AS 3774 utiliza a teoria de Janssen (1895) para a determinação das pressões estáticas horizontais ( $p_{hf}$ ), verticais ( $p_{vf}$ ) e de atrito ( $p_{wf}$ ). Sendo as pressões dinâmicas, na descarga, calculadas a partir das pressões estáticas multiplicadas por coeficientes de sobrepressão.

Apesar de não dividir os silos de acordo com a classe de confiabilidade das ações, a norma os classifica conforme os critérios contidos da Tabela 18. Também faz recomendações em tabelas próprias de valores representativos para as propriedades físicas e mecânicas de alguns produtos armazenados, limitando seu uso para o caso de não haver a possibilidade de realização de ensaios específicos com o produto, especificando as combinações a serem feitas na utilização dos valores limites superior e inferior conforme Tabela 19.

Tabela 18. Classificação dos tipos de silos conforme a norma AS 3774

Critério	Classificação
Esbeltez ( $h_b/d_c$ )	Baixos: $h_b/d_c < 1,0$ ;
	Medianamente esbeltos: $1,0 \leq h_b/d_c \leq 3,0$ ; Esbelto: $h_b/d_c > 3,0$ .
Tipo de fluxo	Fluxo de massa; Fluxo de funil; Fluxo em tubo; Fluxo expandido; Fluxo excêntrico.
Geometria do fluxo	Fluxo simétrico (centro de gravidade do canal de fluxo coincide com o eixo vertical do silo); Fluxo plano simétrico (tremonha retangular); Fluxo assimétrico; Fluxo de superfície livre em silos baixos.
Rugosidade das paredes	Polida, D1; Lisa, D2; Rugosa, D3; Corrugada, D4.
Flexibilidade das paredes	Paredes rígidas ( $D/t < 100$ ); Paredes semirrígidas ( $100 < D/t < 500$ ); Paredes finas ( $D/t > 500$ ).
Continuidade vertical das paredes	Paredes contínuas como silos de aço completamente soldados ou silos de concreto protendido; Paredes descontínuas, como as de aço corrugado.
Formato da seção transversal	Circular, quadrada, retangular, estrelar, poligonal, anelar e irregular.
Posição da abertura de descarga	Boca de saída circular ou quadrada localizada no centro da seção transversal projetada para o fluxo uniforme; Boca de saída retangular localizada no centro da seção Transversal; Boca de saída circular ou quadrada excêntrica isolada ou múltiplas saídas ao redor de uma circunferência; Abertura de descarga situada na parede do silo.
Meios de promoção do fluxo	Fluxo gravitacional; Vibração mecânica; Introdução de ar sobre toda a superfície do fundo do silo; Equipamentos dinâmicos de impacto; Promoção combinada de fluxo.

Fonte: Adaptado de Madrona (2008).

Tabela 19. Valores apropriados das propriedades dos produtos

Aplicação	Valor característico		
	Ângulo de atrito grão-parede, $\phi_w$	Parâmetro K	Efetivo ângulo de atrito interno, $\phi_e$
Máxima pressão horizontal, $p_h$	Inferior	Superior	Inferior
Máxima pressão de atrito, $p_w$	Superior	Superior	Inferior
Máxima pressão vertical, $p_v$	Inferior	Inferior	Superior

Como pode ser observado, diferentemente da norma europeia, que utiliza o ângulo de atrito interno,  $\phi_i$ , em suas formulações, a norma australiana utiliza o efetivo ângulo de atrito interno,  $\phi_e$ , com o valor do coeficiente K calculado conforme a Eq. 81.

$$K = \frac{1 + \text{sen}^2 \cdot \phi_e - 2\sqrt{(\text{sen}^2 \cdot \phi_e - \mu_w^2 \cdot \text{cos}^2 \cdot \phi_e)}}{4 \cdot \mu_w^2 + \text{cos}^2 \cdot \phi_e} \geq 0,35 \quad (81)$$

Para silos com parede composta por chapas corrugadas, tipo D4, a norma propõe em anexo a obtenção do coeficiente de atrito grão-parede efetivo,  $\mu_{wef}$ , calculado em função dos resultados dos ensaios Jenike com amostra de chapa de mesmo material, porém não corrugada, sendo determinado conforme Eq. 82.

$$\mu_{wef} = u_2 \cdot \mu_i + u_3 \cdot \mu_w \quad (82)$$

sendo

$\mu_i$  – coeficiente de atrito interno,  $\mu_i = \tan \phi_i$ ;

$\mu_w$  – coeficiente de atrito da superfície plana,  $\mu_w = \tan \phi_w$ ;

$u_2$  e  $u_3$  - Representam a proporção do sólido a granel com deslizamento grão-grão e grão-parede, onde  $u_2 = \frac{y_1}{(x_2+y_1)}$  e  $u_3 = \frac{x_2}{(x_2+y_1)}$  determinados pelo perfil da chapa conforme Figura 28.

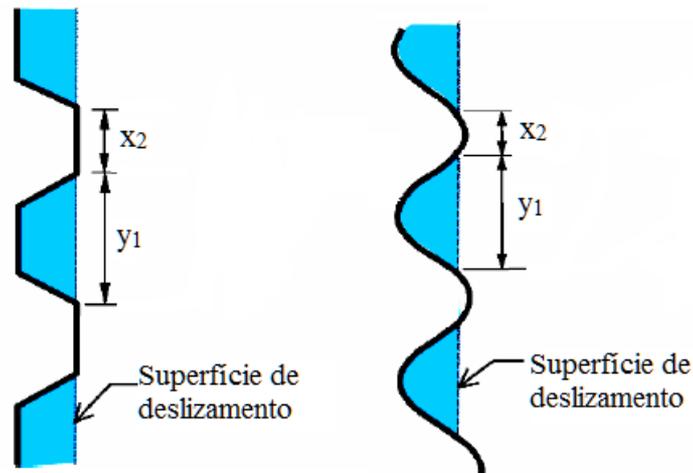


Figura 28. Dimensões das chapas corrugadas. Adaptado de AS 3774 (1990).

### 3.6.2.1 Pressões estáticas ou de carregamento

A norma utiliza a teoria de Janssen, sendo a pressão horizontal, pressão vertical e de atrito na parede do silo equacionadas conforme Eqs. 83, 84 e 85, respectivamente.

$$p_{hf} = \frac{\gamma \cdot r_c \cdot c_z}{\mu_w} \quad (83)$$

$$p_{vf} = \frac{\gamma \cdot r_c \cdot c_z}{K \cdot \mu_w} \quad (84)$$

$$p_{wf} = \gamma \cdot r_c \cdot c_z \quad (85)$$

sendo

$p_{hf}$  – pressão horizontal [kPa];

$p_{vf}$  – pressão vertical [kPa];

$p_{wf}$  – pressão de atrito [kPa];

$\gamma$  - peso específico [kN/m<sup>3</sup>];

$r_c$  – valor característico ao tipo de seção do silo, para o caso de seção circular,  $r_c=0,25 \cdot d_c$ , onde  $d_c$  é o diâmetro do silo [m];

$\mu_w$  – coeficiente de atrito grão-parede;

$$c_z = 1 - e^{\left(-\frac{z}{z_0}\right)};$$

$e$  – base de Logaritmo Neperiano;

$z$  – profundidade abaixo da superfície equivalente [m];

$z_0$  – profundidade característica [m], em que  $z_0 = r_c/\mu_w \cdot K$ .

São previstos ainda, de acordo com esta norma, incrementos às pressões horizontais para os casos específicos de: rápido carregamento, expansão do produto com a absorção de umidade, carregamento excêntrico, vibrações severas, entre outras.

A força vertical de compressão,  $P_{wf}$ , por unidade de comprimento na parede do silo (kN/m) é calculada pela Eq. 86.

$$P_{wf} = \gamma \cdot r_c (z - z_0 \cdot c_z) \quad (86)$$

Diferentemente das outras normas, a AS 3774 estabelece o cálculo da pressão vertical no fundo do silo, variando segundo a coordenada radial, numa configuração parabólica, calculada pela Eq. 87.

$$p_{vfx} = 1,25 \cdot p_{vf} \left[ 1 - 1,6 \left( \frac{x}{d_c} \right)^2 \right] \quad (87)$$

com

$p_{vfx}$  – pressão vertical no fundo do silo [kpa];

$p_{vf}$  – pressão vertical calculada pela Eq. 84 com  $z = h_b$ ;

$x$  – coordenada radial no silo circular [m];

$d_c$  – diâmetro do silo [m].

Também, considera que a base de fundo do silo deve suportar esforços de tração, devidos ao cisalhamento horizontal, agindo do centro do silo para as extremidades, sendo calculado pela Eq. 88.

$$p_{sfx} = 0,3 \cdot p_{vf} \left[ \left( \frac{2 \cdot x}{d_c} \right) - \left( \frac{2 \cdot x}{d_c} \right)^2 \right] \quad (88)$$

### 3.6.2.2 Pressões dinâmicas ou de descarregamento

Como já discutido anteriormente, as pressões de descarga para a norma australiana são calculadas a partir das pressões estáticas multiplicadas por coeficientes de sobrepressão. Desta forma, a pressão horizontal dinâmica,  $p_{hd}$ , é calculada pela Eq. 89.

$$p_{hd} = C_{hd} \cdot p_{hi} \quad (89)$$

onde o coeficiente de sobrepressão,  $C_{hd}$ , aplicado à pressão horizontal deve ser tomado como o maior valor entre os obtidos pelas Eqs. 90 e 91:

$$C_{hd} = \left[ 7,6 \left( \frac{h_b}{d_c} \right)^n - 6,4 \right] c_c \quad (90)$$

$$C_{hd} = 1,2c_c \quad (91)$$

com

$h_b$  – altura efetiva do silo [m];

$d_c$  – diâmetro do silo [m];

$n$  – exponencial, igual a 0,06;

$c_c$  – coeficiente de geometria do fluxo: 1,0 para fluxo simétrico e 1,2 para fluxo planar.

A pressão vertical dinâmica,  $p_{vd}$ , deve ser tomada como o menor valor entre os calculados pelas Eqs. 92 e 93.

$$p_{vd} = C_{vd} \cdot p_{vf} \quad (92)$$

$$p_{vd} = \gamma \cdot z \quad (93)$$

$C_{vd}$  – coeficiente de sobrepressão vertical,  $C_{vd} = 1,0 + \tan \phi_e$ , para grãos agrícolas.

$\gamma$  - peso específico [kN/m<sup>3</sup>];

$z$  – profundidade abaixo da superfície equivalente [m];

Para o cálculo da pressão de atrito no descarregamento,  $p_{wd}$ , a norma especifica a Eq. 94 e para a força vertical de compressão na parede do silo,  $P_{wd}$ , por unidade de comprimento (kN/m) a Eq. 95.

$$p_{wd} = C_{wd} \cdot p_{wf} \quad (94)$$

$$P_{wd} = C_{wd} \cdot P_{wf} \quad (95)$$

em que

$C_{wd}$  – coeficiente multiplicador de sobrepressão de atrito: 1,2 para fluxo simétrico e 1,4 para fluxo planar;

$p_{wf}$  – pressão de atrito no carregamento [kPa];

$P_{wf}$  é a força vertical de compressão por atrito na parede do silo calculada para o carregamento.

### 3.6.3 Norma americana ANSI/ASAE EP433

As especificações desta norma são apresentadas de forma bem objetiva e bastante simplificadas, com recomendações para a estimativa das pressões devidas aos grãos armazenados em silos sem excentricidades de carga e descarga e para produtos de fluxo livre. Adota as formulações de Janssen (1895) para prever as cargas estáticas tanto nas paredes quanto no fundo dos silos.

Esta norma não preconiza sobrepressão, ou seja, majoração dos esforços na situação de descarregamento, para o fluxo do tipo funil, fazendo-o apenas para o fluxo do tipo *plug*, Figura 29, sendo que a mesma preconiza que este tipo de fluxo ocorre predominantemente em silos cuja relação altura diâmetro,  $H/D \geq 2,0$ .

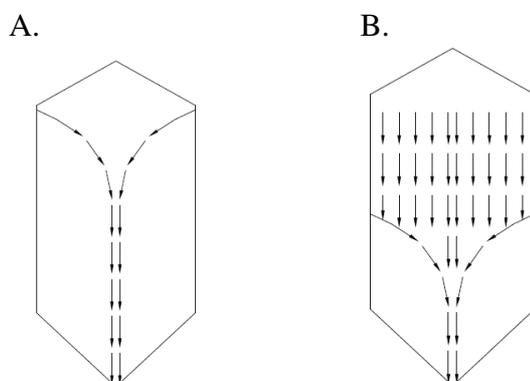


Figura 29. Padrões de fluxo: fluxo tipo funil (A); Fluxo tipo *plug* (B). Adaptado de ANSI/ASAE EP433 (2002).

Para o caso do fluxo ser do tipo *plug*, adota um fator de sobrepressão,  $F$ , igual a 1,4 multiplicado às pressões horizontais. Como nesta pesquisa, o silo em análise possui  $H/D < 2$ , portanto, o fluxo é do tipo funil, não sendo abordado aqui o fluxo do tipo *plug*.

Em suas formulações, o parâmetro  $K$  é o mesmo, independente do produto armazenado e o coeficiente de atrito grão-parede,  $\mu_w$ , varia de acordo com o tipo de material utilizado na fabricação do silo, com valores conforme mostrado na Tabela 20.

Tabela 20. Fator de sobrepressão e propriedades do material

Material da parede do silo	$\mu_w$	K	F
Aço	0,30	0,5	1,4
Concreto	0,40	0,5	1,4
Aço corrugado	0,37	0,5	1,4

A norma recomenda a utilização de peso específico máximo,  $\gamma$ , dos grãos de trigo, cujo valor é 834 kg/m<sup>3</sup>, para qualquer produto com fluxo livre, ou então, determinar a densidade por meio de ensaios padronizados ou ainda, usar valores listados na ASAE Data D241 “*Density, Specify Gravity and Weight-Moisture Relationships of Grain for Storage*”, aplicando um fator de compactação de 1,08. Assim, de acordo com esta norma, o cálculo das pressões estáticas em função da profundidade para silos com fluxo do tipo funil é efetuado utilizando as Eqs. 96, 97 e 98, para as pressões verticais, horizontais e de atrito respectivamente.

$$p_v(z) = \frac{\gamma \cdot R \cdot G}{K \cdot \mu_w} \left[ 1 - e^{-\left(\frac{\mu_w \cdot K \cdot z}{R}\right)} \right] \quad (96)$$

$$p_h(z) = K \cdot p_v(z) \quad (97)$$

$$p_w(z) = \mu_w \cdot p_h(z) \quad (98)$$

sendo

$\gamma$  - peso específico [kg/m<sup>3</sup>]; R - raio hidráulico do silo [m]; G - constante gravitacional [9.82x10<sup>-3</sup> kN/kg]; z - profundidade equivalente [m];  $p_v$  - pressão vertical [kPa];  $p_h$  - pressão horizontal [kPa];  $p_w$  - pressão de atrito [kPa].

E a força vertical de compressão,  $P_v$ , por unidade de comprimento na parede do silo (kN/m) é calculada pela Eq. 99.

$$P_v = [\gamma \cdot G \cdot z - p_v] \cdot R \quad (99)$$

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa é realizada uma análise teórica-experimental das pressões horizontais, verticais e de arrasto, nas paredes e no fundo de um silo metálico cilíndrico, provocadas pelo armazenamento de grãos de milho, sendo constituída de duas etapas principais:

- 1) Revisão bibliográfica retratando os principais conceitos, aplicações e teorias acerca do dimensionamento de silos, com posterior cálculo das pressões teóricas adotando-se a teoria de Janssen no escopo das normas EN 1991-4, AS 3774 e a ANSI/ASAE EP433 de modo a compará-las entre si e com os valores experimentais;
- 2) Medição direta das solicitações através da instrumentação com células de carga nos montantes e células de pressão nas paredes e no fundo de um silo em verdadeira grandeza, medianamente esbelto, confeccionado de chapas metálicas corrugadas e com fundo plano, sendo o registro dos esforços solicitantes realizado durante o processo de carregamento, armazenamento e descarregamento dos grãos.

### 4.1 Características do silo instrumentado

O silo analisado é de propriedade da Cooperativa de Produtores Agrícolas, COPAGRIL, localizado no município de Entre Rios do Oeste - PR, e foi fabricado e instalado pela indústria CONSILOS, sediada no município de Cascavel – PR. Faz parte de um conjunto de seis silos, divididos em duas baterias, medindo 18,42 m de diâmetro interno e altura total de 25,35 m (20,03 m de corpo e 5,32 m de cobertura) sendo, portanto, caracterizado como medianamente esbelto,  $1 < \frac{h_c}{d_c} < 2$ , pela norma EN 1991-4 e AS 3774. O silo possui volume total de 5.810,00 m<sup>3</sup> e capacidade para armazenar 4.357,00 toneladas de grãos de milho.

Os processos de carga e descarga são executados concêntricamente pela parte superior e inferior do silo, respectivamente. Possui um orifício de descarga principal por gravidade, no centro do fundo, medindo 42 cm x 42 cm e mais quatro orifícios auxiliares de 30 cm x 30 cm distribuídos ao longo do diâmetro para promover a descarga manual do produto remanescente. Apresenta fundo plano de concreto armado e sua parede lateral é de

chapas metálicas corrugadas, manufaturadas com aço de alta resistência, denominado ZAR 345. Sua implantação bem como suas características geométricas podem ser observadas na Figura 30.

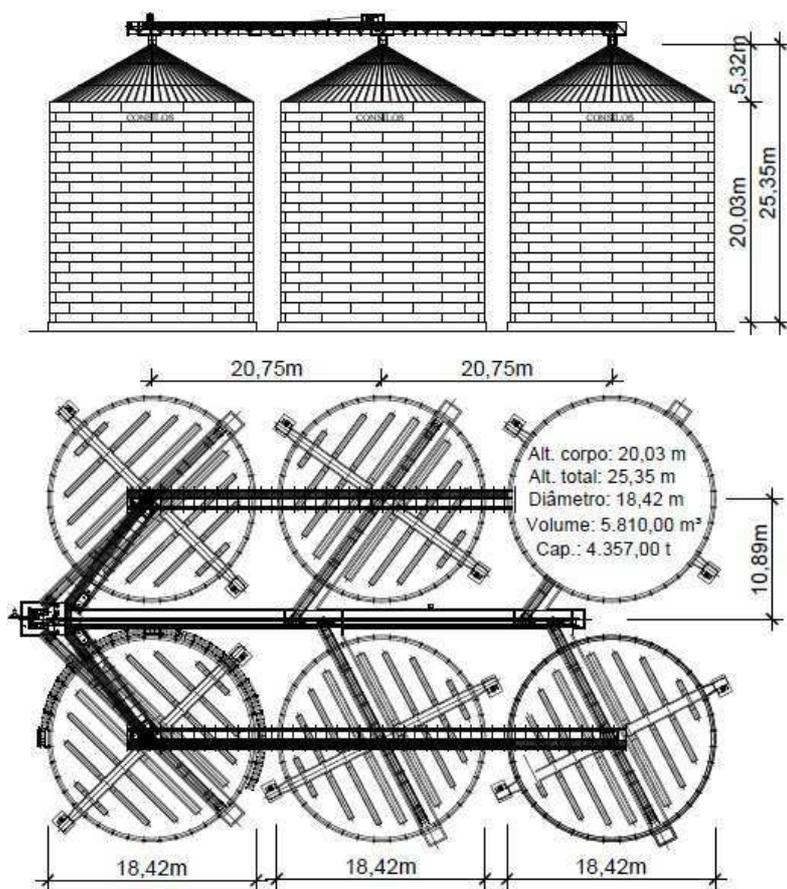


Figura 30. Detalhe da implantação dos silos e características geométricas.

#### 4.2 Propriedades do material do silo

As propriedades mecânicas do aço constituinte das chapas metálicas do silo são tomadas conforme especificações técnicas estabelecidas nos catálogos dos fornecedores, sendo seus respectivos valores apresentados na Tabela 21.

Tabela 21. Propriedades mecânicas do material constituinte do silo

Propriedade do aço	Valor característico
Módulo de elasticidade longitudinal ( $E_s$ ) [GPa]	210
Coefficiente de Poisson ( $\nu_s$ ) [mm.mm <sup>-1</sup> ]	0,30
Tensão limite de escoamento ( $f_y$ ) [MPa]	345
Limite de resistência à tração ( $f_u$ ) [MPa]	430

As paredes verticais do silo são constituídas de chapas metálicas corrugadas, cuja onda completa tem 1,5" de comprimento, espessura de 1,55 mm, com geometria conforme mostrada na Figura 31, com dimensões em milímetros.

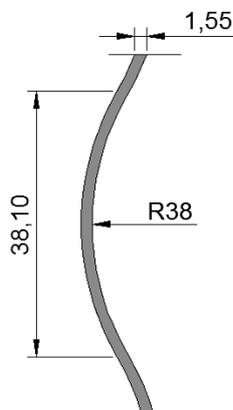


Figura 31. Geometria da chapa metálica constituinte do silo (CONSILOS).

#### 4.3 Caracterização das propriedades físicas e de fluxo dos grãos

Para a avaliação das pressões teóricas resultantes do produto armazenado, foram coletadas amostras de grãos de milho junto à cooperativa COPAGRIL, nas mesmas condições em que são estocadas nos silos, para obtenção das propriedades físicas e de fluxo.

As condições de temperatura e umidade dos grãos foram determinadas na central de recebimento de grãos da cooperativa com o medidor de umidade digital modelo 999-ES da Motomco, registrando umidade de 12,5 % e temperatura de 24,7°, Figura 32 A e B.

A.



B.



Figura 32. Medidor de umidade e temperatura: Modelo do equipamento (A); Resultados observados (B).

As amostras de grãos de milho foram ensaiadas no aparelho de cisalhamento direto, *Jenike Shear Cell*, no Laboratório de Construções Rurais e Ambientação, LACRA, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), com procedimento de ensaio conforme recomendações do manual *Standart Shear Testing Techique for Particulate Solids Using the Jenike Shear Cell* (1989) e Milani (1993). As amostras foram consolidadas com cargas de pré-cisalhamento ( $W_p$ ) de 100 N, 70 N e 50 N, tendo sido executados três ensaios para cada carga, com diferentes cargas de cisalhamento ( $W_s$ ) conforme mostrado na Tabela 22.

Tabela 22. Níveis de carregamento utilizados nos ensaios JENIKE

Ensaio	$W_p$ (N)	$W_s$ (N)
1	100	70
	100	50
	100	35
2	70	50
	70	35
	70	25
3	50	35
	50	20
	50	10

Para o ensaio de cisalhamento com a parede do silo, foi utilizada amostra de chapas de aço rugoso, com as mesmas propriedades da chapa que compõe a parede do silo, porém sem ser corrugada, aplicando os seguintes níveis de carregamento à amostra: 50 N, 40 N, 30 N, 20 N e 10 N. Nos cálculos das pressões, portanto, são empregados os valores obtidos neste ensaio nas formulações específicas de cada norma para a obtenção do coeficiente efetivo de atrito grão-parede.

#### 4.4 Instrumentação das partes constituintes do silo

O silo, objeto deste estudo, como já mencionado é vertical, cilíndrico, confeccionado com chapas metálicas, pertencente a um conjunto de seis silos divididos em duas baterias. Na Figura 33 é mostrada uma vista geral da localização do silo em relação aos demais do conjunto. Estes silos têm cerca de cinco anos de utilização em armazenamento de grãos de milho para a fabricação de ração.

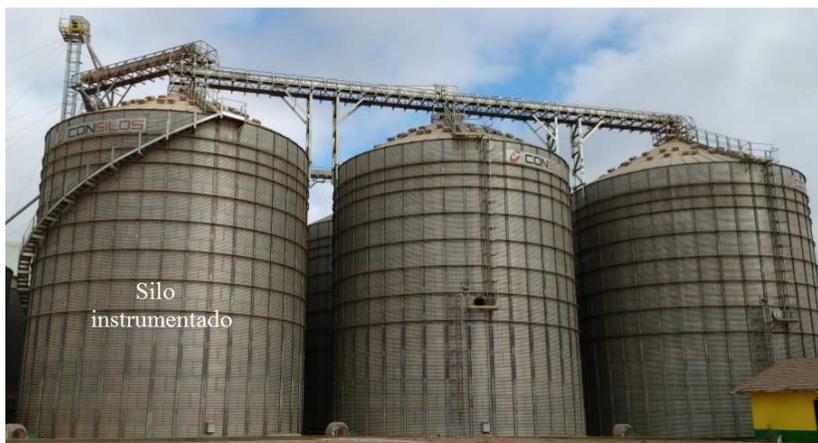
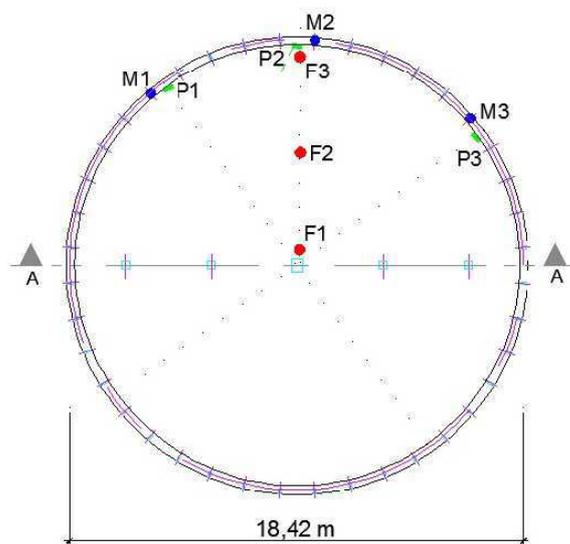


Figura 33. Vista do silo em estudo.

A instrumentação foi realizada por meio de células de pressão para medições das pressões horizontais nas paredes laterais e de pressões verticais no fundo do silo e por meio de células de carga para medir os esforços de arrasto nos montantes durante três ciclos completos do processo de armazenamento de grãos de milho. Na Figura 34 é ilustrado o esquema da instrumentação do silo.

A.



B.

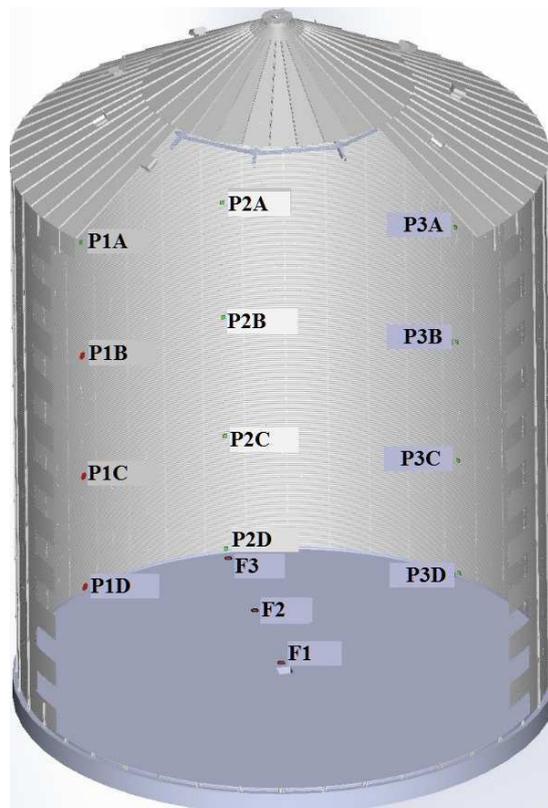


Figura 34. Distribuição das células em  $\frac{1}{4}$  do silo: Localização geral, em planta, dos pontos de instrumentação do silo (A); Vista (B).

Foram utilizadas no total 18 células, distribuídas da seguinte forma: três no fundo (F1, F2 e F3); três nos montantes (M1, M2 e M3) e 12 na parede, divididas em três colunas, P1 (ABCD), P2 (ABCD) e P3 (ABCD), onde as letras ABCD designam as diferentes alturas em que as células foram instaladas.

Optou-se por concentrar a instrumentação em um quadrante apenas, no intuito de se obter resultados mais significativos. Portanto, foi assumido axissimetria de tensões nas etapas de carregamento e de descarregamento do silo. Esta hipótese parece ser razoável por tratar-se de material de elevada homogeneidade e apresentar fluxo livre.

#### 4.4.1 Calibração das células de carga e células de pressão

Foram utilizados três tipos de células, denominadas tipo 1, tipo 2 e tipo 3, ilustradas na Figura 35.

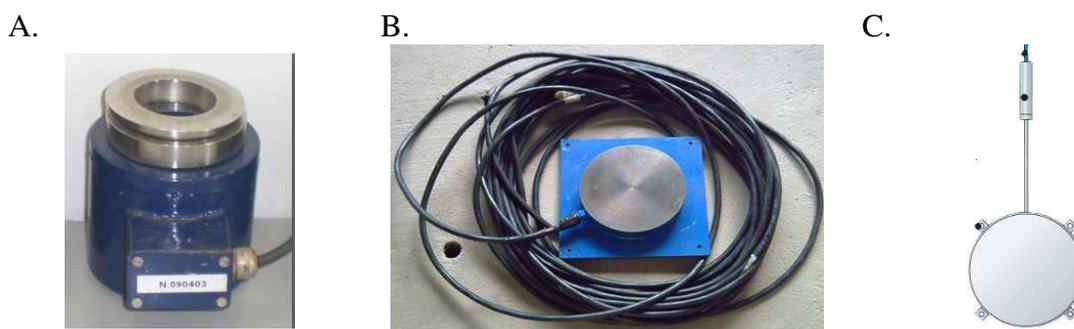


Figura 35. Tipos de células a serem utilizadas: Tipo 1 (A); Tipo 2 (B); Tipo 3 (C).

As características das células são as seguintes:

1. Células do tipo 1 – Célula de carga modelo MCC-2-60- TD10, do fabricante Micro Sensores S/A, com capacidade de carga de 600 kN na compressão com erro máximo de 0,05%, com extensômetros elétricos de resistência nominal igual a 700 Ohms, ligados em ponte completa (4000  $\mu\epsilon$  correspondentes a 2 mV.V<sup>-1</sup>). São de propriedade da empresa Fungeo Fundações e Geologia Ltda. Estas células foram instaladas entre o montante e o anel de rigidez da fundação do silo;
2. Células do tipo 2 – Células de pressão do tipo diafragma, confeccionadas no Laboratório de Estruturas de Concreto da UNIOESTE, campus de Cascavel. Medindo 90 mm de diâmetro e diafragma com 1,15 mm de

espessura, com capacidade de 150 kPa, as quais foram instaladas na parede do silo;

3. Célula do tipo 3 – Células de pressão do tipo hidráulica, modelo EPC 3500-1-100 do fabricante GEOKON e de propriedade da Universidade Federal de Campina Grande, UFCG. São montadas com duas placas circulares de aço inoxidável, soldadas em seu contorno com diâmetro de 22,86 cm e espessura de 6,35 mm. Apresentam faixa de pressão que varia de 0 a 700 kPa, com sensibilidade de 0,175 kPa (700/4000) com duas faces ativas. A resistência da ponte para o modelo é de 5000  $\Omega$ . Foram instaladas num total de seis unidades, sendo três instaladas no fundo do silo e as outras três na parede.

Antes da instalação no silo, todas as células foram devidamente calibradas no Laboratório de Concreto do Parque Tecnológico de Itaipu, localizado no município de Foz do Iguaçu-PR, sendo as considerações adotadas na calibração descritas a seguir.

#### 4.4.1.1 Calibração das células de pressão tipo 1

Para as células do tipo 1, apesar de apresentarem duas faces ativas, foi considerado que sob a ação dos grãos, apenas uma superfície é ativa pois o posicionamento destas no silo foi em superfície plana rígida, fundo do silo e sobre as superfícies das paredes verticais ao longo da altura.

Neste sentido, para realizar a calibração, cada célula de pressão foi montada sobre uma base metálica rígida com uma camada de borracha pouco deformável de 5 mm de espessura, e na face ativa (superior) aplicado um conjunto deformável, composto de uma camada de borracha macia de 5 mm, uma camada de isopor de 8 mm e outra camada de borracha macia de 5mm, sob uma placa metálica rígida de apoio para aplicação da força distribuída na forma de pressão, para assim reproduzir a pressão granular (Figura 36). A tensão de alimentação é de 10 V com leitura de variação de sinal de 0 a 100 mV convertida em pressão.

As forças foram aplicadas de forma crescente em dez estágios de 2 kN, obtendo-se os pontos de leitura de sinal em mV para cada força aplicada, resultando em comportamento linear. As forças foram aplicadas por meio de uma prensa hidráulica com capacidade de 20 tf, resolução de 0,2 kN, marca Amsler, para todas as células de pressão (tipo 2 e 3).



Figura 36. Calibração das células do tipo 1.

#### 4.4.1.2 Calibração das células de pressão tipo 2

As células de pressão do tipo diafragma, aqui nomeadas do tipo 2, foram disponibilizadas pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, são de fabricação própria, utilizando sensores resistivos tipo *strain-gages* de 350 *ohms* em ponte completa e alimentação de 10 V. Foram utilizadas sobre a superfície ativa do diafragma duas camadas de borracha macia de 5 mm de espessura cada, além de duas camadas de borracha macia a base de silicone de 2mm cada sob uma placa metálica rígida para a aplicação das forças (Figura 37).



Figura 37. Calibração das células do tipo 2.

Para a calibração, foram realizados carregamentos em cinco estágios crescentes de 0,2 kN com as respectivas leituras de sinal em mV, obtendo-se um comportamento linear.

#### 4.4.1.3 Calibração das células de carga tipo 3

A calibração das células de carga, células do tipo 3, foi realizada mediante a aplicação de cargas e as leituras correspondentes de mV. As cargas foram aplicadas pela máquina universal calibrada, com capacidade de 1000 kN, resolução de 0,1 kN (Figura 38). Foram realizados carregamentos em 12 estágios crescentes de 50 kN com as respectivas leituras de sinal em mV, obtendo-se também para este conjunto de células um comportamento linear.



Figura 38. Calibração das células do tipo 3.

Para as leituras e gravação de sinal de todos os sensores, tanto para a calibração quando para a coleta de dados no silo foi utilizado o sistema de aquisição de dados da marca Agilent™ modelo 34970A, com capacidade para três *slots* de 20 canais cada com gravação de sinal programada para uma leitura por minuto (Figura 39 e Figura 40). O equipamento é de propriedade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR – campus Pato Branco, do qual foram utilizados 18 canais, sendo 12 para leitura das células instaladas na parede, três para leitura das células instaladas no fundo e três para leitura das células instaladas sob os montantes.



Figura 39. Montagem do equipamento para calibração das células no laboratório.

A.



B.



C.



Figura 40. Sistema de aquisição de dados: Painel frontal (A); Portas de conexões e *slots box* (B); *Slot* (C).

#### 4.4.2 Instrumentação dos montantes

As forças de arrasto, mobilizadas devido ao atrito dos grãos com a parede, foram medidas por meio das células de carga (tipo 1), posicionadas sob três montantes, M1, M2 e M3, equidistantes entre si de um arco de  $45^\circ$  com comprimento de 7,23 m, conforme mostrado na Figura 41 e na Figura 42. As células registram a força compressiva atuante na chapa metálica, proveniente da transferência de carregamento que ocorre do peso do material armazenado para as paredes laterais do silo. Esta solicitação tem direção vertical e atua de cima para baixo, sendo transferida cumulativamente da parede para os montantes desde o topo até a base do silo, onde foi registrada.

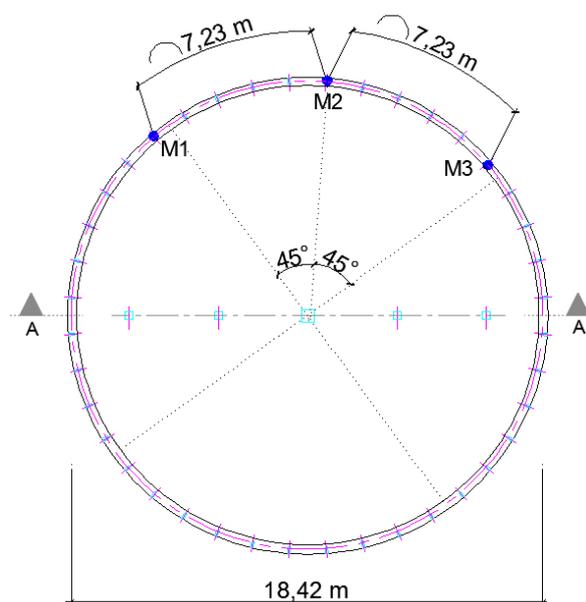


Figura 41. Distribuição das células nos montantes.

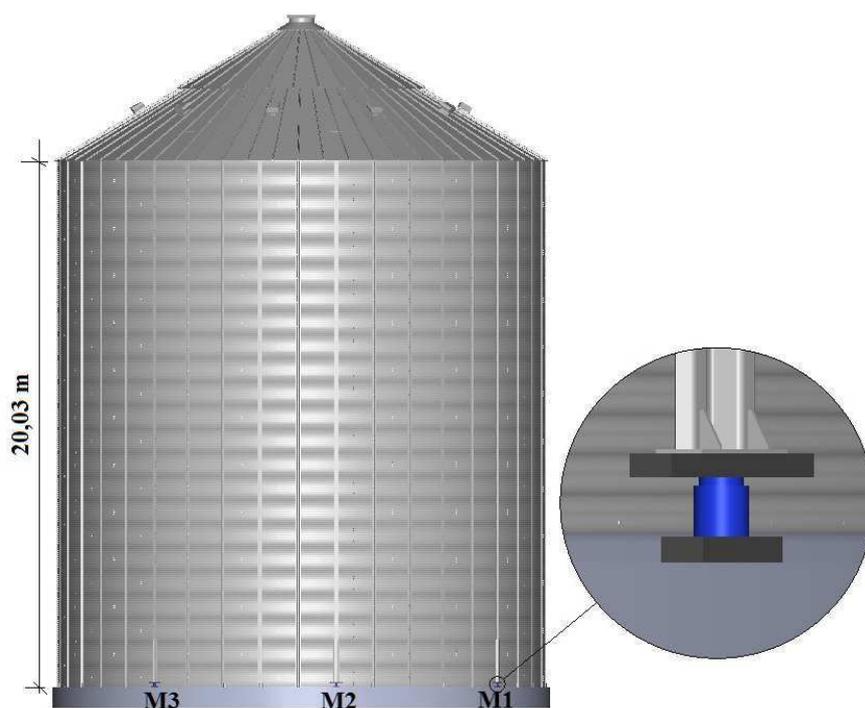


Figura 42. Posicionamento das células de carga nos montantes.

Os montantes são originalmente formados por vários segmentos e no momento da montagem estes segmentos são unidos por parafusos. Assim, para a instalação das células, o segmento do montante que é apoiado no anel de concreto da fundação foi removido e substituído por outro de menor comprimento, possibilitando a colocação do suporte da célula que foi confeccionado em aço e fixado ao anel pelo parafuso original de fixação do

montante chumbado no anel com posterior instalação da célula sobre este suporte, de maneira a garantir que as cargas solicitantes sejam registradas pela mesma.

Inicialmente, o suporte para posicionamento destas células foi fabricado e instalado conforme as características mostradas na Figura 43. Contudo, já no primeiro carregamento observou-se que o mesmo não estava apresentando um bom desempenho, visto que sua parte superior, onde a célula foi posicionada, fletiu conforme pode ser observado na Figura 44.

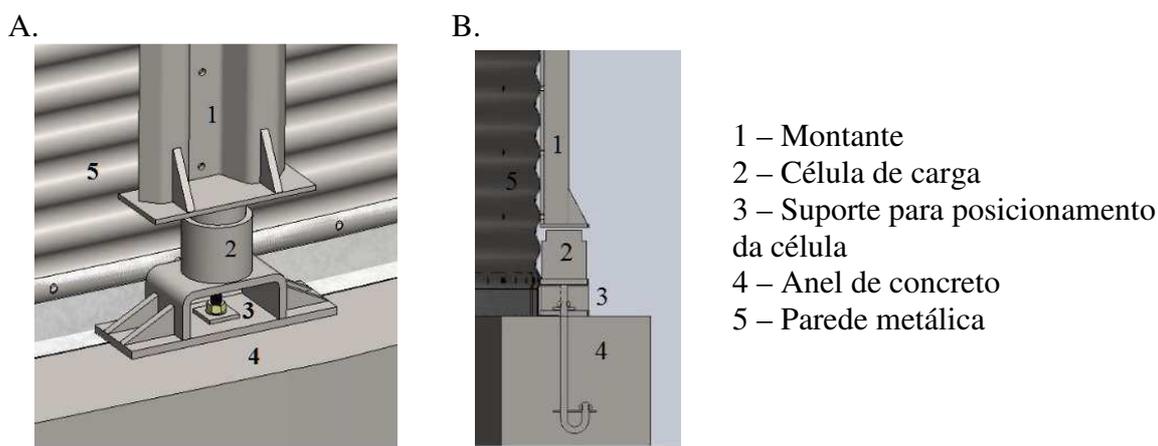


Figura 43. Detalhe do posicionamento inicial da célula sob o montante: Vista (A); Corte (B).

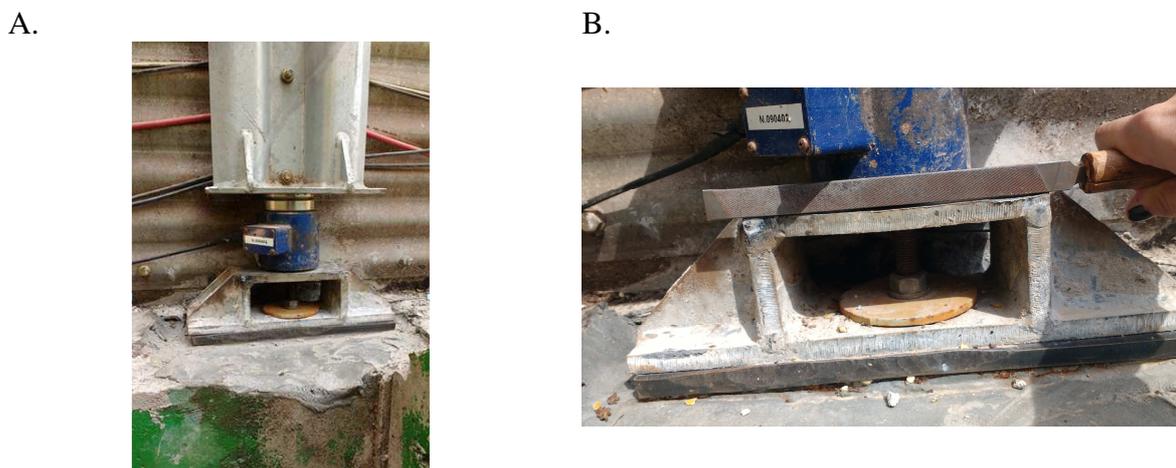


Figura 44. Detalhe do suporte inicial das células dos montantes: Montagem (A); Peça fletida (B).

Diante disso, a peça foi substituída, sendo colocadas em seu lugar duas placas de aço espessas, variando entre 45 e 50 mm de espessura, de acordo com o espaço vazio entre o anel de concreto e a base do montante. Uma placa foi posicionada na parte superior e uma na parte inferior da célula de carga, de forma a garantir rigidez o suficiente para

resistir aos esforços solicitantes sem fletir ou apresentar esmagamento excessivo e consequentemente permitir que a célula registrasse o real esforço naquele ponto, sem interferências e/ou redistribuição destes. A peça superior é maciça e a inferior apresenta um furo central para possibilitar a implantação desta sobre o anel de concreto e permitir o encaixe do parafuso de ligação montante-anel que é chumbado ao anel de concreto. A nova configuração do suporte das células, bem como, o conjunto montado sob os montantes ficou conforme mostrado na Figura 45.

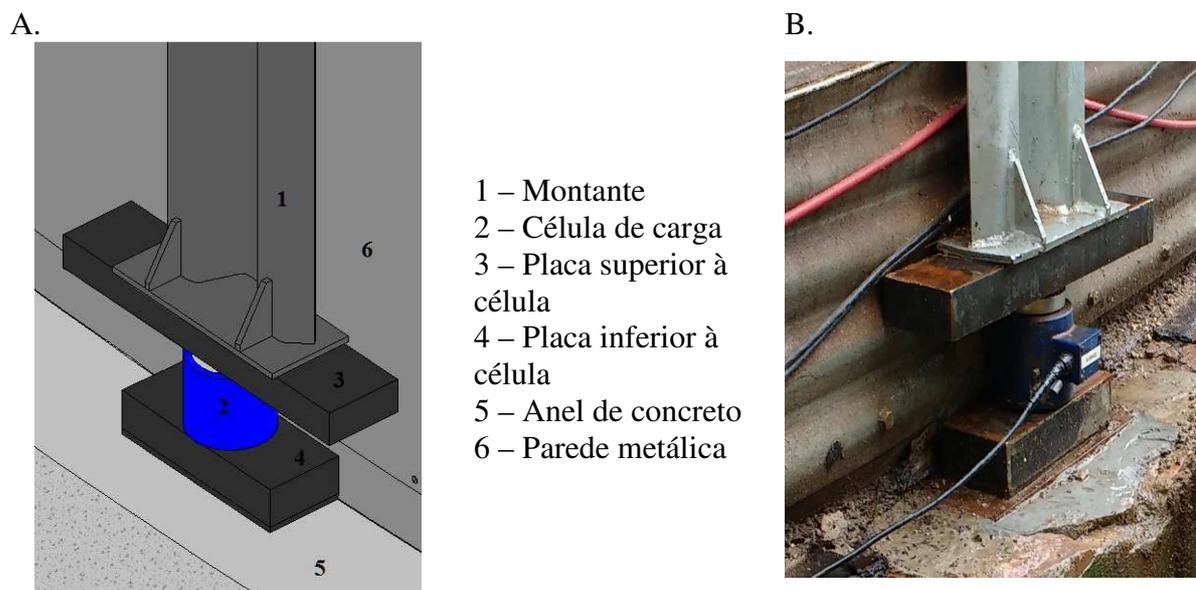


Figura 45. Placas que substituíram o suporte inicial das células: Configuração (A); Montagem (B).

A necessidade de reajustar as células dos montantes, trabalho que demandou bastante tempo e mão de obra especializada para remoção dos suportes anteriores e a colocação dos novos suportes, fez com que os esforços solicitantes nos montantes só pudessem de fato ser considerados no ciclo três, ou seja, para os ciclos 1 e 2 não foram obtidos valores representativos da força de atrito nos montantes.

#### 4.4.3 Instrumentação das paredes verticais

A instrumentação da parede do silo para obtenção dos esforços horizontais foi composta por três alinhamentos verticais, P1, P2 e P3, divididos em quatro planos horizontais, A, B, C e D, totalizando um total de 12 pontos de coleta de pressão sendo destes, três pontos (P1B, P1C e P1D) instrumentados com células de pressão do tipo 1 e os outros nove pontos, com células de pressão do tipo 2, conforme ilustrado na Figura 46.

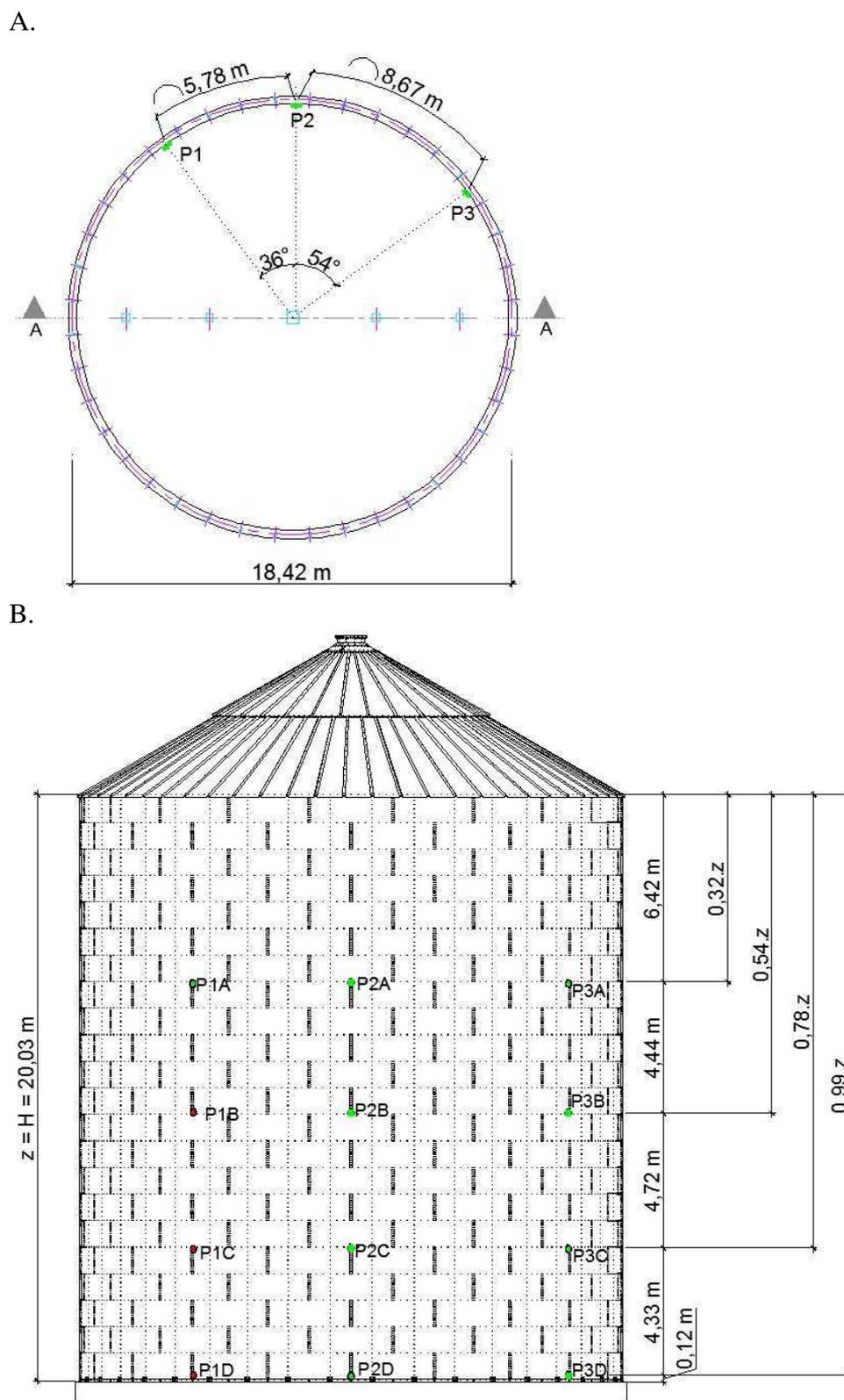


Figura 46. Posicionamento das células na parede do silo: Posição horizontal (A); Posição vertical (B).

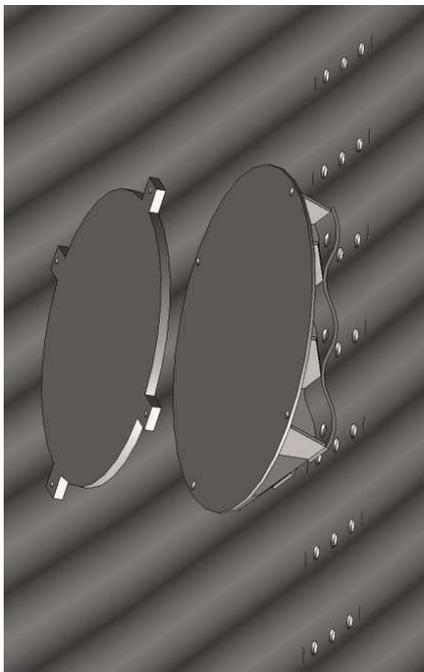
Optou-se por instrumentar quatro planos horizontais para obter uma razoável faixa de distribuição das tensões horizontais atuantes nas paredes do silo. As tensões transferidas

lateralmente, com direção radial, foram registradas diretamente por estas células, permitindo traçar os diagramas da distribuição das tensões na parede do silo. Respeitando a região delimitada inicialmente, isto é,  $\frac{1}{4}$  da parede do silo, os alinhamentos verticais não ficaram equidistantes, sendo que P1 ficou distante de P2 num arco de  $36^\circ$  com comprimento de 5,78 m e o P2 dista de P3 num arco de  $54^\circ$  com comprimento de 8,67 m.

As posições verticais A, B, C e D das células corresponderão em relação à profundidade ( $z$ ) a  $0,32z$ ,  $0,54z$ ,  $0,78z$  e  $0,99z$ , respectivamente, sendo a profundidade máxima igual a altura do corpo do silo ( $H$ ) isto é,  $z = H = 20,03$  m. Os planos horizontais não ficaram equidistantes devido à necessidade de instalação das células em perfuração já existente entre as ligações das chapas.

Para a instalação das células da parede, considerando a ondulação das chapas metálicas e a necessidade de fixação das células nas perfurações já existentes para os parafusos de ligação, foram confeccionados suportes para fixação das células e posterior fixação do conjunto à chapa. Estes suportes foram fabricados de aço e com as características geométricas conforme mostradas nas Figura 47.

A.



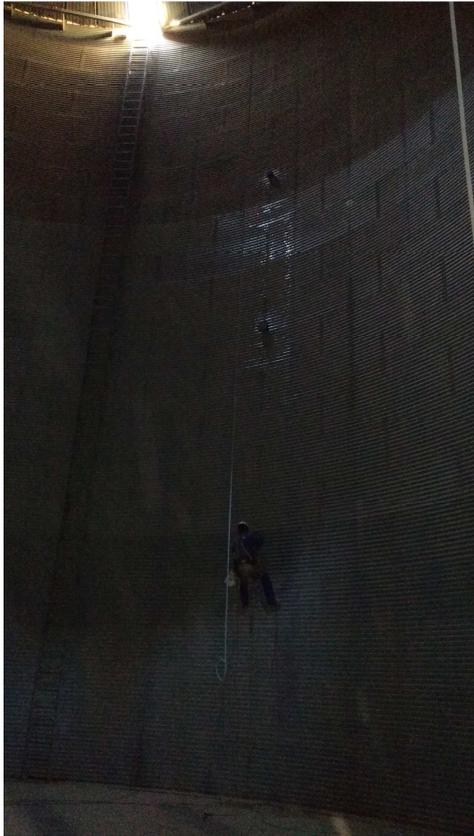
B.



Figura 47. Detalhe do posicionamento das células na parede do silo: Detalhe do suporte de fixação (A); Célula instalada (B).

Na Figura 48 é mostrada a instalação das células nos alinhamentos verticais na parede *in loco*.

A.



B.



Figura 48. Instalação das células na parede do silo: Alinhamento vertical P1 sendo executado (A); Alinhamentos verticais P1 e P2 prontos (B).

#### 4.4.4 Instrumentação do fundo do silo

Para obtenção das pressões verticais, solicitantes no fundo do silo, foram utilizadas três células de pressão do tipo 1, instaladas no fundo do silo, F1, F2 e F3, em um único alinhamento radial, distanciadas entre si conforme mostrado na Figura 49, sendo que as células extremas foram posicionadas o mais próximo quanto possível da parede e do orifício de descarga do silo, respectivamente, objetivando com esta configuração, obter o diagrama de distribuição das tensões verticais ao longo da radial. As células assim distribuídas, registraram os esforços provenientes do peso do material armazenado sob efeito do campo gravitacional.

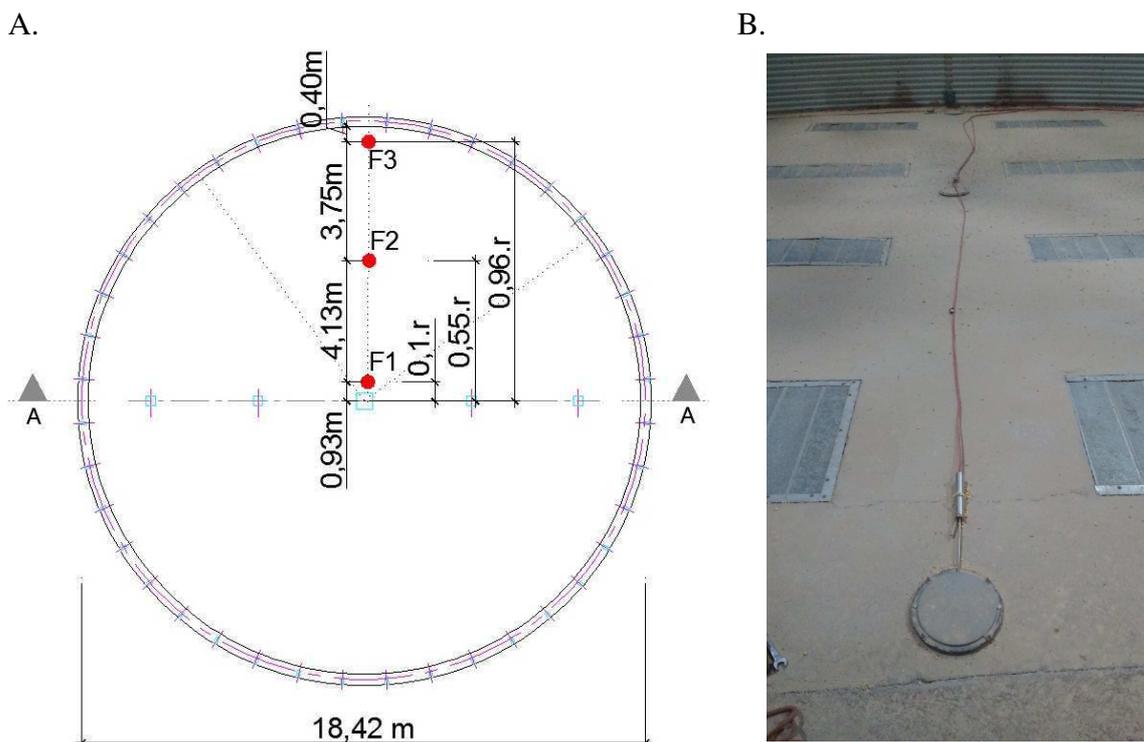


Figura 49. Detalhe da posição das células no fundo do silo: Planta (A); Células instaladas no fundo do silo (B).

A leitura da célula instalada no fundo próxima a parede vertical, F3, juntamente com as medições obtidas pelas células instaladas na parede no plano  $0,99.z$ , admitindo que estejam no mesmo plano (Figura 50), viabilizam a determinação experimentalmente do parâmetro  $K$  neste nível de carregamento.

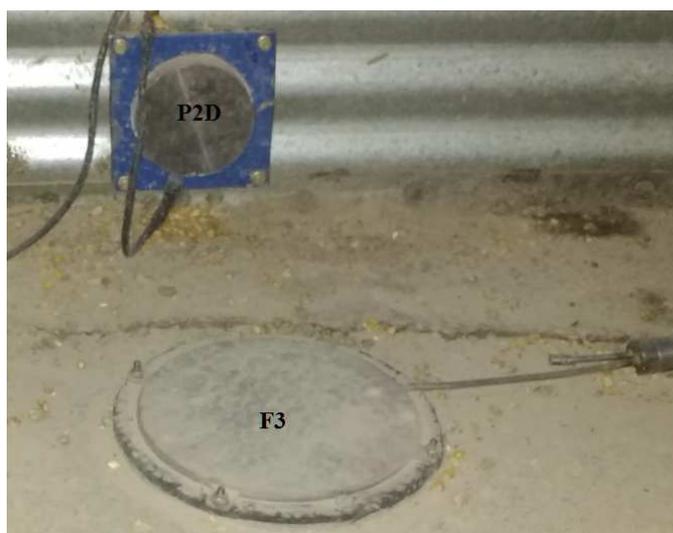


Figura 50. Posicionamento das células para determinação do parâmetro  $K$ .

#### 4.4.5 Coleta e sistematização dos dados

O sistema de aquisição de dados, bem como o computador e demais instrumentos necessários ao desenvolvimento experimental da pesquisa, foram instalados junto à casa de controles elétricos, situada próxima ao silo instrumentado, conforme mostrada na Figura 51 A e B.

A.



B.



Figura 51. Instalação do sistema de aquisição de dados: Montagem (A); Localização da casa de controle em relação ao silo instrumentado (B).

As células foram conectadas por meio de cabos elétricos ao sistema de aquisição e as leituras realizadas durante três ciclos, compreendendo em cada ciclo as fases de carregamento, armazenamento e descarregamento dos grãos de milho. Os dados coletados foram convertidos por meio das curvas de calibração das células, sistematizados em planilha *Excel*<sup>®</sup>, adequadamente tratados e analisados com posterior plotagem das curvas de distribuição das pressões.

#### 4.4.6 Comparação entre os valores experimentais e teóricos

As pressões teóricas obtidas pela aplicação das prescrições das normas EN 1991-4, AS 3774 e ANSI/ASAE EP433, são comparadas àquelas obtidas experimentalmente, a fim de verificar se as normas estrangeiras apresentam valores consistentes com os valores experimentais e a coerência dos procedimentos para a quantificação das pressões em um dado modelo de silo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do trabalho são apresentados e discutidos nas seções seguintes, em que primeiramente são mostradas as propriedades dos materiais e na sequência, os dados de esforços obtidos tanto experimentalmente, por meio da instrumentação de campo, bem como obtidos teoricamente, pela aplicação dos códigos normativos EN 1991-4 (2006), ANSI/ASAE EP 433 (2002) e AS 3774 (1999).

### 5.1 Propriedades dos grãos de milho

Após análise dos resultados experimentais do cisalhamento direto com o produto e com a amostra da parede do silo, têm-se os valores das propriedades físicas e mecânicas dos grãos de milho necessários ao cálculo das pressões teóricas, resumidos na Tabela 23. Sendo o ângulo de repouso,  $\phi_r$ , obtido de ensaio simples que consiste em despejar uma massa de grãos sobre uma superfície plana e medir o ângulo formado entre a superfície e o talude natural dos grãos.

Tabela 23. Propriedades experimentais do grão de milho

Produto	Coesão [kN.m <sup>-2</sup> ]	$\gamma$ [kN.m <sup>-3</sup> ]		$\phi_i$ [°]		$\phi_e$ [°]		$\phi_r$ [°]		$\phi_w$ [°]	
		Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.
Milho	1,3	7,50	7,54	19	28	25	32,5	25,3	26,6	9,1	10,8

Com os valores das propriedades de ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito e ângulo de atrito grão-parede conhecidos, determinou-se o coeficiente efetivo de atrito do grão com a parede corrugada,  $\mu_{wef}$ , para as normas EN 1991-4 e AS 3774 pelas Eqs. 6 e 82 respectivamente e o coeficiente K, razão entre as pressões horizontais e verticais pelas Eqs. 57 e 81. A norma americana ANSI/ASAE EP344 apresenta valores fixos para estas propriedades. Os resultados finais são mostrados na Tabela 24.

Tabela 24. Coeficiente efetivo de atrito grão-parede e K conforme respectivos códigos normativos

Norma	$\mu_{wef}$		K	
	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.
EN 1991-4	0,30	0,45	0,58	0,74
AS 3774	0,38	0,52	0,35	0,94
ANSI/ASAE EP344	0,37		0,5	

Pode-se observar que os resultados das formulações normativas reproduzem valores divergentes, que conseqüentemente vão refletir nos valores de pressões teóricas. Grande variação nos valores das propriedades também são observados na análise de outras pesquisas desenvolvidas tal como em Moya et al. (2013), foram obtidos experimentalmente os seguintes valores para algumas propriedades de grãos de milho:

$$\gamma_{\text{inf}} = 7,5 \text{ kN.m}^{-3}; \gamma_{\text{sup}} = 12,63 \text{ kN.m}^{-3}; \phi_i = 25^\circ; \mu_w = 0,2.$$

## 5.2 Pressões teóricas e experimentais

As pressões teóricas foram determinadas conforme as prescrições das normas mencionadas, contudo, utilizando os valores das propriedades determinados experimentalmente, independentemente do valor normativo sugerido. As curvas das pressões teóricas são apresentadas juntamente com as experimentais, numa análise comparativa entre elas.

O propósito da investigação experimental foi a obtenção das pressões verticais medidas no fundo do silo, das pressões horizontais normais às paredes verticais do silo e da força de atrito medida nos montantes. Foram coletados dados experimentais durante três ciclos completos do processo de estocagem de grãos de milho. Cada ciclo apresentou um total armazenado diferente, bem como os períodos de realização de cada fase dos ciclos divergem, sendo que no primeiro ciclo, a fase de armazenamento demandou um período bem mais longo que no segundo e este por sua vez, bem mais curto em relação ao terceiro ciclo. Desta forma, embora as propriedades do grão, umidade, densidade e granulometria não sofram variações consideráveis, os resultados são analisados individualmente em cada ciclo.

### 5.2.1 Ciclo 1

No primeiro ciclo, que teve início dia 20 de julho de 2016 e término dia 05 de novembro de 2016, portanto um período de 108 dias, foram armazenadas 4.602,3 toneladas de milho. A fase de carregamento terminou sete dias após o início do ciclo e o produto ficou armazenado por 82 dias, conforme ilustrado na Figura 52, onde é possível observar que o carregamento não foi constante, apresentando dias com maior entrada de grãos no silo que noutros. A descarga também não foi realizada continuamente, houve dias em que

não foi realizada nenhuma movimentação de grãos, sendo em sua maioria, correspondentes a dias de domingo ou feriados, quando não houve expediente na empresa.

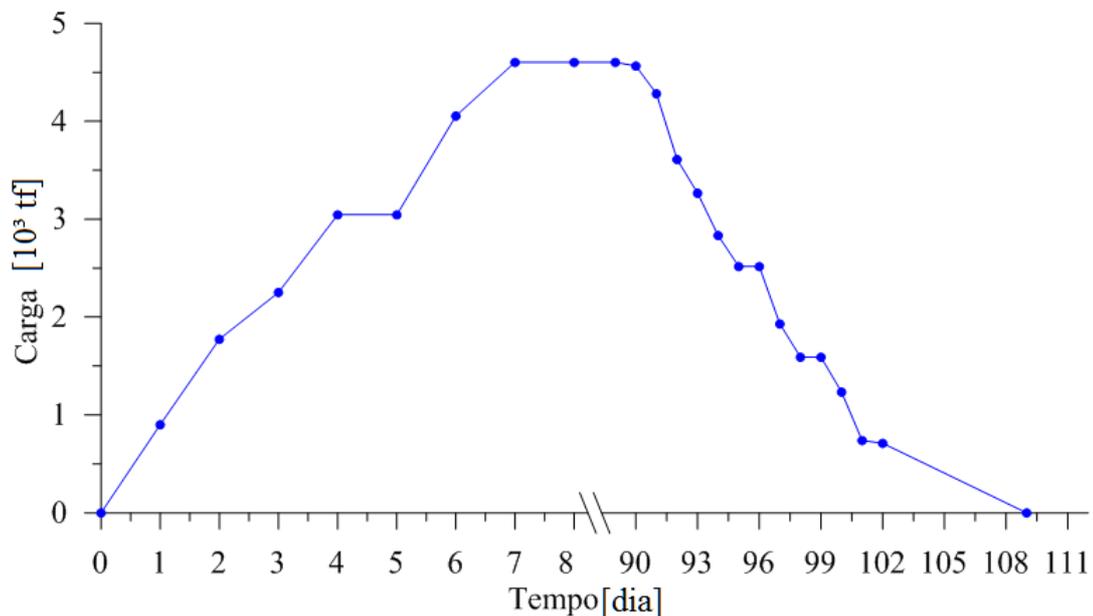


Figura 52. Carga e descarga dos grãos de milho no silo para o ciclo 1.

Durante a fase de armazenamento, não houve coleta de leituras das células, devido a necessidade de ajustes dos equipamentos. Assim, optou-se por suprimir a sua representação gráfica, expressa pela interrupção do eixo das abscissas. A fase de descarga teve duração de 20 dias, com início em 17 de outubro e término dia 05 de novembro.

É natural que todo um conjunto de dados tem medição no tempo, que permite visualizar a variação de leitura em cada célula, no entanto, como o carregamento, bem como o descarregamento não foram constantes, optou-se por apresentar a variação das pressões registradas nas células em função da carga de grãos estocada no silo, considerando que num dado instante tempo, as respostas de todas as células são relativas a um mesmo carregamento.

#### 5.2.1.1 Pressões verticais no ciclo 1

As pressões verticais aqui denominadas referem-se às atuantes no fundo do silo, registradas pelas células F1, F2, F3 cujos valores em função da variação da carga de grãos de milho estocados no silo são mostrados na Figura 53.

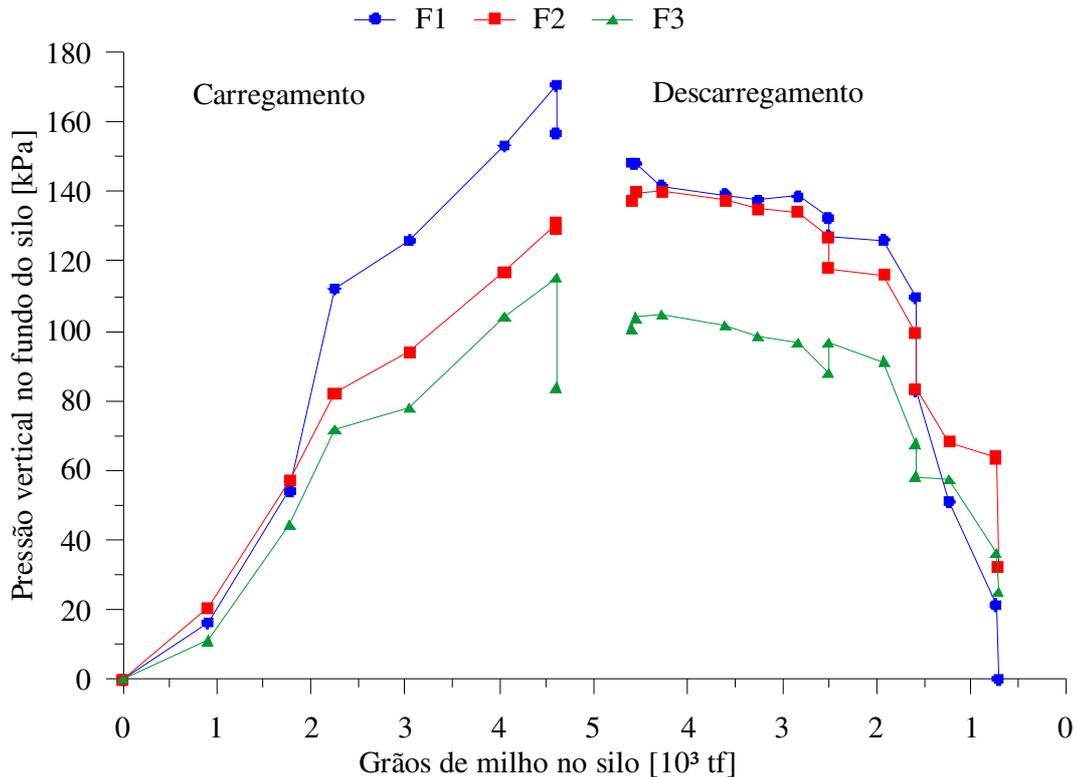


Figura 53. Pressões verticais experimentais em função do carregamento de grãos no ciclo 1.

As curvas exibidas correspondem às leituras nas células no fundo do silo ao longo do raio, para as fases de carregamento e descarregamento, sendo a célula F1 localizada próxima ao orifício de descarga, a célula F2 em posição intermediária e a célula F3 localizada próxima à parede do silo. Observa-se que a distribuição radial das pressões verticais no fundo do silo não é uniforme, decrescendo gradualmente do centro para as bordas, em ambas as fases, evidenciando a formação do cone na superfície dos grãos por efeito do ângulo de repouso dos grãos e da mobilização de atrito lateral grão-parede com transferência de esforços para as paredes. A dependência do atrito com o confinamento fica evidente pela distância entre as curvas, que se torna mais pronunciada com o silo mais carregado.

A queda observada do pico para o valor final das pressões verticais na fase de carregamento sugere uma acomodação dos grãos com redistribuição dos esforços depois de completado o enchimento do silo.

A menor inclinação das curvas nos trechos iniciais do descarregamento reflete um suave alívio das pressões no fundo do silo, comparado ao pronunciado acréscimo durante o

carregamento, consequência da transferência de esforços para as paredes mais efetiva na fase do descarregamento.

As curvas F2 e F3 não atingem o zero no descarregamento devido ao fato do fundo plano do silo não permitir completo esvaziamento através do orifício central de descarga, deixando uma massa de grãos remanescente nas regiões mais afastadas do centro, a qual é retirada manualmente, sem ser quantificada.

A pressão máxima lida pela célula F1 no carregamento (170,73 kPa), é superior em 23,22 % à leitura na célula F2 (131,08 kPa) e 32,50 % na célula F3 (115,24 kPa). Estes valores experimentais diferem dos calculados conforme códigos normativos, como mostrado na Figura 54.

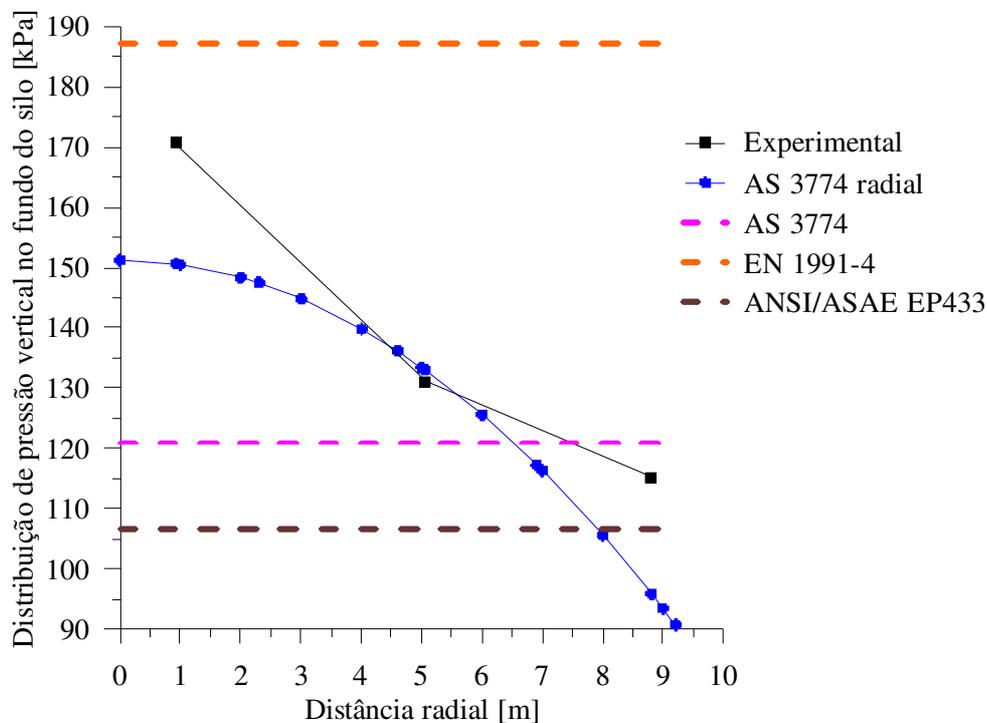


Figura 54. Pressões verticais teóricas e experimentais no carregamento do ciclo 1.

Pelas curvas, pode-se observar que a norma AS 3774 em seu item 6.2.3.2 permite calcular a distribuição radial da pressão vertical, enquanto as normas EN 1991-4 e ANSI/ASAE consideram que a pressão vertical se aplica uniformemente ao longo do raio. Vale ressaltar que a formulação para cálculo da distribuição radial é calculada a partir da pressão vertical máxima, considerada atuando uniformemente sobre o fundo do silo.

Para fins de comparação da divergência de resultados, na Tabela 25 são mostradas as diferenças percentuais entre eles.

Tabela 25. Resultados dos valores experimentais e teóricos da pressão vertical no fundo do silo durante o carregamento

Distância radial [m]	Pressão vertical [kPa]				
	Experimental	AS radial	AS 3774	EN 1991-4	ANSI/ASAE EP433
0,93 (0,10.r)	170,73*	150,62			
5,06 (0,55.r)	131,08	132,97	120,96	187,03	106,61
8,81 (0,96.r)	115,24	95,88			
Variação [%]	-	-11,78	-29,15	+9,55	-37,56

\*Valor de referência

Pode-se observar que as normas AS 3774 e ANSI/ASAE EP433 estão subestimando, mas a EN 1991-4 superestima as pressões verticais máximas atuantes no fundo do silo. A distribuição radial da norma australiana é a que mais se aproxima dos valores experimentais.

No que se refere à pressão vertical máxima no meio do silo as normas australiana e americana refletiriam uma situação de risco nos dimensionamentos, pois os valores chegam a ser mais que 30 % inferiores aos experimentais, enquanto a norma europeia mostra-se mais próxima, com uma majoração de 9,55 % apenas. A norma americana apresenta valor abaixo inclusive da mínima pressão experimental no ponto mais distante do centro do silo.

Para a fase de descarregamento, os resultados das pressões verticais experimentais e teóricas obtidas são mostrados na Figura 55. A norma americana não preconiza sobrepressão, ou seja, majoração dos esforços na situação de descarregamento, para o fluxo do tipo funil aqui considerado, fazendo-o apenas para o fluxo do tipo *plug* (que é para silos com relação H/D em torno de 2,0). Portanto, a distribuição uniforme da pressão vertical continua sendo a mesma do carregamento. Os resultados experimentais não apresentaram sobrepressão em todas as células, entretanto eles são superiores aos da ANSI/ASAE EP433.

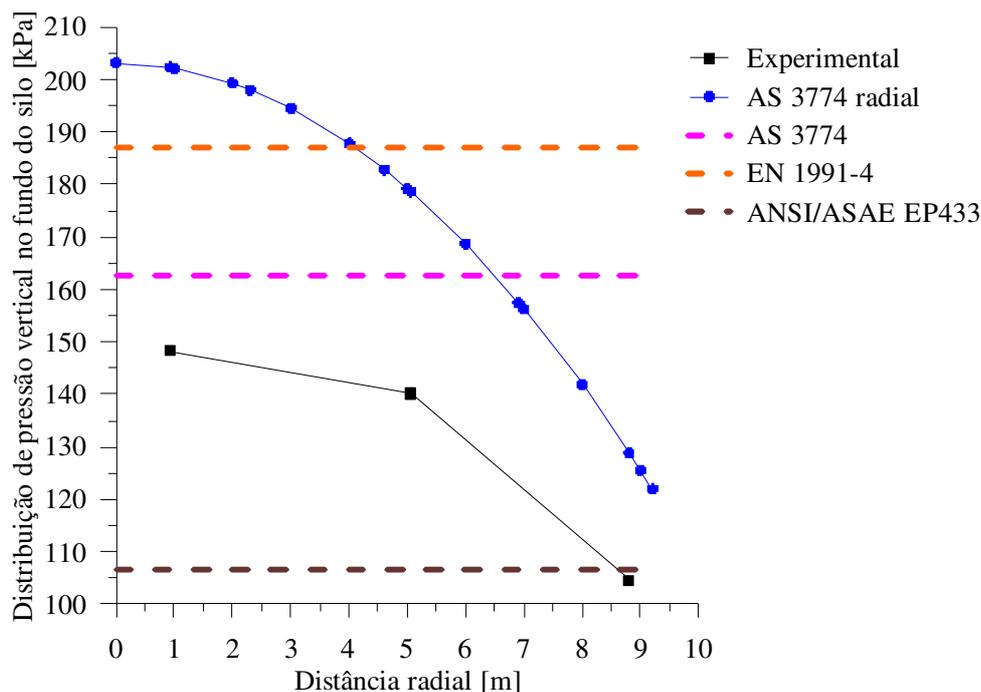


Figura 55. Pressões verticais teóricas e experimentais no descarregamento.

A norma europeia também não preconiza sobrepressão para pressões verticais, porém seus valores são muito superiores aos experimentais, refletindo uma situação de projeto segura, porém antieconômica. A norma australiana considera a ocorrência de sobrepressão na massa dos grãos na situação de descarregamento. Entretanto, os resultados experimentais indicam que esta sobrepressão ocorreu somente na célula F2, a qual registrou pressão vertical de 140,16 kPa, 6,93 % maior que a registrada no carregamento (131,08 kPa).

Na Tabela 26 são mostrados os valores máximos de pressões verticais obtidos na fase de descarregamento e as diferenças percentuais entre eles.

Tabela 26. Resultados dos valores experimentais e teóricos da pressão vertical no fundo do silo durante o descarregamento

Distância radial [m]	Pressão vertical [kPa]				
	Experimental	AS radial	AS 3774	EN 1991-4	ANSI/ASAE EP433
0,93	148,33*	202,35			
5,06	140,16	178,64	162,54	187,03	106,61
8,81	104,58	128,81			
Variação [%]	-	+36,42	+9,58	+26,09	-28,13

\*Valor de referência

A pressão máxima lida pela célula F1 no descarregamento (148,33 kPa) é superior em 5,51 % à leitura na célula F2 (140,16 kPa) e 29,50 % na célula F3 (104,58 kPa). Apenas a norma americana subestima as pressões de descarregamento em 28,13 %, e notou-se menor divergência para a norma AS 3774, a qual majora o valor experimental em 9,58 %. Observa-se que os valores calculados pela norma europeia e pela australiana radial superaram em 26,09 % e 36,42 % os valores experimentais, respectivamente.

Em resumo, os códigos que prescrevem sobrepressão mostraram pressões subestimadas no carregamento e superestimadas na descarga, o que pode conduzir à falsa percepção da real necessidade da aplicação dos coeficientes, mas os dados experimentais colocam em dúvida tal percepção.

Lopes Neto et al. (2014a) realizaram uma análise teórico-experimental em um silo modelo tendo como produto armazenado a areia seca, constatando que os valores das pressões verticais para o descarregamento concêntrico das normas AS 3774 (1996) e ISO 11697 (1995) foram os mais adequados, contudo 15% superiores que os valores experimentais.

Ao analisar as forças em um silo cilíndrico com relação H/D igual a 2, Couto et al. (2013), observaram que os valores calculados através das recomendações da norma Eurocode 1 (2006) superestimaram os resultados experimentais.

Segundo Palma e Calil Júnior (2008) as normas resultam, na maioria das vezes, em valores superiores devido a fatores como formulação utilizada no cálculo do fator K, combinações com as propriedades físicas para obter os carregamentos máximos e adoção de pressões adicionais em alguns casos.

#### 5.2.1.2 Pressões horizontais no ciclo 1

As pressões horizontais atuantes nas paredes apresentam variação ao longo da altura do silo; deste modo optou-se por apresentar os resultados obtidos teórica e experimentalmente em diferentes planos horizontais, onde cada plano corresponde à profundidade medida a partir do topo da parede.

Na Figura 56 são mostradas as curvas correspondentes às pressões horizontais no alinhamento A, situado à profundidade 0,32.z.

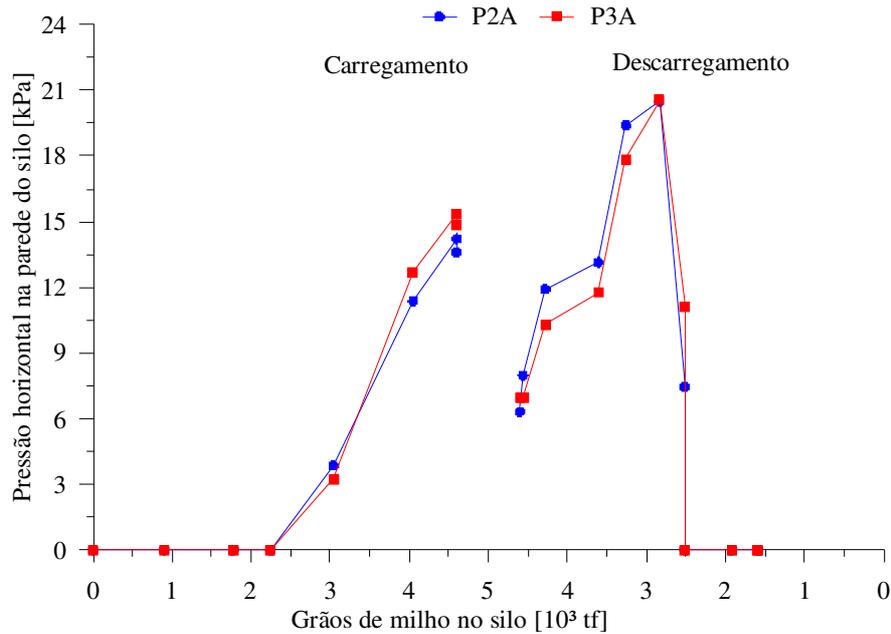


Figura 56. Pressões horizontais experimentais na profundidade  $0,32.z$  em função da carga no silo.

A célula P1A apresentou problemas de funcionamento, registrando valores de pressão inconsistentes, não sendo analisados. Os registros nas células P2A e P3A mostraram-se consistentes, como pode ser observado pela proximidade das curvas, para ambas as fases. Após o completo enchimento do silo observou-se uma ligeira queda no valor da pressão em ambas as células, o que pode ser atribuído a uma acomodação da massa dos grãos e consequente redistribuição dos esforços. As pressões de pico na fase de carregamento foram 14,22 kPa e 15,36 kPa nas células P2A e P3A, respectivamente, correspondendo a uma variação de 7,42 %.

Nota-se que as pressões ao final do carregamento não correspondem às pressões no início do descarregamento. O intervalo de tempo decorrido entre as duas fases corresponde ao período de armazenamento, o qual teve duração de 82 dias. Durante este longo período pode ter ocorrido considerável rearranjo dos grãos armazenados, cujas causas podem ser atribuídas a uma diversidade de fatores, como variações térmicas provocando deformações, vento, recalques de fundações, entre outros.

O trecho inicial do descarregamento apresenta acentuado incremento das pressões horizontais, atingindo picos de 20,52 kPa e 20,56 kPa, respectivamente, nas células P2A e P3A. A diferença nos valores de pico é insignificante, correspondendo a uma variação de apenas 0,20 %. Tais picos ocorreram quando o silo estava carregado com 61,56 % da sua

capacidade. Esta aparente contradição pode estar associada aos efeitos dinâmicos bem como às características de dilatância de materiais granulares sob confinamento.

Na Figura 57 são apresentados os resultados de pressão horizontal obtidos nas células do alinhamento B, situado na profundidade 0,54.z.

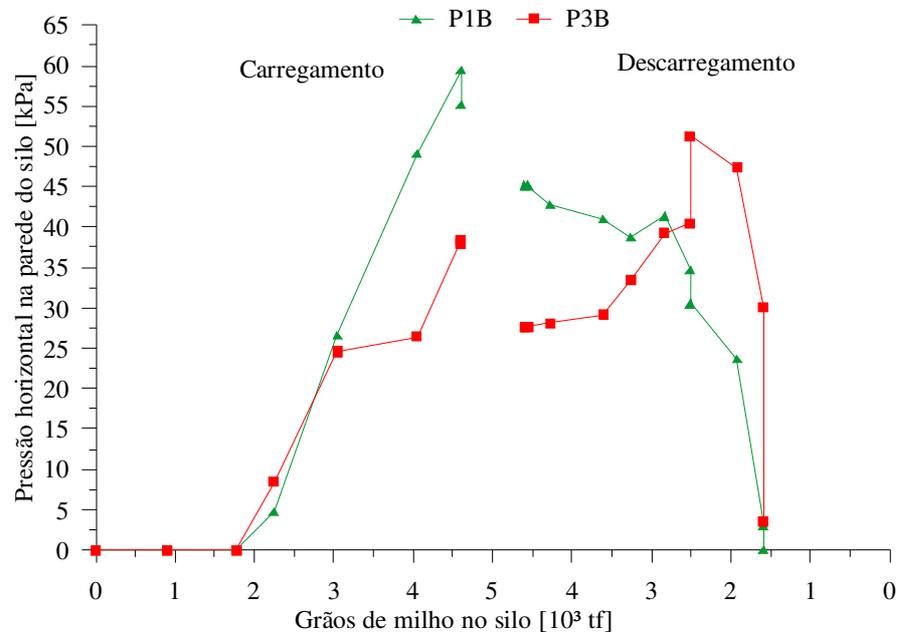


Figura 57. Pressões horizontais experimentais na profundidade 0,54.z em função da carga no silo.

No alinhamento horizontal B as pressões registradas pelas células P2B não foram consistentes e por isso não são mostradas. Nas células P1B e P3B as pressões lidas apresentam valores próximos somente até o instante em que o silo estava carregado com 3040 tf. A partir desta carga os valores divergem, com maiores pressões na célula do alinhamento 3. Os dados disponíveis não permitem avaliar tal divergência. As pressões máximas na fase de carregamento foram 59,51 kPa e 38,45 kPa, para as células P1B e P3B, respectivamente, uma diferença de 35,39 %.

Na fase de descarregamento as leituras de pressão também divergem, inclusive exibindo comportamentos distintos no trecho inicial, com a curva P1B decrescendo enquanto a curva P3B cresce. No trecho final as pressões na célula P3B foram maiores que as registradas na célula P1B. As pressões máximas obtidas foram 45,15 kPa e 51,30 kPa, nas células P1B e P3B, respectivamente, uma diferença de 11,99 %.

A célula P3B registrou, no descarregamento, comportamento similar ao observado nas leituras das células do alinhamento A, com trecho inicial crescente e trecho final

decrecente. A não correspondência entre os valores de pressão ao término do enchimento do silo com aqueles de início da descarga também pode estar associada a fatores diversos que podem ter se manifestado durante o longo período de armazenamento, conforme já discutido.

As pressões horizontais atuantes na parede registradas pelas células localizadas no alinhamento horizontal C, profundidade  $0,78.z$ , estão mostradas na Figura 58.

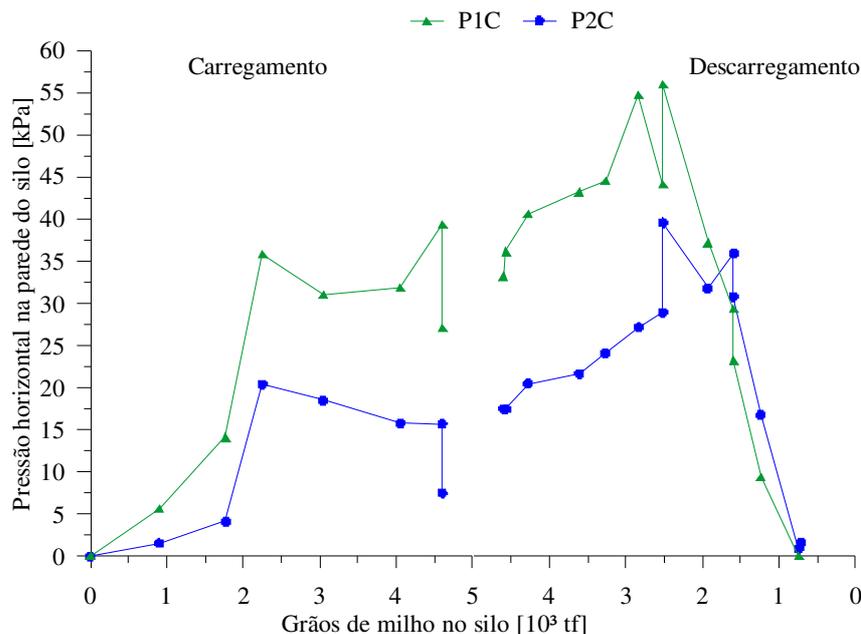


Figura 58. Pressões horizontais experimentais na profundidade  $0,78.z$  em função da carga no silo.

Observa-se uma consistência no padrão de comportamento exibido pelas trajetórias das curvas em ambas as fases; entretanto, existe uma grande divergência de valores entre as células P1C e P2C apesar de elas se situarem em um mesmo plano horizontal. A única explicação plausível é a ocorrência de assimetria axial na distribuição dos esforços horizontais na massa de grãos.

As pressões máximas na célula P1C foram 39,30 kPa e 55,99 kPa, no carregamento e no descarregamento, respectivamente; enquanto os valores medidos na célula P2C foram 20,39 kPa e 39,56 kPa. O incremento de pressão provocado pelo descarregamento foi muito acentuado em ambas as células, de 42,47 % e 94,02 %, nas células P1C e P2C, respectivamente.

Na Figura 59 são mostradas as curvas referentes às pressões horizontais registradas pelas células localizadas no alinhamento D, situado na profundidade 0,99.z, isto é, próximo ao fundo do silo.

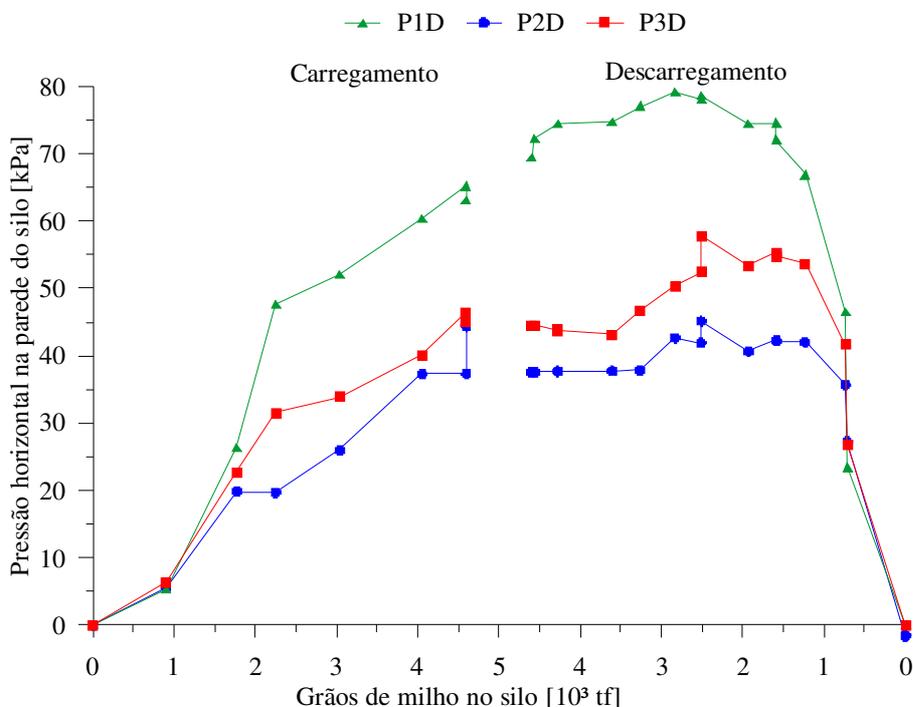


Figura 59. Pressões horizontais experimentais na profundidade 0,99.z em função da carga no silo.

Na fase de carregamento para baixas cargas no silo verifica-se que os valores são muito próximos, o que também ocorre no final da fase de descarregamento. Para cargas elevadas no silo verifica-se grandes divergências nos resultados. Novamente, tais divergências podem estar associadas à ocorrência de assimetria axial dos esforços na massa de grãos.

Na célula P1D as pressões máximas registradas foram 65,24 kPa e 79,26 kPa; na célula P2D os valores obtidos foram 44,34 kPa e 45,16 kPa; e na célula P3D registrou-se picos em 46,61 kPa e 57,81 kPa nas fases de carregamento e de descarregamento, respectivamente. Os incrementos de pressão provocados pelo descarregamento foram de 21,49 %; 1,85 % e 24,03 %, nas células P1D, P2D e P3D, respectivamente.

Quantificando as maiores divergências entre os resultados, obtém-se uma variação de 32,04 % no carregamento e de 43,02 %, no descarregamento.

Observa-se que os valores máximos de pressão horizontal atuando sobre a parede do silo ocorrem para uma carga no silo de  $2,52 \cdot 10^3$  tf, que corresponde a 54,78 % da sua

capacidade, refletindo os efeitos dinâmicos e de atrito causados pelo fluxo dos grãos durante o descarregamento.

Na Figura 60 apresenta-se os resultados teóricos e experimentais na fase carregamento, com o intuito de comparar valores fornecidos pelas diferentes normas face aos registrados pelas células de pressão.

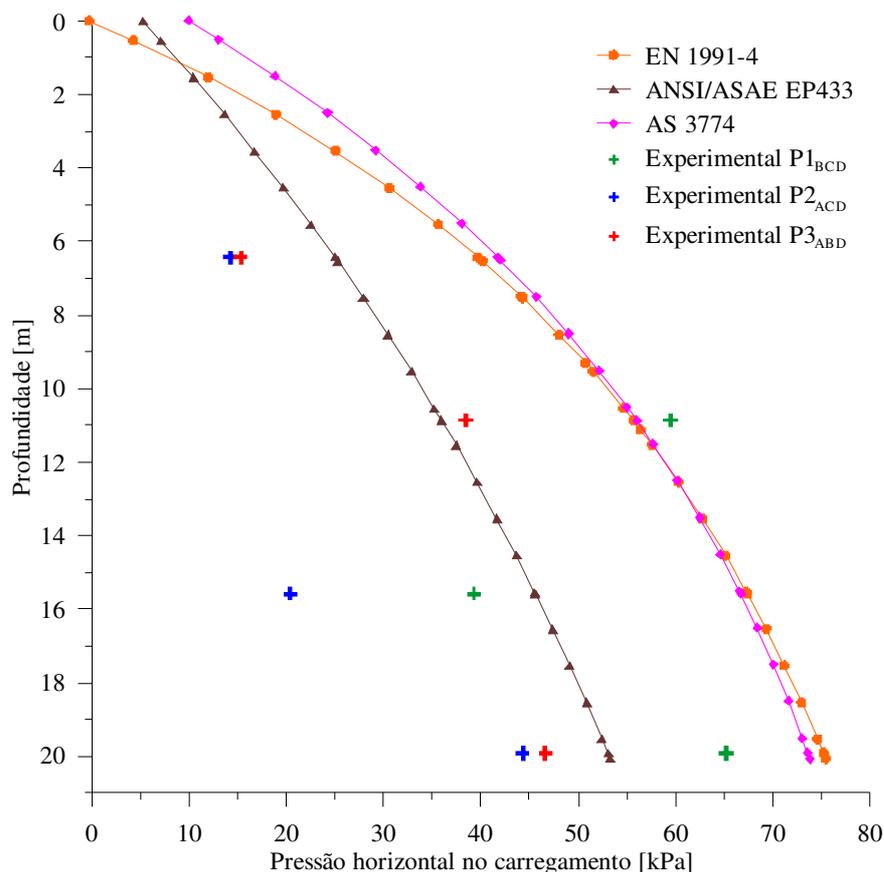


Figura 60. Pressões horizontais teóricas e experimentais no carregamento para o ciclo 1.

Observa-se boa concordância entre as curvas referentes às normas EN 1991-4 e AS 3774, sobretudo na metade inferior do silo. Os valores calculados pela norma ANSI/ASAE EP433 são inferiores aos de outros códigos normativos, e a diferença é mais acentuada para maiores profundidades. Os resultados experimentais mostram-se inferiores aos fornecidos pelas três normas nas profundidades  $0,78.z$  e  $0,32.z$ . Próximos a  $0,54.z$ , os resultados experimentais mostram-se ambíguos, sendo um valor de pressão (curva  $P3_{ABD}$ ) maior que o calculado pela norma americana porém abaixo dos valores fornecidos pelas normas europeia e australiana; enquanto que o outro valor (curva  $P1_{BCD}$ ) é superior aos fornecidos por todas as normas. Próximo à base da parede, isto é, na profundidade  $0,99.z$ , as pressões calculadas pelas normas europeia e australiana são maiores que os

experimentais, enquanto a pressão fornecida pela norma americana é maior que as registradas pelas células P2D e P3D, porém, menor que a registrada pela célula P1D.

Na Tabela 27 são mostrados os valores máximos de pressão nas células e os teóricos calculados nas profundidades correspondentes.

Tabela 27. Pressões máximas teóricas e experimentais no carregamento

z [m]	Alinhamento	Pressão horizontal experimental [kPa]			Pressão horizontal teórica [kPa]		
		P1	P2	P3	EN 1991-4	AS 3774	ANSI/ASAE EP433
6,42	A	-	14,22	15,36	39,66	41,71	25,00
10,86	B	59,51	-	38,45	55,66	56,04	35,96
15,58	C	39,30	20,39	-	67,40	66,72	45,65
19,91	D	65,24	44,34	46,61	75,20	73,68	53,06

Observa-se que as pressões calculadas pelas normas EN 1991-4 e AS 3774 apresentam valores próximos, para todas as profundidades; esta pequena variação permite calcular a média entre os valores fornecidos por essas normas e comparar àqueles calculados pela norma ANSI/ASAE EP433, que foram menores. Ocorre uma redução da variação percentual com a profundidade, indo de 38,55 % no topo para 28,73 % na base da parede.

Dado que todas as células instaladas no alinhamento D retornaram resultados, avalia-se também a variação ocorrida entre estes e com a média obtida entre os valores das normas EN 1991-4 e AS 3774. As pressões registradas nas células P1D, P2D e P3D são 12,36 %; 40,44 % e 37,40 % inferiores à média dessas normas, respectivamente.

Na Figura 61 são apresentados os resultados das pressões horizontais teóricas e experimentais na fase descarregamento.

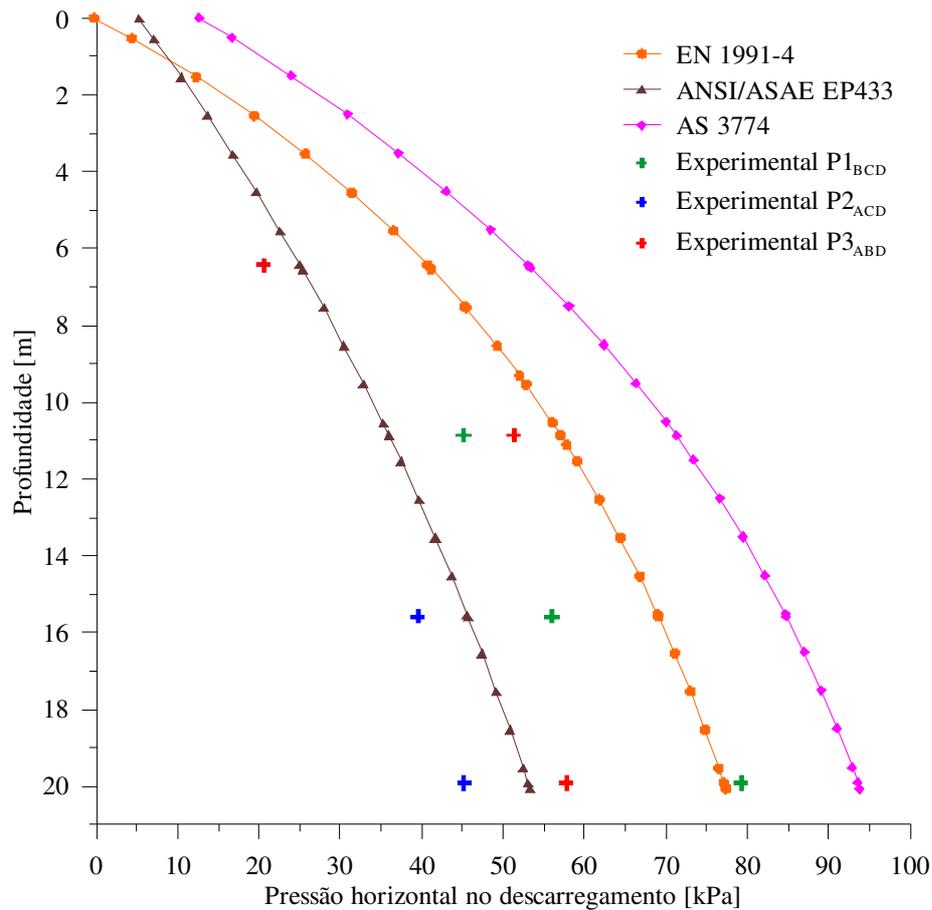


Figura 61. Pressões horizontais teóricas e experimentais no descarregamento para o ciclo 1.

A curva referente à norma americana não sofre alteração no descarregamento, dado que esse código normativo não leva em conta coeficientes de sobrepressão, exceto para fluxo do tipo *plug*, o que não é o caso. As demais curvas são deslocadas para a direita, notando-se que tal deslocamento é maior para a curva relativa à norma AS 3774. O maior coeficiente prescrito por esta norma faz com que ocorra uma superestimativa das pressões em relação aos outros códigos e aos valores experimentais.

Com exceção do valor registrado na célula P1D, todos os demais valores experimentais situam-se aquém dos valores calculados pelas normas europeia e australiana. Entretanto, este resultado experimental é muito próximo do valor calculado pela norma EN 1991-4. Na profundidade 6,42 m (0,32.z) os pontos experimentais praticamente coincidem e são inferiores às pressões teóricas correspondentes. Na profundidade 10,86 m (0,54.z), os dados experimentais são maiores que os valores da norma americana, porém, menores que os calculados pelas normas europeia e australiana.

Na Tabela 28 são mostrados os valores máximos teóricos e experimentais em diferentes profundidades.

Tabela 28. Pressões máximas teóricas e experimentais no descarregamento

z [m]	Alinhamento	Pressão horizontal experimental [kPa]			Pressão horizontal teórica [kPa]		
		P1	P2	P3	EN 1991-4	AS 3774	ANSI/ASAE EP433
6,42	A	-	20,52	20,56	40,67	53,04	25,00
10,86	B	45,15	-	51,30	57,08	71,26	35,96
15,58	C	55,99	39,56	-	69,11	84,84	45,65
19,91	D	79,26	45,16	57,81	77,12	93,61	53,06

Fez-se a opção de avaliar as variações nas pressões tomando-se como referência o valor máximo obtido experimentalmente em cada alinhamento. As variações percentuais estão mostradas na Tabela 29.

Tabela 29. Variação percentual entre as pressões experimentais e teóricas

z [m]	Pressão horizontal experimental máxima [kPa]	Erro [%]		
		EN 1991-4	AS 3774	ANSI/ASAE EP433
6,42	20,56	+97,81	+157,98	+21,60
10,9	51,30	+11,27	+38,91	-29,90
15,6	56,00	+23,43	+51,53	-18,47
19,9	79,26	-2,70	+18,10	-33,06

A menor faixa de variação é observada pela norma americana, porém ela apresenta tanto valores conservativos quanto valores subestimados. A faixa de variação dos valores obtidos pela norma europeia chega a atingir quase 100 %, mas ainda é superada pela variação da norma australiana, a qual apresenta uma divergência de 157,98 %.

Na Tabela 30 são apresentados os valores das pressões horizontais máximas lidas nas células para cada profundidade ao longo da parede do silo, nas fases de carga e de descarga, bem como, os respectivos valores calculados dos coeficientes de sobrepressão. As pressões referentes à profundidade 15,6 m originaram um coeficiente de sobrepressão máximo de 1,42. As normas EN 1991-4 e AS 3774 preconizam respectivamente coeficientes 1,025 e 1,27 para as características do silo em análise. O valor da norma europeia mostra-se muito baixo e o da norma australiana é mais próximo dos obtidos experimentalmente.

Tabela 30. Coeficiente de sobrepressão no ciclo 1

z [m]	$p_{\text{hmáx}}$ experimental [kPa]		Coeficiente de sobrepressão
	Carga	Descarga	
6,42	15,36	20,56	1,34
10,9	59,51	51,30	0,86
15,6	39,30	55,99	1,42
19,9	65,24	79,26	1,21

Couto et al. (2013) realizaram estudos usando uma estação de teste de tamanho médio para testar pressões em silos, durante o carregamento e descarregamento de grãos de trigo. Os resultados obtidos indicam que, em estado estático, as pressões dentro do silo não são constantes e destacam que a sobrepressão durante a descarga deve-se principalmente a um incremento no peso unitário do material em certas áreas do silo e, em menor medida, à dilatação; além disso, os valores de pressão obtidos durante a descarga foram superiores aos obtidos utilizando o método de cálculo proposto pela norma EN 1991-4 (2006). Tais resultados estão em concordância aos obtidos nessa pesquisa.

### 5.2.1.3 Coeficiente K do ciclo 1

Com o objetivo de avaliar o coeficiente K, que é a razão entre as pressões horizontal e vertical, são mostradas na Figura 62 as curvas das pressões experimentais, sendo a horizontal medida na base da parede (P2D) e a vertical medida no fundo (F3) do silo, cujos pontos de instrumentação foram implantados o mais próximo possível. Ao término do enchimento do silo no sétimo dia as pressões registradas resultam em um coeficiente K de 0,324; na estocagem foi obtido o valor 0,529; e na descarga houve variação desde 0,360 até 1,091. O valor de K no carregamento está abaixo do limite inferior (0,35) e o valor 1,091 máximo na descarga está acima do limite superior (0,94) da norma australiana (AS 3774, 1999). A ampla faixa de variação do coeficiente no descarregamento indica que, a despeito de ser um dos pressupostos teóricos de Janssen, o coeficiente K não é constante nas condições desse experimento.

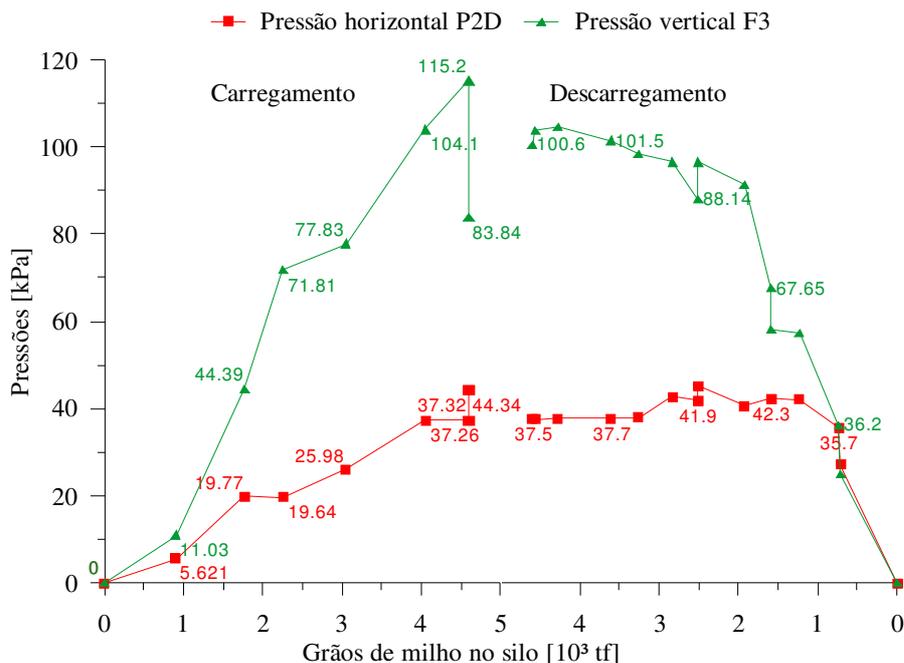


Figura 62. Pressões verticais e horizontais para avaliação do coeficiente K (ciclo 1).

Nascimento e Calil Junior (2009), realizaram um estudo teórico e experimental da relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados em um silo piloto com vários produtos, dentre eles o milho, para diferentes relações H/D e dois tipos de paredes, lisa e rugosa. Concluíram que a formulação de Jaky foi a que apresentou a melhor aproximação para o valor do parâmetro K, para a condição de carregamento e para os produtos estudados. Contudo, o valor do coeficiente K experimental variou em função do tipo de parede e em função da relação H/D.

## 5.2.2 Ciclo 2

O ciclo 2 teve início no dia 17 de novembro de 2016, com a fase de carregamento até o dia 25 de novembro, portanto, um período de nove dias, sendo armazenado um total de 4557,24 toneladas de grãos de milho conforme mostrado na Figura 63. Observa-se que neste ciclo, o carregamento nos primeiros quatro dias foi mais lento que nos últimos cinco dias, tendo armazenado aproximadamente 1,15 toneladas, equivalentes a apenas 25 % do total.

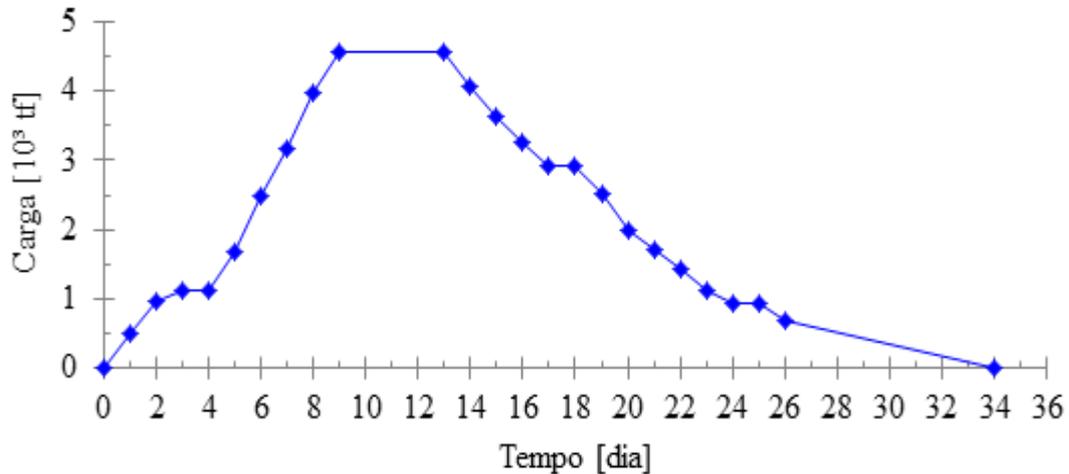


Figura 63. Carregamento e descarregamento diário de grãos de milho do silo durante o ciclo 2.

Neste ciclo, a fase de armazenamento foi de somente quatro dias, sendo iniciada a descarga no dia 30 de novembro e finalizada dia 20 de dezembro de 2016, data em que o silo ficou totalmente limpo.

#### 5.2.2.1 Pressões verticais no ciclo 2

As pressões verticais atuando no fundo do silo, registradas pelas células F1, F2, F3 no ciclo 2 são mostradas na Figura 64 onde se observa em primeiro lugar que a distribuição das pressões verticais atuantes no fundo do silo não é uniforme, apresentando variação decrescente do centro para a parede. O comportamento ocorre tanto para a fase de carregamento quanto para a fase de descarregamento. Tal variação pode ser atribuída ao cone formado na superfície dos grãos devido ao ângulo de repouso e bem como ao atrito mobilizado nos contatos grão-parede. Os valores de pico de pressão registrados pelas células ocorreram após o término no carregamento, isto é, durante a estocagem. Quantificando a não uniformidade na distribuição das pressões atuantes, as reduções foram de 35,21 % e 47,14 % quando se compara a maior pressão no centro do silo com as atuantes na metade do raio e na borda.

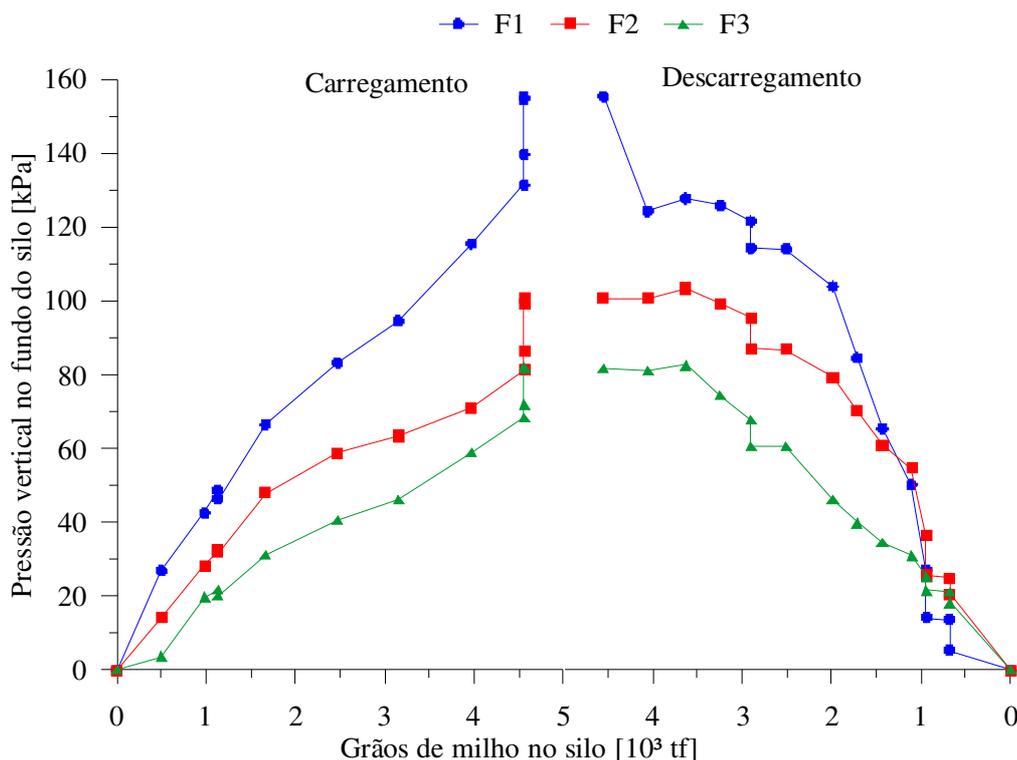


Figura 64. Pressões verticais experimentais no fundo do silo nas fases de carregamento e descarregamento dos grãos de milho (ciclo 2).

Os valores de pressão ao término do carregamento foram 131,24 kPa; 81,11 kPa; e 68,17 kPa; os quais apresentaram incremento durante a estocagem para 155,23 kPa; 100,58 kPa e 82,06 kPa; nas células F1, F2 e F3 respectivamente. Para melhor percepção de tais incrementos, as variações percentuais nas respectivas células foram 16,76 %; 24,00 % e 20,38 %. Na fase descarregamento ocorreu uma sistemática redução nas pressões, as curvas não apresentando picos associados a efeitos dinâmicos.

No intuito de se comparar as pressões experimentais às teóricas, na Figura 65 são mostradas as curvas de distribuição das pressões verticais calculadas por meio dos códigos normativos juntamente com a curva construída com os valores máximos de campo. Pode ser notada uma boa concordância entre os resultados experimental e o da norma australiana quando esta leva em conta a distribuição radial das pressões verticais no centro do silo. Considerando as distribuições uniformes, as normas AS 3774 e ANSI ASAE EP433 subestimam as pressões desde o centro do silo até próximo à metade do seu raio, mas todos os códigos superestimam os esforços quando se considera as regiões mais próximas à parede. Entre os três códigos normativos, o europeu mostra ser o mais conservador.

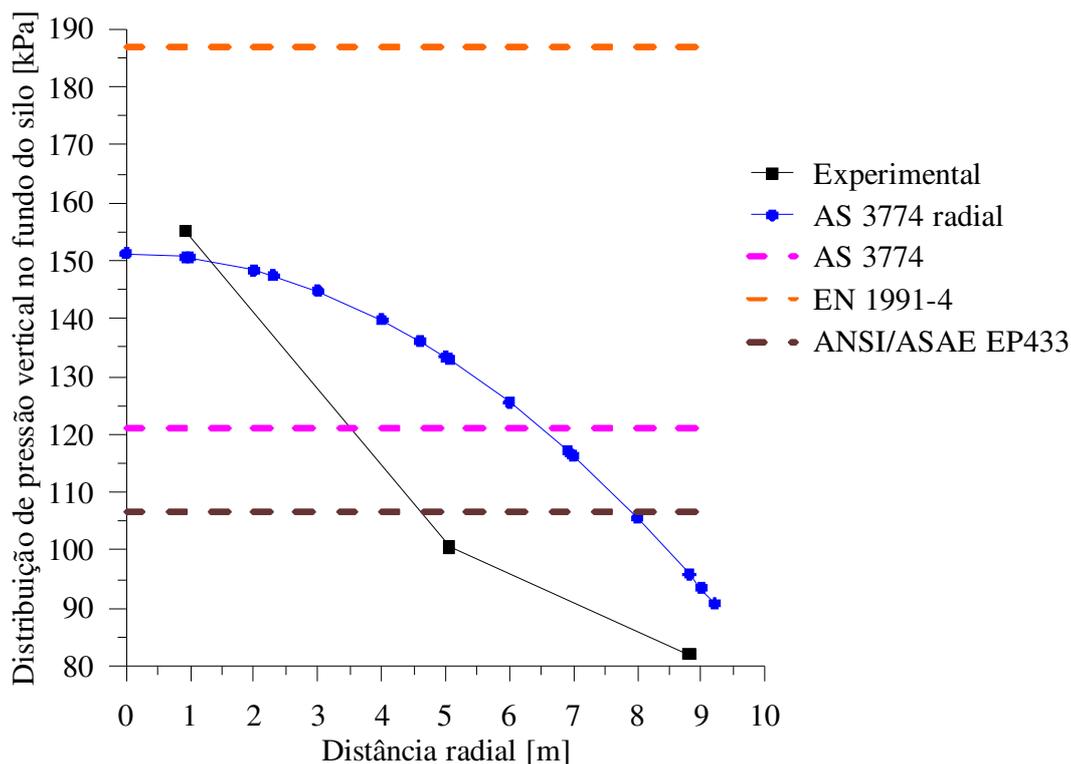


Figura 65. Pressões verticais máximas teóricas e experimentais no fundo do silo no carregamento (ciclo 2).

Para quantificar as variações nos resultados, são apresentadas na Tabela 31 as pressões máximas teóricas com a máxima experimental.

Tabela 31. Resultados dos valores máximos experimentais e teóricos da pressão vertical no fundo do silo durante o carregamento no ciclo 2

Distância radial [m]	Pressão vertical [kPa]				
	Experimental	AS radial	AS 3774	EN 1991-4	ANSI/ASAE EP433
0,1.r	155,23*	150,62			
0,55.r	100,58	132,97	120,96		
0,96.r	82,06	95,88		187,03	106,61
Variação [%]	-	-2,97	-22,08	+20,49	-31,32

\*Valor de referência

Os dados na tabela acima indicam que a norma australiana, quando considerada a distribuição radial, diverge em apenas 2,97 % do resultado experimental; as pressões calculadas pelas normas europeia e americana além de divergirem apresentam variações de sinais opostos de +20,49 % e -22,08 %, respectivamente.

Na Figura 66 são mostradas as curvas de pressão vertical atuante no fundo do silo na fase descarregamento.

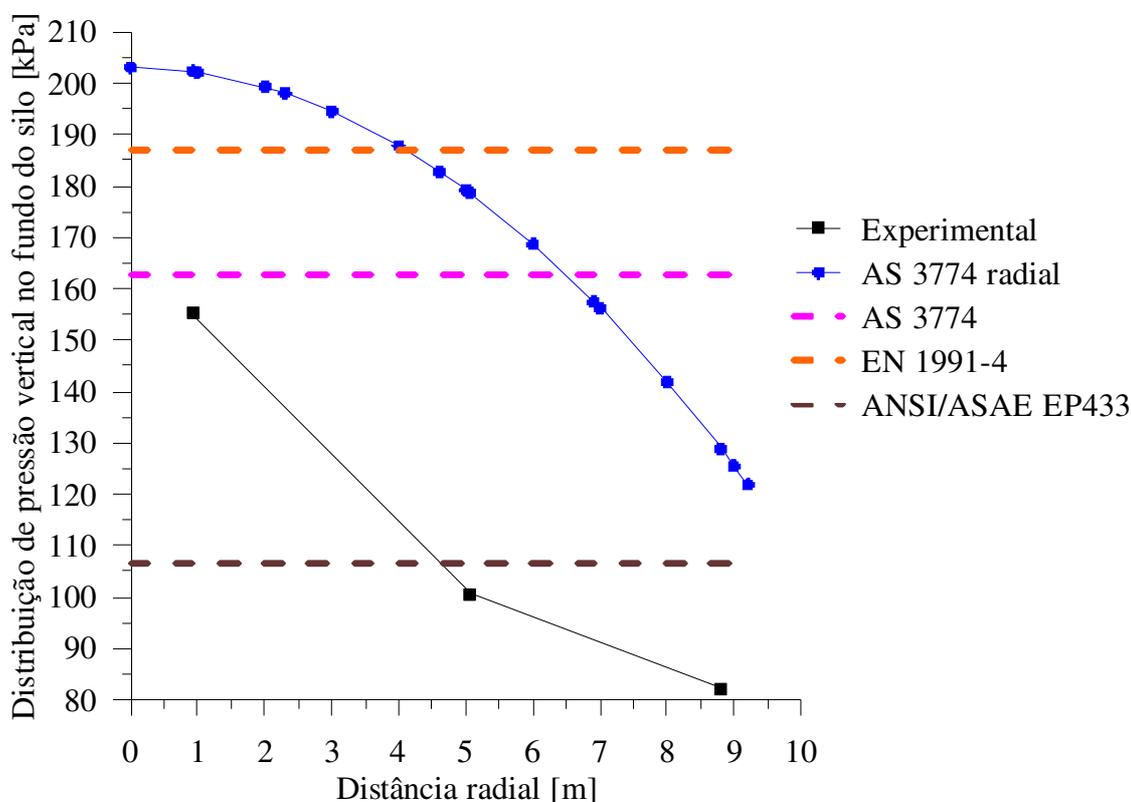


Figura 66. Pressões verticais teóricas e experimentais no descarregamento (ciclo 2).

Em relação aos esforços no carregamento, a única diferença para a fase de descarga é o deslocamento das curvas referentes à norma australiana, deslocando-as para cima, devido ao coeficiente de sobrepressão. As curvas das normas americana e europeia não se alteram, por não prescreverem um fator de majoração, como também não se altera a curva experimental, por não se verificar efeitos dinâmicos.

Os valores máximos de pressões teóricas e experimentais estão mostrados na Tabela 32, permitindo quantificar as variações dos resultados. A norma australiana superestima a pressão de modo acentuado quando se considera distribuição radial (30,35%), mas apresenta valor próximo ao experimental quando assume distribuição uniforme (4,71 %).

Tabela 32. Resultados dos valores experimentais e teóricos da pressão vertical no fundo do silo durante o descarregamento no ciclo 2

Distância radial [m]	Pressão vertical [kPa]				
	Experimental	AS radial	AS 3774	EN 1991-4	ANSI/ASAE EP433
0,93 (0,10.r)	155,23*	202,35			
4,13 (0,55.r)	100,58	178,64	162,54	187,03	106,61
3,75 (0,96.r)	82,06	128,81			
Variação [%]	-	+30,35	+4,71	+20,49	-31,32

\*Valor de referência

Galego et al. (2015), avaliando a pressão vertical em um silo modelo com diferentes alturas, também não observaram efeitos dinâmicos significativos sobre os valores das pressões. Destacando ainda que a altura do silo influencia nas pressões verticais de modo que, em silos de maior altura, as pressões verticais são inferiores.

#### 5.2.2.2 Pressões horizontais no ciclo 2

Passa-se a discutir os resultados obtidos para as pressões horizontais na parede do silo na segunda campanha de campo, aqui denominada ciclo 2, a qual foi iniciada 12 dias após completo esvaziamento do silo no primeiro ciclo.

Na Figura 67 são mostradas as pressões registradas nas células posicionadas na profundidade  $0,32.z$  durante as fases de carregamento e de descarregamento. Os padrões das curvas são similares, mas a diferença de ordenadas para a mesma carga dentro do silo reflete a divergência dos resultados. As curvas exibem picos de pressão já para uma carga armazenada de  $1,5 \times 10^3$  tf, o que corresponde a aproximadamente 1/3 da capacidade de armazenamento do silo. O fato das células estarem a aproximadamente 3/4 da altura do silo significa que tais pressões de pico não são provocadas pela massa de grãos, mas sim por outras fontes, mesmo porque essas pressões são muito pequenas, entre 4 e 7 kPa.

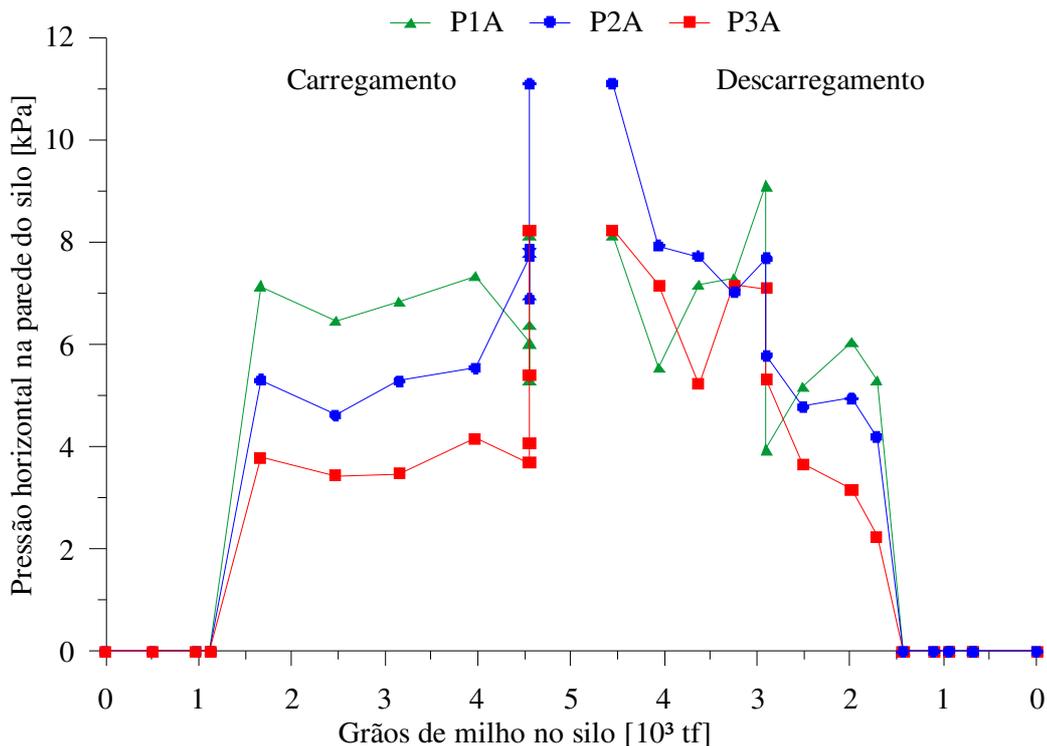


Figura 67. Pressões horizontais experimentais na profundidade  $0,32.z$  em função da carga no silo no ciclo 2.

Depois de completado o enchimento do silo, as pressões foram 6,02 kPa; 7,71 kPa e 3,67 kPa, nas células P1A, P2A e P3A, respectivamente. Durante o armazenamento as pressões sofreram incrementos, atingindo os valores máximos de 8,11 kPa; 11,09 kPa e 8,23 kPa. Este comportamento está consistente com a teoria de Rankine, segundo a qual no estado de repouso o coeficiente  $K$  é maior que no estado de empuxo ativo.

Na fase de descarregamento não se observam variações de pressão que possam ser atribuídas a efeitos dinâmicos. As pressões máximas nesta fase são numericamente iguais àsquelas máximas registradas durante o armazenamento. As curvas estão mais próximas umas das outras, reduzindo a divergência dos resultados observada no carregamento, isto é, a provável assimetria de esforços na massa de grãos é atenuada.

Na Figura 68 são apresentadas as curvas de pressão para as células P2B e P3B posicionadas a  $0,54.z$ , sendo que a célula P1B não é mostrada por ter registrado valores incoerentes.

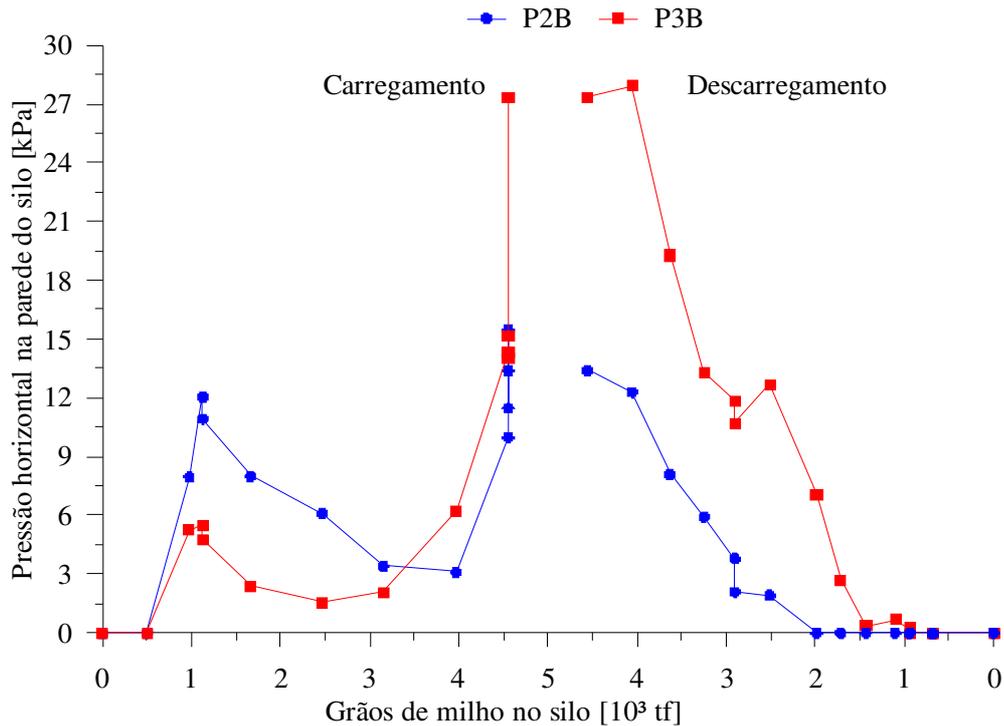


Figura 68. Pressões horizontais experimentais na profundidade  $0,54.z$  em função da carga no silo para o ciclo 2.

Os trechos iniciais das curvas na fase carregamento apresentam valores muito baixos de pressão, os quais não podem ser provocados pelos grãos armazenados, deste modo a discussão deve se limitar ao trecho final, aqui arbitrariamente considerado a partir de uma carga armazenada de aproximadamente  $3,5 \times 10^3$  tf. Depois de completado o enchimento do silo as pressões registradas foram 9,97 kPa e 14,32 kPa nas células P2B e P3B; durante o período de estocagem ocorreram incrementos nas pressões, atingindo máximos de 15,48 kPa e 27,37 kPa, respectivamente.

Os padrões das curvas correspondentes às pressões na fase descarregamento mostram similaridade, porém constatou-se grande divergência numérica, sendo que a diferença entre os valores máximos (13,39 kPa e 27,93 kPa) atingiu 108,59 %.

Os resultados experimentais das pressões horizontais atuantes na parede do silo para as células P1C e P2C situadas a  $0,78.z$  são mostrados na Figura 69. Os valores registrados pela célula P3C são omitidos da figura por não terem apresentado coerência. Os padrões das curvas mostram similaridade, mas observa-se acentuada diferença entre as ordenadas, o que pode estar refletindo possível assimetria dos esforços desenvolvidos na massa de grãos.

As pressões experimentais sofreram redução em relação às aquelas do carregamento, a norma australiana superestima esses valores para ambas as distribuições, radial e uniforme. A quantificação das variações entre as pressões máximas teóricas e experimentais discutidas acima é mostrada na Tabela 38.

Tabela 38. Resultados dos valores experimentais e teóricos da pressão vertical no fundo do silo durante o descarregamento

Distância radial [m]	Pressão vertical [kPa]				
	Experimental	AS radial	AS 3774	EN 1991-4	ANSI/ASAE EP433
0,93 (0,10.r)	156,04*	202,35			
5,06 (0,55.r)	108,91	178,64	162,54	187,03	106,61
8,81 (0,96.r)	94,32	128,81			
Variação [%]	-	+29,68	+4,17	+19,86	-31,68

\*Valor de referência.

Como a pressão vertical máxima é a que deve nortear os dimensionamentos, vale observar a convergência entre os resultados da norma AS 3774 e o experimental, diferindo em apenas 4,17 %.

### 5.2.3.2 Pressões horizontais no ciclo 3

As curvas das pressões horizontais registradas pela instrumentação durante o ciclo 3 são apresentadas a seguir. Houve colunas nas quais nem todas as células apresentaram leituras consistentes, tal como ocorreu nos ciclos anteriores, e, portanto, seus resultados não são exibidos.

Na Figura 78 as pressões mostradas são para célula P2A durante o ciclo, com o valor 1,33 kPa registrado no oitavo dia, quando ocorreu o término do enchimento do silo. Tal pressão é insignificante e irreal, considerando-se que acima da célula havia uma coluna de massa de grãos com altura superior a seis metros. Durante o período de armazenamento foi obtido um valor de 10,67 kPa e na descarga a pressão máxima foi de 11,24 kPa. Tais pressões experimentais são muito baixas para que sejam discutidas com alguma fundamentação teórica.

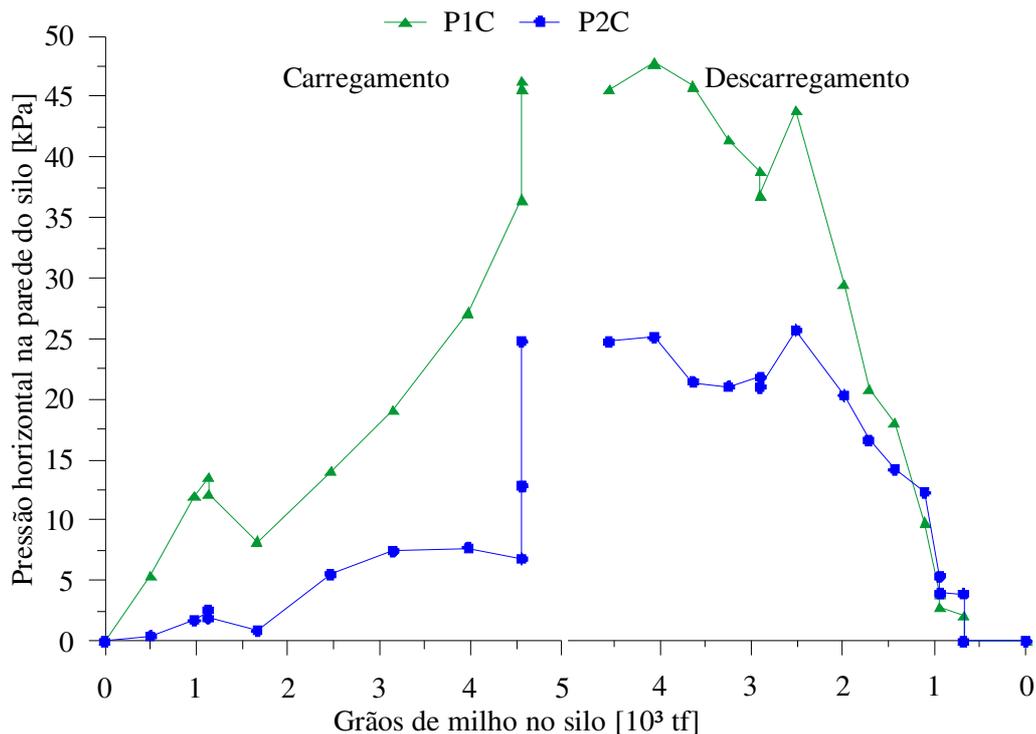


Figura 69. Pressões horizontais experimentais na profundidade  $0,78.z$  em função da carga no silo do ciclo 2.

Também aqui ocorreu incremento de pressão durante o período de estocagem, pois as pressões registradas logo depois de completado o enchimento do silo (36,51 kPa e 6,80 kPa) são menores que as máximas obtidas no armazenamento (46,29 kPa e 24,76 kPa), nas células P1C e P2C, respectivamente. As pressões na célula P2C são muito baixas, e, como isso também se verificou para a célula P2B, sugere que a instrumentação de ambas as células ficou comprometida.

No descarregamento observa-se também acentuada divergência entre os resultados, limitando-se aqui a relatar ocorrência de um ligeiro pico de pressão na célula P1C no estágio inicial da descarga (47,80 kPa), incremento de apenas 3,26 %, não podendo portanto ser atribuído a algum efeito dinâmico.

Na Figura 70 são mostradas as curvas referentes às pressões registradas nas células posicionadas próximo à base da parede do silo, correspondendo à  $0,99.z$ , na altura 0,40 m.

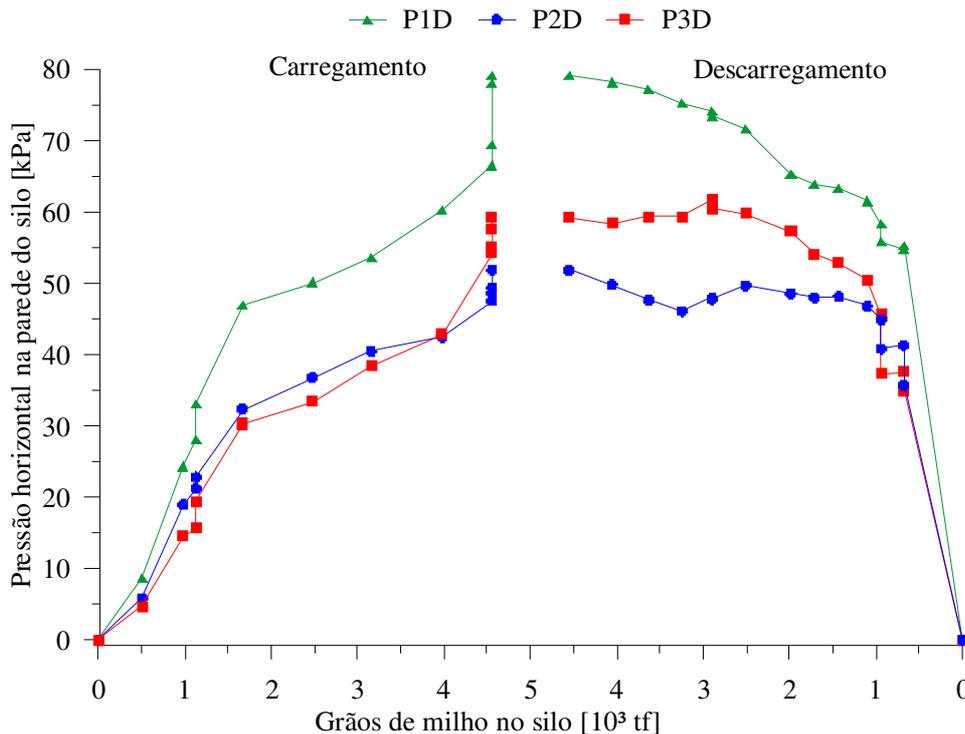


Figura 70. Pressões horizontais experimentais na profundidade  $0,99.z$  em função da carga no silo do ciclo 2.

Na fase de carregamento as células P2D e P3D registraram valores muito próximos, porém menores que os obtidos na célula P1D. Novamente observa-se incremento de pressão no período de estocagem: imediatamente após o enchimento do silo as pressões foram 66,52 kPa; 47,55 kPa e 54,19 kPa, aumentando durante o armazenamento para 79,18 kPa; 51,85 kPa e 59,26 kPa, nas células P1D, P2D e P2D, respectivamente.

No descarregamento observa-se divergência de resultados entre as células, e nota-se que a queda de pressão com o esvaziamento do silo é acentuada na célula P1D e muito pequena nas células P2D e P3D. Também não se observa picos que poderiam ser manifestação de algum efeito dinâmico.

Para comparar os resultados experimentais aos teóricos, são mostrados na Figura 71 as pressões nas células e as curvas com os valores calculados pelas normas. Nota-se que as pressões experimentais atuantes ao longo do alinhamento P1 são próximas aos valores da norma americana nas profundidades  $0,54.z$  e  $0,78.z$ , e das normas europeia e australiana na profundidade  $0,99.z$ . No alinhamento P2 a pressão registrada próximo à base da parede também é muito próxima àquela calculada pela norma americana; entretanto, para alturas maiores os valores experimentais subestimam substancialmente as pressões teóricas.

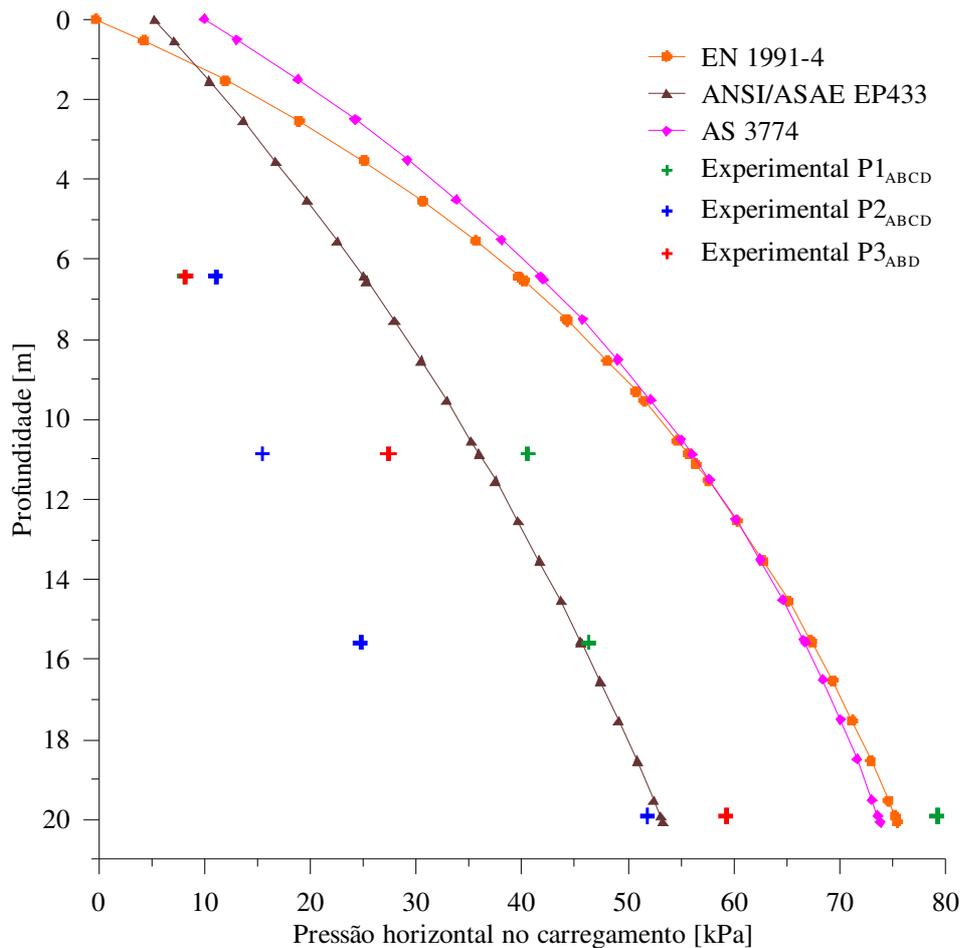


Figura 71. Pressões horizontais teóricas e experimentais no carregamento para o ciclo 2.

No que tange o alinhamento P3, nota-se que os códigos normativos superestimam as pressões nas alturas  $0,32.z$  e  $0,54.z$ , e na base da parede a pressão experimental situa-se entre o valor da norma americana e os valores das normas europeia e australiana.

Na Figura 72 são apresentados os resultados das pressões teóricas e experimentais obtidas no descarregamento. As curvas mostradas exibem o mesmo comportamento daquelas da Figura 71, mas elas estão deslocadas para a direita devido à aplicação dos coeficientes de sobrepressão prescritos pelas normas europeia e australiana. O maior deslocamento da curva referente à norma australiana deve-se ao maior coeficiente de majoração em relação ao coeficiente da norma europeia. Outra diferença digna de nota é que a pressão atuante na base da parede calculada pela norma australiana torna-se superior à experimental (célula P1D). Em resumo, pode-se dizer que o código australiano é conservativo em relação aos outros e aos experimentais em toda a altura da parede, na fase de descarregamento.

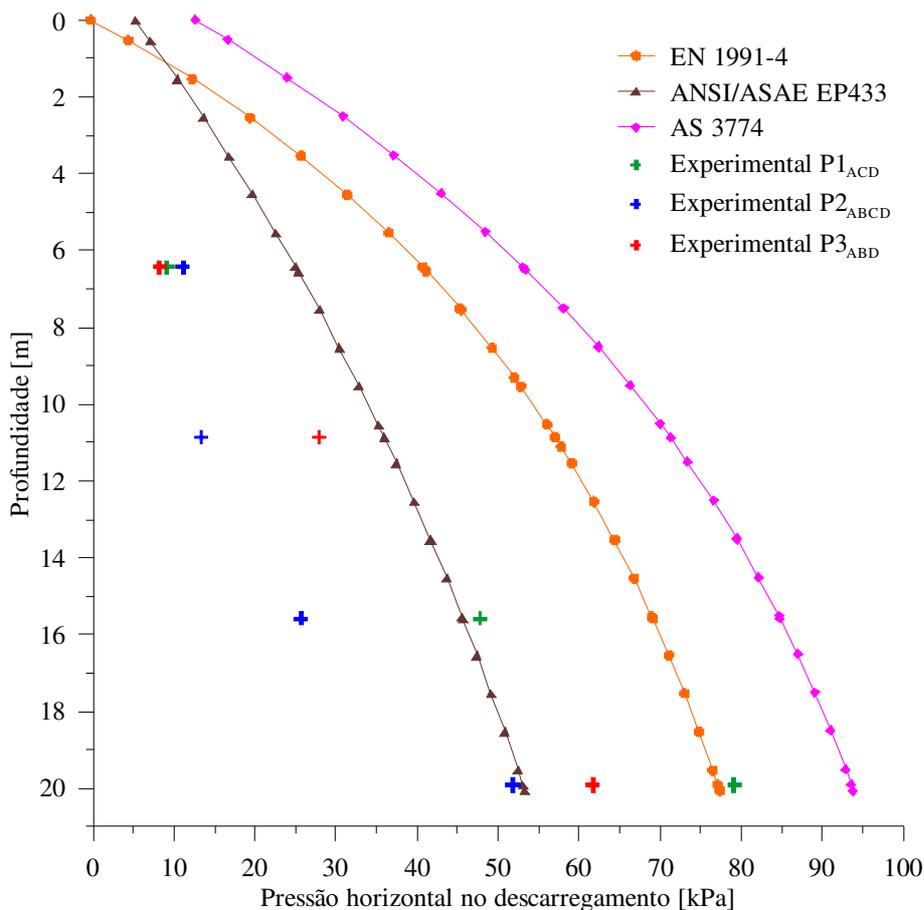


Figura 72. Pressões horizontais teóricas e experimentais no descarregamento para o ciclo 2.

De modo a quantificar as variações entre os resultados experimentais, são mostrados no Quadro V.2 os valores das pressões máximas experimentais e calculadas, na fase de carregamento.

Na Tabela 33 podem ser observadas as pressões máximas teóricas e experimentais no carregamento do ciclo 2

Tabela 33. Pressões máximas teóricas e experimentais no carregamento do ciclo 2

z [m]	Alinhamento	Pressão horizontal experimental [kPa]			Pressão horizontal teórica [kPa]		
		P1	P2	P3	EN 1991-4	AS 3774	ANSI/ASAE EP433
6,42	A	8,11	11,09	8,23	39,66	41,71	25,00
10,86	B	-	15,48	27,39	55,66	56,04	35,96
15,58	C	46,29	24,76	-	67,40	66,72	45,65
19,91	D	79,18	51,85	59,26	75,21	73,68	53,06

Dado que os resultados fornecidos pelas normas europeia e australiana são próximos, optou-se por tomar a média entre eles e avaliar a variação percentual entre os valores teóricos e os experimentais no alinhamento D, pelo fato deste ter apresentado valores mais consistentes. Tal procedimento conduz aos seguintes resultados: a pressão média teórica de 74,45 kPa é 5,97 % menor que a experimental (79,18 kPa) na coluna P1; na coluna P2 a média teórica é 43,59 % maior e na coluna P3 o valor teórico médio é 25,63 % maior.

O valor fornecido pela norma americana (53,06 kPa) é 28,73 % menor que a média das pressões dos outros dois códigos e 32,99 % menor que a pressão na coluna P1; na coluna P2 a norma americana fornece uma pressão 2,33 % maior que a experimental e na coluna P3 o valor do código americano é 10,46 % menor que o experimental.

No descarregamento a grande divergência entre os resultados teóricos não permite aplicar o mesmo procedimento. Na Tabela 34 são mostrados os valores de pressão obtidos.

Tabela 34. Pressões máximas teóricas e experimentais no descarregamento do ciclo 2

z [m]	Alinhamento	Pressão horizontal experimental [kPa]			Pressão horizontal teórica [kPa]		
		P1	P2	P3	EN 1991-4	AS 3774	ANSI/ASAE EP433
6,42	A	9,10	11,09	8,23	40,67	53,04	25,00
10,86	B	-	13,39	27,93	57,08	71,26	35,96
15,58	C	47,80	25,69	-	69,11	84,84	45,65
19,91	D	79,18	51,85	61,74	77,12	93,61	53,06

A norma europeia fornece valor 77,12 kPa para a pressão no alinhamento D, próximo ao experimental (79,18 kPa), uma variação de apenas 2,60 %, na coluna P1. Porém, esta norma superestima a pressão nas colunas P2 e P3, em 48,74 % e 24,91 %, respectivamente.

Fez-se a opção de avaliar as variações nas pressões tomando-se como referência o valor máximo obtido experimentalmente em cada alinhamento. As variações percentuais estão mostradas na Tabela 35. As grandes variações percentuais nos alinhamentos A e B corroboram discussão já feita anteriormente, de que as células situadas nas alturas correspondentes apresentaram valores inconsistentes de pressão. Vale também destacar

que, à luz dos valores constantes na Tabela 35, os códigos normativos restituem valores ambíguos, ora subestimando ora superestimando as pressões.

Tabela 35. Variação percentual entre as pressões experimentais e teóricas do ciclo 2

z [m]	Pressão horizontal experimental máxima [kPa]	Erro [%]		
		EN 1991-4	AS 3774	ANSI/ASAE EP433
6,42	11,09	266,73	378,27	125,43
10,9	27,93	104,37	155,14	28,75
15,6	47,80	44,58	77,49	-4,49
19,9	79,18	-2,60	18,22	-32,99

Na Tabela 36 são mostrados os valores das pressões horizontais máximas em função da profundidade nas fases carga e descarga, e seus respectivos .

Tabela 36. Coeficiente de sobrepressão no ciclo 2

z [m]	p <sub>hmáx</sub> experimental [kPa]		Coeficiente de sobrepressão
	Carga	Descarga	
6,42	11,09	11,09	1,00
10,9	27,39	27,93	1,02
15,6	46,29	47,80	1,03
19,9	79,18	79,18	1,00

Os valores dos coeficientes de sobrepressão mostram-se próximos ao coeficiente 1,025 preconizado pela norma EN 1991-4.

Galego et al. (2015) compararam as pressões experimentais, teóricas e numéricas normais à parede de um silo modelo, constatando que durante o enchimento as pressões experimentais são maiores do que valores previsto pelo modelo numérico, porém, menores que os calculados pela norma EN 1991-4 (2006). Para o tipo de silo estudado por esses autores, a norma prevê um aumento significativo das pressões normais no processo de descarga, diferindo das obtidas nos testes experimentais e daqueles calculados numericamente.

### 5.2.2.3 Coeficiente K do ciclo 2

De modo a avaliar o comportamento do parâmetro K, na Figura 73 são mostradas as curvas das pressões horizontais e verticais no ponto mais baixo da parede do silo. Observa-se grande variação nos valores do coeficiente K, para as fases de carregamento e descarregamento. Considerando-se os valores obtidos, os estados de tensões na massa de grãos variam desde o estado ativo de Rankine, passam pelo estado de repouso e atingem o estado passivo. Ao término do enchimento do silo, no nono dia, o coeficiente K foi 0,697; no terceiro dia do período de estocagem os valores obtidos foram 0,677; 0,602 e 0,634. Na descarga houve drástica variação do coeficiente, desde 0,616 até 1,966; ocorrendo inversão no estado de tensões.

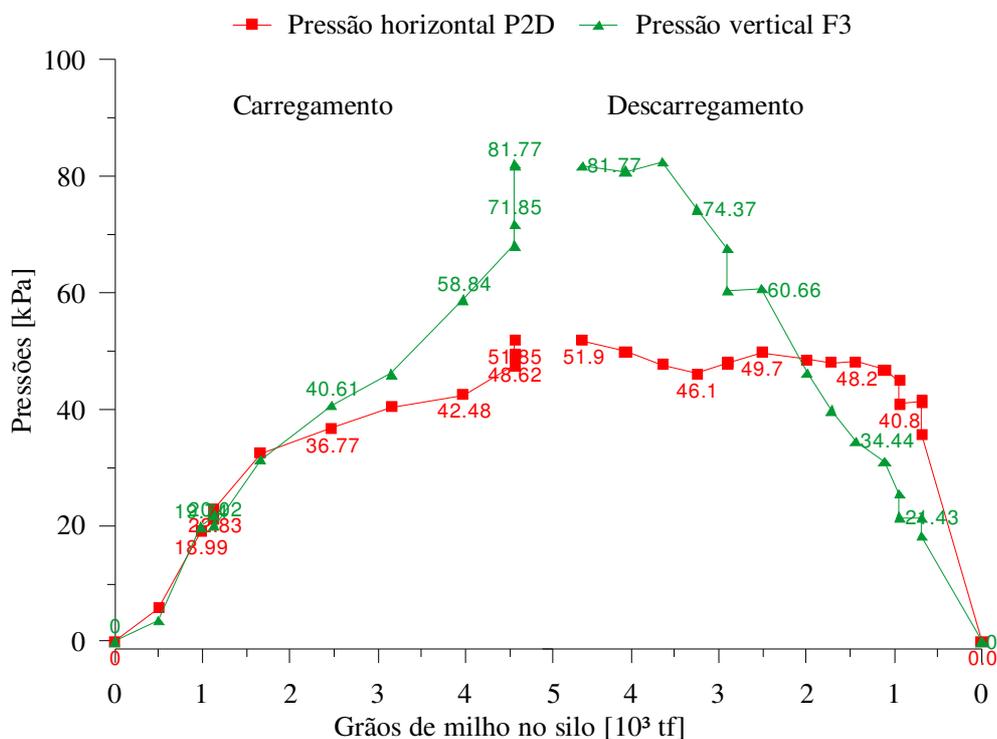


Figura 73. Pressões verticais e horizontais para avaliação do coeficiente K (ciclo 2).

Os intervalos das normas europeia e australiana são 0,58 a 0,74 e 0,35 a 0,94, respectivamente; a norma americana prescreve um único valor de 0,50. Nota-se que, face aos valores experimentais, os valores dos coeficientes dos códigos normativos não levam em conta a possibilidade da ocorrência do estado passivo de tensões.

Lopes Neto et al. (2014a) também avaliaram experimentalmente o coeficiente K, neste caso, tendo como produto armazenado grãos de areia seca, observando uma grande

variabilidade entre os valores obtidos mediante o emprego de diferentes teorias, concluindo que a formulação de Jaky retornou valores mais próximos aos experimentais, com uma variação de 17%.

### 5.2.3 Ciclo 3

Com início no dia 27 de dezembro de 2017, o carregamento durou oito dias, ou seja, terminou no dia 03 de janeiro de 2017 estocando 4589,21 toneladas de grãos de milho. Nesta fase, como pode ser observado Figura 74, houve uma interrupção por dois dias no processo, no quinto e sexto dia, correspondentes aos dias 31 de dezembro e 01 de janeiro respectivamente. A fase de armazenamento, com duração de 32 dias, percorreu até o dia 05 de fevereiro de 2017, data em que se iniciou a descarga, estando o silo totalmente limpo no dia 22 de fevereiro de 2017.

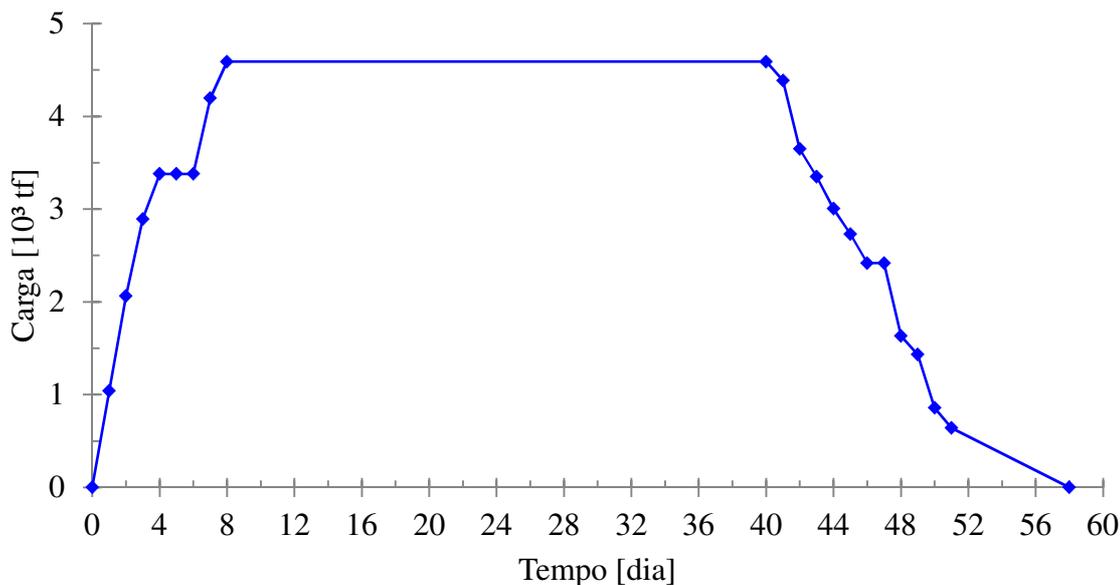


Figura 74. Carregamento e descarregamento diário de grãos de milho no silo durante o terceiro ciclo.

Neste ciclo, assim como no ciclo 2, foram feitas coletas de dados durante todo o período das três fases, contudo, ao contrário do ciclo 2, quando a fase de armazenamento durou apenas três dias, no ciclo três a duração foi de 32 dias, motivo pelo qual as análises das variações das pressões são feitas em relação ao tempo, possibilitando assim, observar a fase de armazenamento

### 5.2.3.1 Pressões verticais no ciclo 3

As curvas das pressões verticais atuantes no fundo do silo durante o ciclo 3 podem ser observadas na Figura 75 .

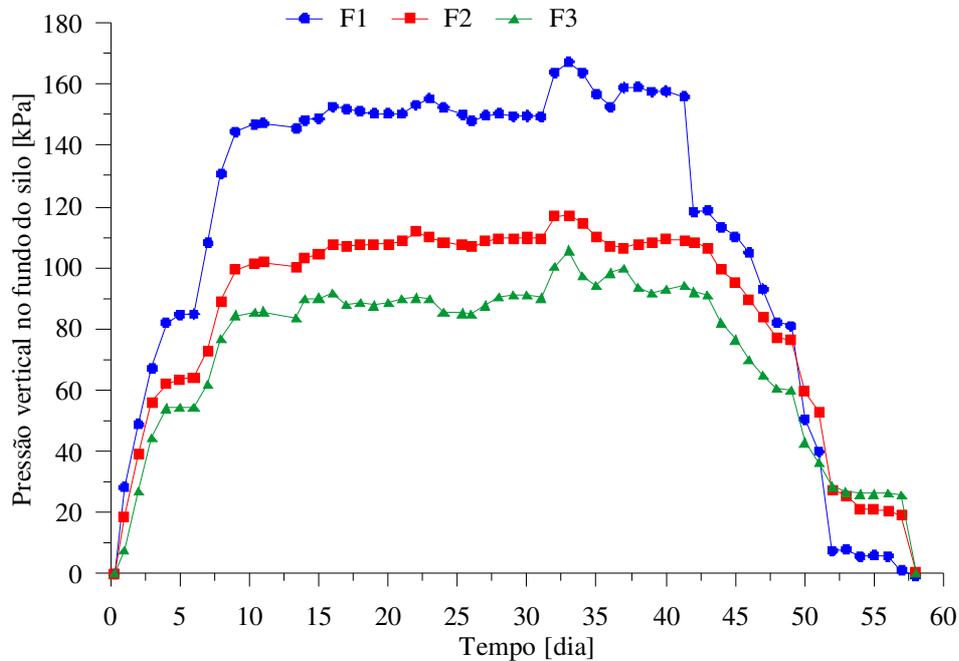


Figura 75. Pressões verticais experimentais (ciclo 3).

Os padrões das curvas denotam bom desempenho da instrumentação, em que se verifica que as pressões são maiores próximo ao centro (F1) e menores próximo à parede (F3) do silo. Também se observa que as curvas são mais próximas no trecho inicial do carregamento, até a carga de  $2,89 \times 10^3$  tf, o que corresponde a 63 % da carga máxima armazenada ( $4,59 \times 10^3$  tf). A partir desse nível de carga, as curvas se distanciam entre si, manifestando o efeito do parâmetro K, em que parte do peso dos grãos é transferido para as paredes do silo por atrito lateral.

Do quarto ao sexto dia não houve carregamento do silo, fato refletido pelo platô nas três curvas.

No oitavo dia encerrou-se o enchimento do silo, com as células F1, F2 e F3 registrando 130,83 kPa, 88,94kPa e 76,77 kPa, respectivamente. Em relação à pressão no centro do silo, as quedas foram 32,02 % e 41,32 % nas posições intermediária e próxima à parede.

O período de estocagem pode ser notado no platô exibido pelas curvas na parte central do gráfico, com ocorrência de um pico nas três células para uma mesma carga armazenada, no 33º dia, sendo as pressões de pico 167,30 kPa, 116,98 kPa e 105,67 kPa, nas células F1, F2 e F3, respectivamente.

No início do descarregamento ocorre queda sistemática das pressões, sendo tal queda mais pronunciada na célula F1, e após completo esvaziamento mecânico a inversão na posição das curvas reflete a massa de grãos remanescente no silo que não é passível de ser escoada por gravidade. As pressões máximas de descarga foram 156,04 kPa, 108,91 kPa e 94,31 kPa, nas células F1, F2 e F3, respectivamente. Em relação à pressão no centro do silo, as quedas foram 30,20 % e 39,56 % nas posições intermediária e próxima à parede, numericamente semelhantes às quedas ocorridas no enchimento.

A comparação das pressões experimentais com as teóricas na fase carregamento pode ser avaliada pelas curvas mostradas na Figura 76. A pressão vertical experimental atuante no centro do silo é maior que as pressões calculadas pelos códigos normativos exceto para o EN 1991-4. Na posição próxima à metade do raio do silo, 0,55.r, a norma australiana superestima e a norma americana subestima o valor experimental. No ponto mais distante do centro, isto é, próximo à parede do silo, o valor da norma americana é muito próximo ao experimental; e a norma australiana subestima a pressão quando leva em conta a distribuição radial e superestima quando assume distribuição uniforme.

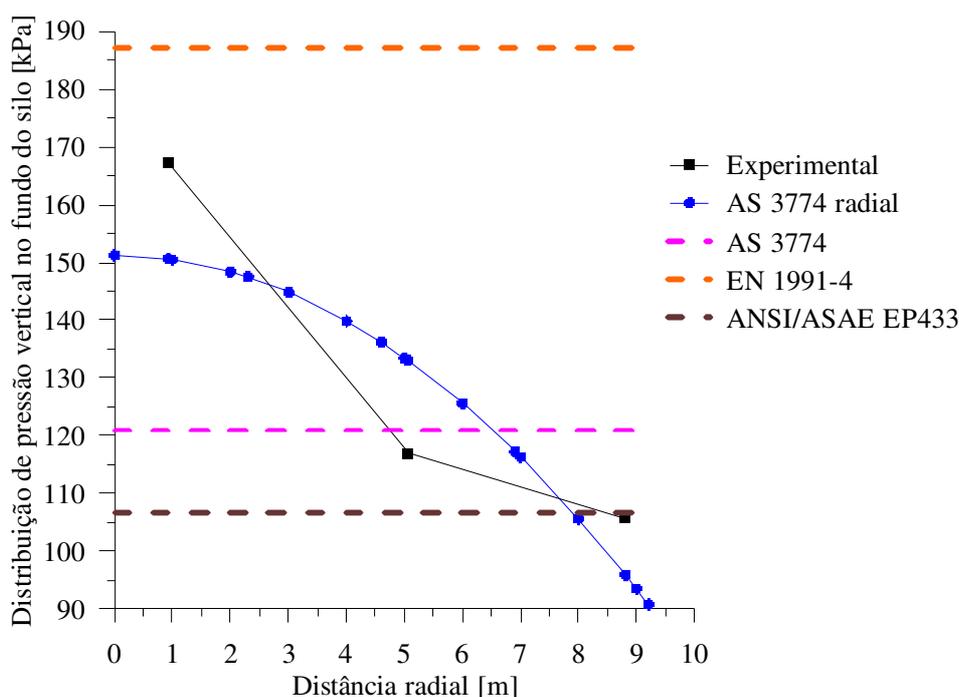


Figura 76. Pressões verticais teóricas e experimentais no carregamento do ciclo 3.

Para quantificar as variações dos resultados, na Tabela 37 são mostrados os valores máximos teóricos e experimentais.

Tabela 37. Valores experimentais e teóricos da pressão vertical durante o carregamento

Distância radial [m]	Pressão vertical [kPa]				ANSI/ASAE EP433
	Experimental	AS radial	AS 3774	EN 1991-4	
0,93 (0,10.r)	167,30*	150,62			
5,06 (0,55.r)	116,98	132,97	120,96	187,03	106,61
8,81 (0,96.r)	105,67	95,88			
Variação [%]	-	-9,97	-27,70	+11,79	-36,28

\*Valor de referência

A pressão máxima calculada pela norma australiana com distribuição radial diverge da pressão experimental em 9,97 %, e com distribuição uniforme em 27,70 %. O valor da norma europeia é 11,79 % maior e o da norma americana 36,28 % menor, em relação ao experimental.

Os resultados de pressão vertical na fase descarregamento são mostrados na Figura 77.

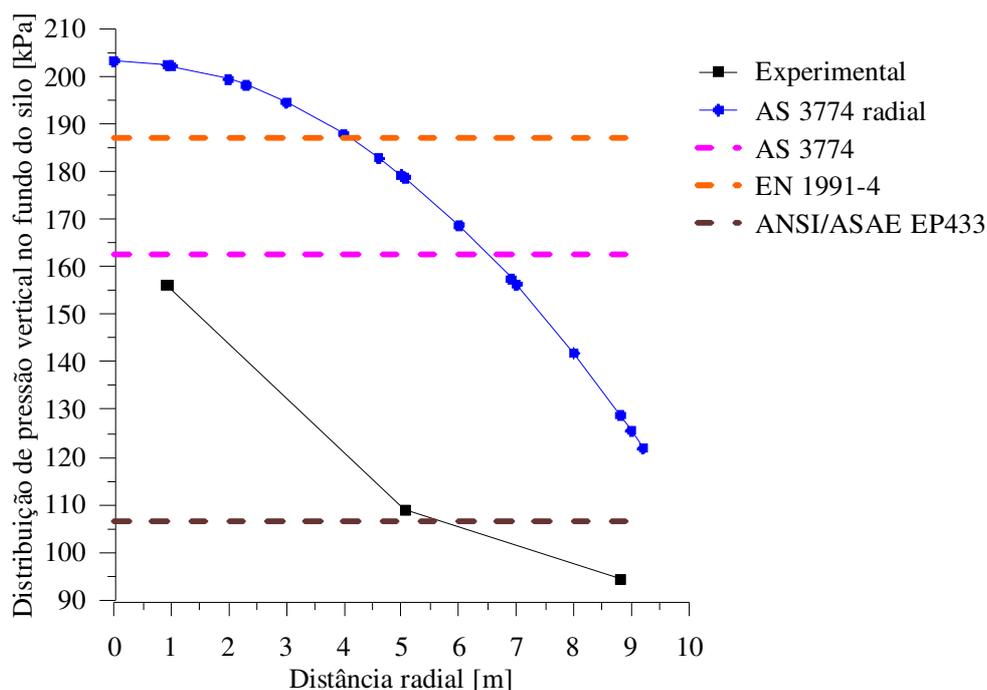


Figura 77. Pressões verticais teóricas e experimentais no descarregamento (ciclo 3).

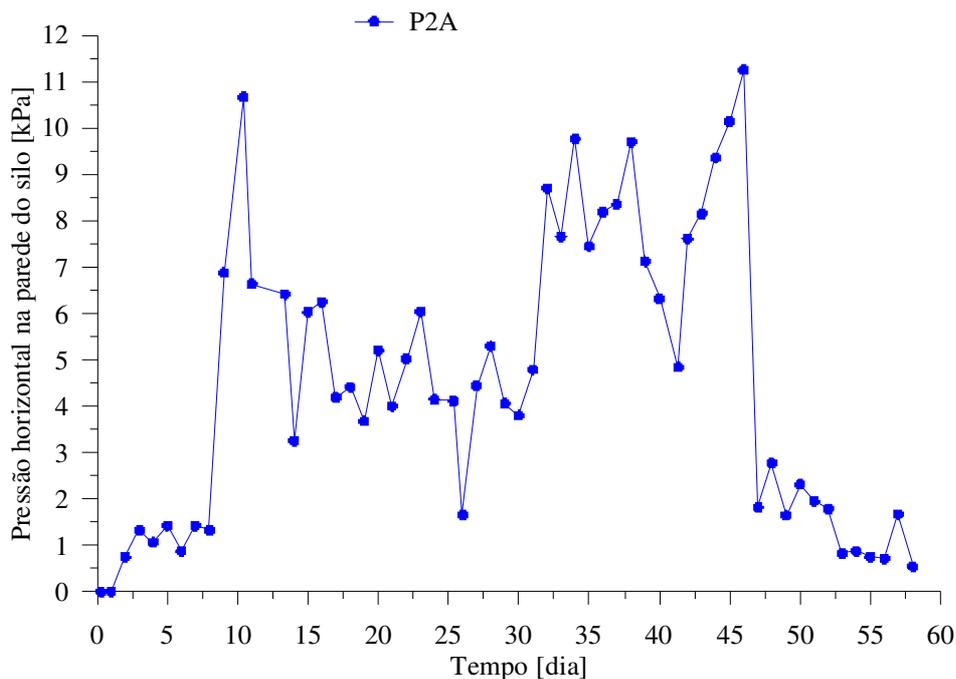


Figura 78. Pressões horizontais experimentais na profundidade 0,32.z (ciclo 3).

Na Figura 79 é mostrada a curva das pressões lidas pela célula P3B, obtendo-se 18,34 kPa ao término do enchimento do silo no oitavo dia, sendo que um dia após ocorreu um pico de pressão para 31,35 kPa, sendo este valor a máxima pressão durante o período de armazenamento.

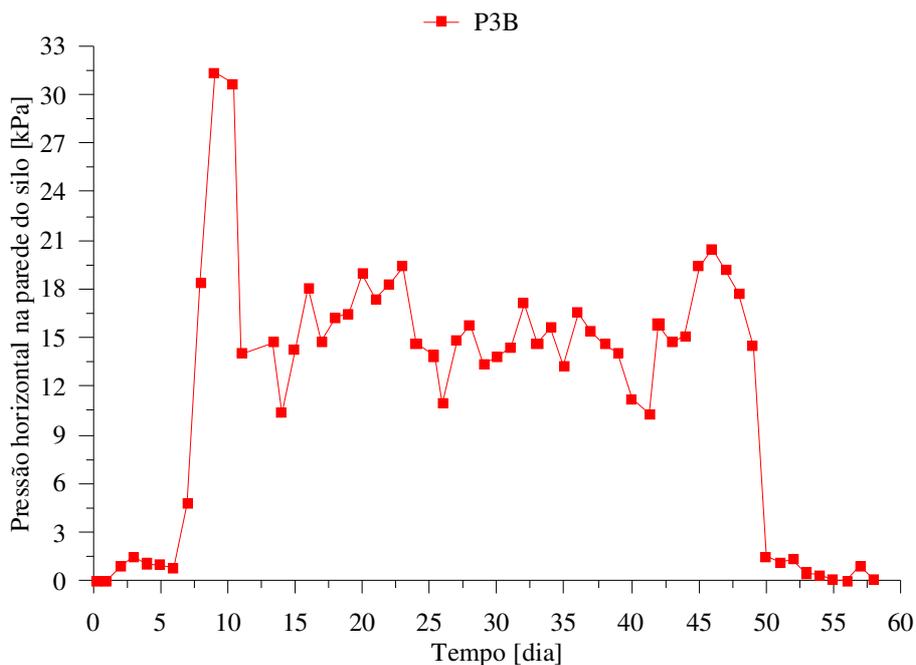


Figura 79. Pressões horizontais experimentais na profundidade 0,54.z (ciclo 3).

Na descarga iniciada no 41º dia o valor máximo de pressão ocorreu no 46º dia, com a leitura de 20,48 kPa.

Na Figura 80 é mostrada a curva das pressões na célula PIC, com o valor 28,07 kPa ao término do enchimento do silo no oitavo dia, ocorrendo um incremento para 40,72 kPa após um dia.

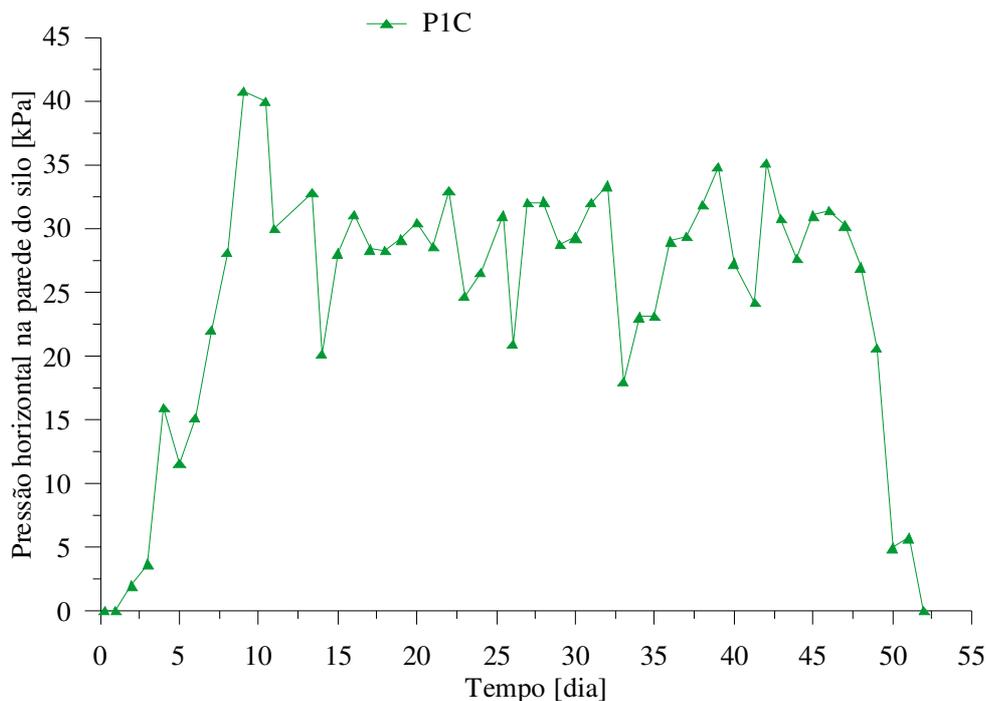


Figura 80. Pressões horizontais experimentais na profundidade 0,78.z (ciclo 3).

Durante o período de estocagem a pressão cai para atingir um patamar, oscilando em torno do máximo observado no carregamento. Na descarga iniciada no 41º dia observa-se um pico ocorrido um dia após, com a leitura de 35,15 kPa.

As curvas das pressões obtidas no ponto mais baixo da instrumentação na parede, 0,99.z, do silo são mostradas na Figura 81. O primeiro platô das curvas refere-se ao período do quarto ao sexto dia em que não houve carregamento do silo. Ao término do enchimento do silo, no oitavo dia, a pressão nas células P1D, P2D e P3D foram 58,70 kPa, 38,70 kPa e 34,92 kPa, respectivamente. Foram registrados picos na fase de estocagem no décimo dia, com as leituras de 70,89 kPa, 46,29 kPa e 51,67 kPa, nas respectivas células.

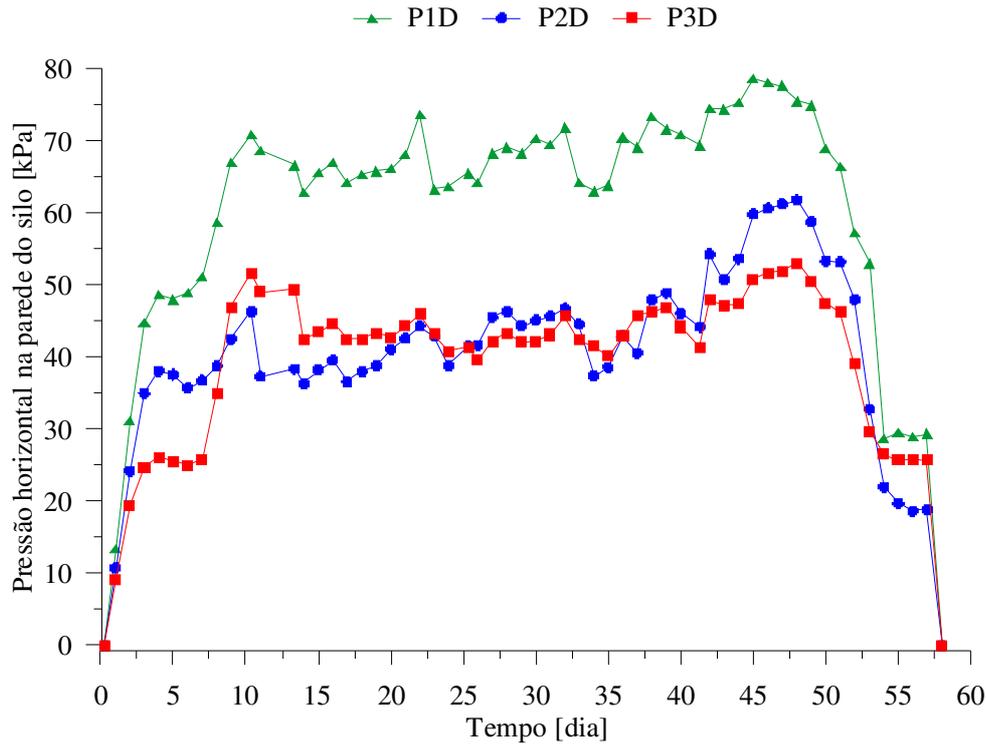


Figura 81. Pressões horizontais experimentais profundidade 0,99.z em função da carga no silo.

Na descarga também houve incremento de pressão em relação ao início do fluxo, sendo as máximas registradas de 78,64 kPa, 61,68 kPa e 53,02 kPa, nas células P1D, P2D e P3D, respectivamente.

As diferenças nos valores das ordenadas dos pontos sugerem existência de assimetria de esforços na massa de grãos. As máximas variações são quantificadas como 40,51 %, 34,70 % e 32,58 %, nas fases carga, estocagem e descarga, respectivamente.

As pressões horizontais experimentais na fase carregamento são comparadas às teóricas calculadas segundo os códigos normativos EN 1991-4, ANSI/ASAE EP433 e AS 3774, cujos resultados são mostrados na Figura 82, onde pode ser observada concordância entre os resultados das normas europeia e australiana e seus valores superam as pressões da norma americana e as experimentais para todas as profundidades. Por sua vez, a norma americana também supera as pressões experimentais ao longo da parede, com exceção da pressão na base (P1D). As pressões experimentais na coluna P2 mostram-se muito baixas nas profundidades A (0,32.z) e C (0,78.z H), inclusive sem variação apreciável entre eles, apesar de se localizarem em alturas significativamente diferentes. Parece claro que a pressão registrada pela célula P2C está muito aquém do valor real.

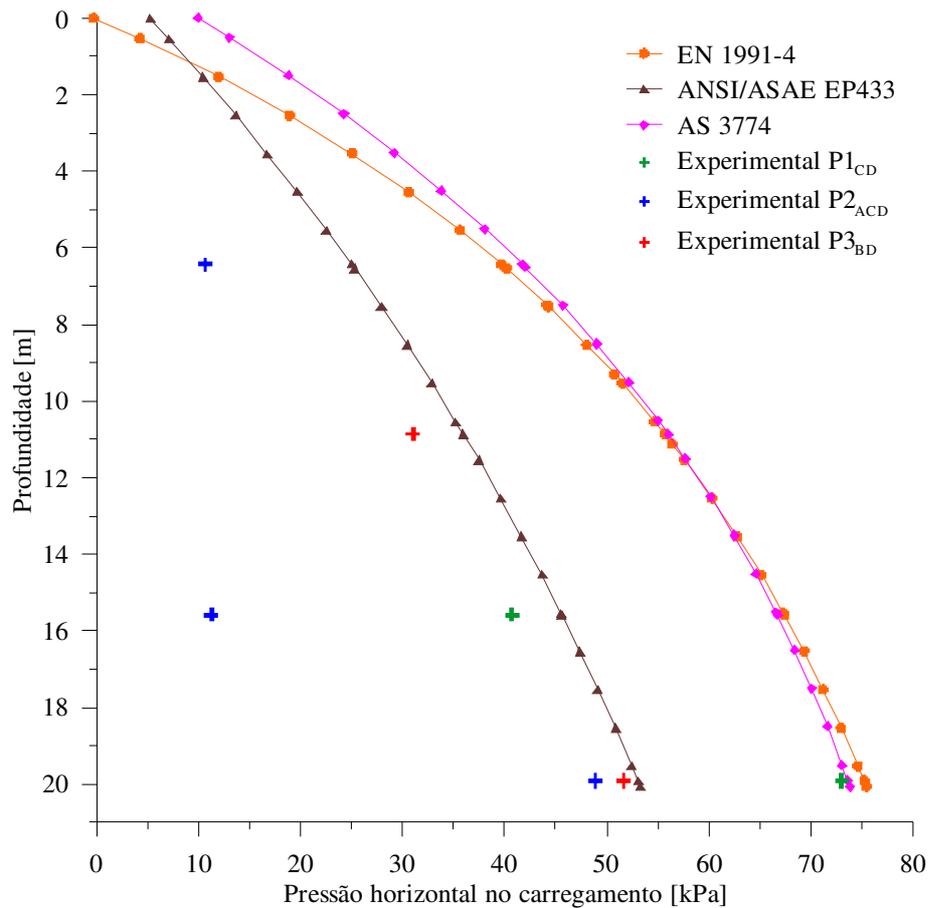


Figura 82. Pressões horizontais teóricas e experimentais no carregamento para o ciclo 3.

Na metade inferior do silo os valores experimentais são muito próximos daqueles calculados pela norma americana, sobretudo na célula P3D na base da parede. Pode-se destacar também a concordância dos valores de pressão das normas europeia e australiana com o valor experimental na célula P1D, também na base da parede.

Na Tabela 39 são apresentadas as pressões máximas teóricas e experimentais nas diferentes alturas instrumentadas.

Tabela 39. Pressões máximas teóricas e experimentais no carregamento

z [m]	Alinhamento	Pressão horizontal experimental [kPa]			Pressão horizontal teórica [kPa]		
		P1	P2	P3	EN 1991-4	AS 3774	ANSI/ASAE EP433
6,42	A	-	10,67	-	39,66	41,71	25,00
10,86	B	-	-	31,00	55,66	56,04	35,96
15,58	C	40,72	11,27	-	67,40	66,72	45,65
19,91	D	73,00	48,89	51,67	75,21	73,68	53,06

A proximidade dos valores das normas europeia e australiana permite obter sua média e comparar as variações observadas entre esta e as pressões máximas calculadas pela norma americana e as experimentais.

No alinhamento A, tomando-se como referência o valor médio 40,69 kPa obtém-se os erros percentuais de 38,56 % e 73,78 % para valores da norma americana e experimental, respectivamente; no alinhamento B erros de 35,61 % e 27,09 % em relação à média 55,85 kPa; no alinhamento C erros de 20,88 % e 39,28 % em relação à média 67,06 kPa; e no alinhamento D os erros de 28,72 % e 1,93 % em relação à média 74,44 kPa.

Na fase de descarregamento as pressões horizontais teóricas e experimentais ao longo da parede do silo são apresentadas na Figura 83. Observa-se similaridade dos resultados com aqueles do carregamento com algumas exceções. Em primeiro lugar, ocorre deslocamento das curvas referentes às normas europeia e australiana devido aos coeficientes de sobrepressão, conforme já discutido anteriormente.

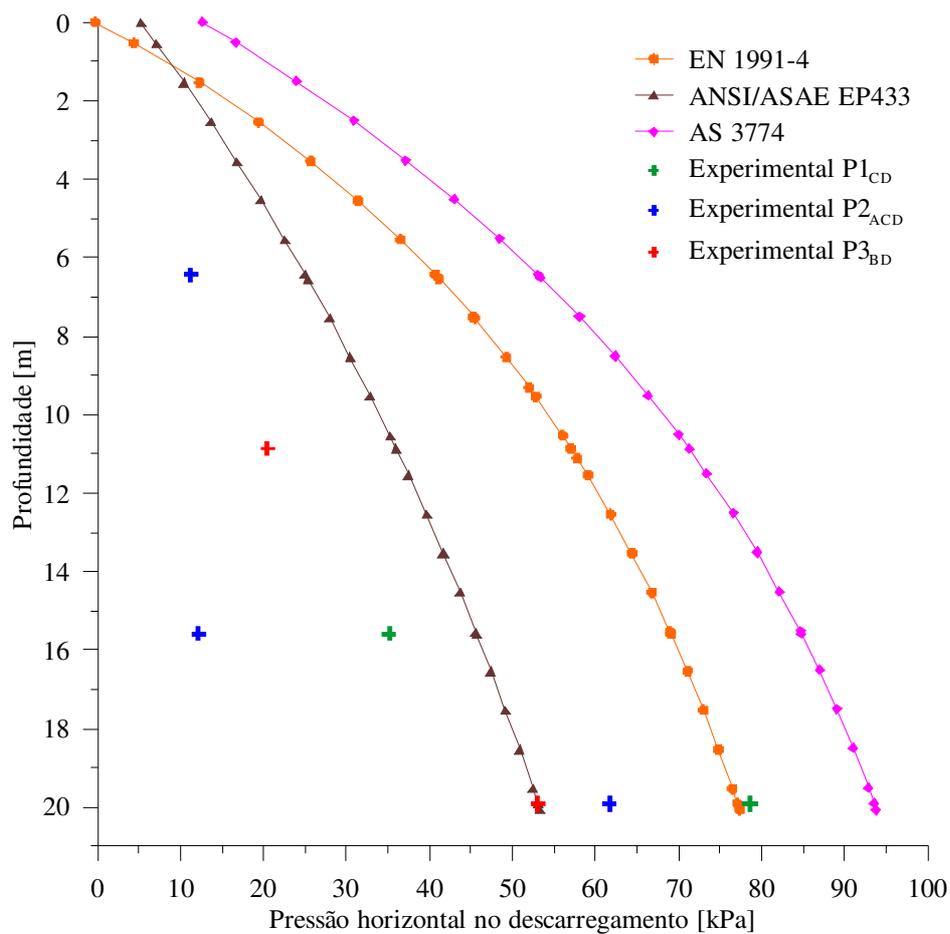


Figura 83. Pressões horizontais teóricas e experimentais no descarregamento para o ciclo 3.

A avaliação em termos numéricos é feita a partir dos valores apresentados na Tabela 40.

Tabela 40. Pressões máximas teóricas e experimentais no descarregamento

z [m]	Alinhamento	Pressão horizontal experimental [kPa]			Pressão horizontal teórica [kPa]		
		P1	P2	P3	EN 1991-4	AS 3774	ANSI/ASAE EP433
		6,42	A	-	11,24	-	40,67
10,86	B	-	-	20,48	57,08	71,26	35,96
15,58	C	35,15	12,16	-	69,11	84,84	45,65
19,91	D	78,64	61,68	53,02	77,12	93,61	53,06

Observa-se que as pressões experimentais mais distantes da base da parede sofreram pequenos incrementos, enquanto a pressão máxima próximo a fundo aumentou de 73,00 kPa para 78,64 kPa, um incremento de um fator 1,077. Tal coeficiente de sobrepressão obtido experimentalmente situa-se entre o da norma europeia (1,025) e o da norma australiana (1,27).

Os valores apresentados na Tabela 41 permitem avaliar as variações entre as pressões máximas teóricas e experimentais para todas as profundidades instrumentadas. Os erros apresentados pelos códigos normativos foram calculados tomando-se como referência as pressões máximas registradas pelas células em cada profundidade.

Tabela 41. Erro percentual entre as pressões experimentais e teóricas

z [m]	Pressão horizontal experimental máxima [kPa]	Erro [%]		
		EN 1991-4	AS 3774	ANSI/ASAE EP433
6,42	11,24	261,83	371,88	122,42
10,9	20,48	178,71	247,95	75,73
15,6	35,15	96,61	141,37	29,87
19,9	78,64	-1,93	19,04	-32,53

Os elevados erros percentuais nos valores das pressões nas menores profundidades demonstram a pequena acurácia das células para baixas pressões. A

instrumentação instalada na base da parede, isto é, próximo ao fundo do silo, registrou valores de pressões com menores erros em relação aos resultados teóricos, com melhor resultado para a norma europeia.

Alguns autores observaram que a presença de zonas de cisalhamento influenciam as pressões exercidas sobre paredes de silo (Slominski et al., 2007). Essas zonas de cisalhamento causam flutuações nas pressões laterais nas paredes e podem ocorrer ao longo da altura do silo, causando descontinuidades ou picos na curva de pressões normais na parede.

Na Tabela 42 são apresentados os valores das pressões horizontais máximas nas fases carga e descarga em função da profundidade e os coeficientes de sobrepressão calculados, no ciclo 3.

Tabela 42. Coeficiente de sobrepressão no ciclo 3

z [m]	p <sub>hmáx</sub> experimental [kPa]		Coeficiente de sobrepressão
	Carga	Descarga	
6,42	10,67	11,24	1,05
10,9	31,00	20,48	0,66
15,6	40,72	35,15	0,86
19,9	73,00	78,64	1,08

Os valores do coeficiente de sobrepressão nas profundidades 10,9 m e 15,6 m são inferiores a 1, e portanto descartados da análise. Os baixos valores do coeficiente nas profundidades 6,42 m e 19,9 m ainda são maiores que o valor prescrito pela EN 1991-4, porém menores que o valor preconizado pela AS 3774.

### 5.2.3.3 Coeficiente K para o ciclo 3

De modo a avaliar o comportamento do parâmetro K, na Figura 84 são apresentadas as curvas das pressões experimentais, vertical e horizontal, nas células F3, posicionada na laje de fundo, e P2D, posicionada na base da parede. Nota-se que ao término do enchimento do silo, no oitavo dia, as pressões horizontal e vertical foram 38,70 kPa e 76,77 kPa, respectivamente, cuja razão fornece o valor de 0,504 para o coeficiente K, o qual coincide com o da norma ANSI/ASAE EP433 (0,500). Aplicação da formulação da

norma EN 1991-4 conduz aos valores limites inferior e superior de 0,580 e 0,742, para K, respectivamente. Também a norma AS 3774 apresenta formulações para cálculo da faixa de valores de K, fornecendo 0,35 e 0,94 para os limites inferior e superior.

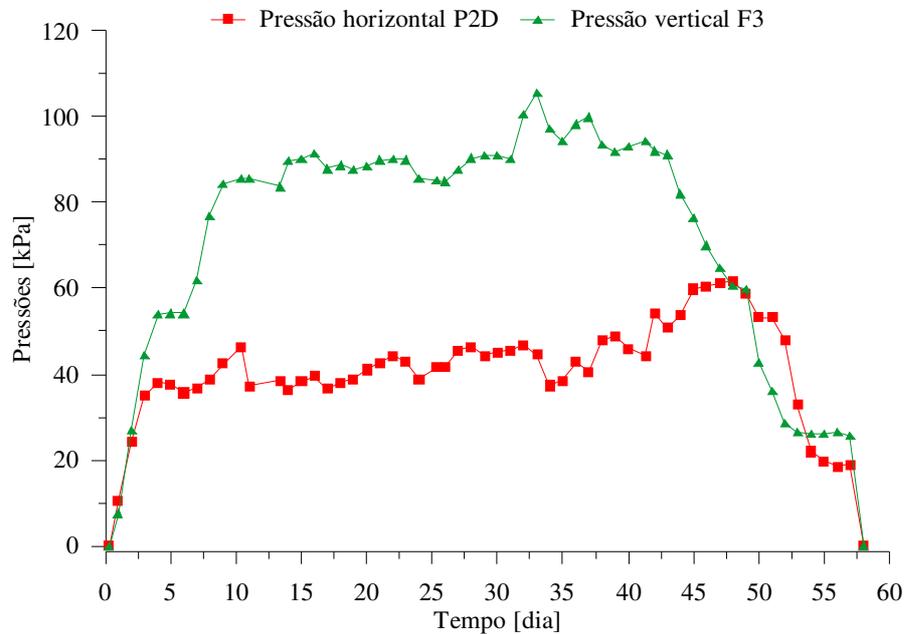


Figura 84. Pressões verticais e horizontais para avaliação do coeficiente K (ciclo 3).

Na fase de armazenamento, foram calculados os valores de K para todo o período de 31 dias, com valores mínimo e máximo de 0,384 a 0,540, média de 0,464, e desvio padrão máximo de 0,057. Esses resultados são estatisticamente significantes, levando a adotar o valor médio como representativo do coeficiente K, para o estado de repouso.

No descarregamento, os valores calculados de K variaram de 0,589 a 1,686; valores do coeficiente de empuxo maiores que 1,00 indicam estado passivo de tensões. Tal resultado reflete a inversão nos estados de tensão dentro da massa de grãos durante o fluxo e reforça a ideia da existência de três estados de tensão associados ao fator K, um ativo, um passivo e outro em repouso.

#### 5.2.3.4 Pressões de atrito no ciclo 3

Foram instaladas células de carga sob três montantes, porém ocorreu falha de funcionamento em uma delas, assim são apresentadas na Figura 85 as curvas referentes às leituras obtidas nas células M1 e M2. Os padrões são idênticos nas duas curvas, refletindo a acurácia da instrumentação quanto à obtenção das cargas por essas células.

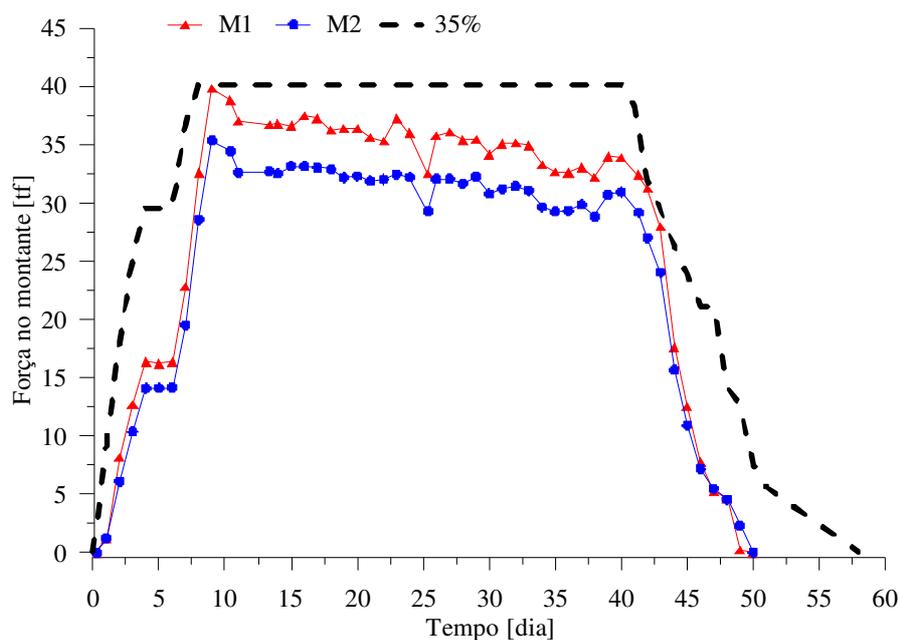


Figura 85. Força registrada nos montantes em função da carga no silo (ciclo 3).

As diferenças nas ordenadas podem ser devidas à ocorrência de assimetria durante as fases, principalmente durante o período de armazenamento; no enchimento e na descarga tal diferença é pequena.

Ao término do enchimento do silo, no oitavo dia, as cargas registradas foram 32,55 tf e 28,56 tf, para os montantes M1 e M2 respectivamente, uma diferença de 13,97 %. Um dia após, ocorre incremento de carga em ambos montantes, para 39,80 tf e 35,34 tf; tais incrementos correspondem a 22,27 % na célula M1 e 22,73 % na célula M2, mostrando que o acréscimo de carga devido a uma possível acomodação da massa de grãos foi o mesmo em ambas as células.

Na descarga não ocorreu pico, as curvas decaem sistematicamente, apresentando cargas máximas de 32,39 tf e 29,18 tf nas células M1 e M2 respectivamente, uma diferença de 11,00 % entre as leituras.

No intuito de estabelecer um critério de segurança para estimativa dos esforços transferidos aos montantes, apresenta-se também na Figura 85 a envoltória das forças para um coeficiente de transferência de 0,35; ou seja, correspondente a 35 % da capacidade plena do silo. A carga de trabalho de cada montante é obtida aplicando-se o coeficiente 0,35 à carga máxima de 4589,21 tf, cujo resultado é então dividido pelo número de

montantes (40), resultando 40,16 tf. Este valor comparado à leitura registrada na célula M1 (39,80 tf) representa uma diferença de apenas 0,90 %.

Fank et al. (2015) mediram experimentalmente as cargas transferidas às fundações pelos montantes de um silo em verdadeira grandeza durante o carregamento de grãos de milho e, a partir dos resultados, pode-se destacar um coeficiente de transferência médio de 0,30 de 44% do silo, a partir do qual ocorreu um incremento na taxa de transferência atingindo valores equivalentes a 51% da carga total do silo.

As forças de atrito teóricas por unidade de perímetro, obtidas pela aplicação das normas, são mostradas na Figura 86 para a fase carregamento e na Figura 87 para a fase descarregamento.

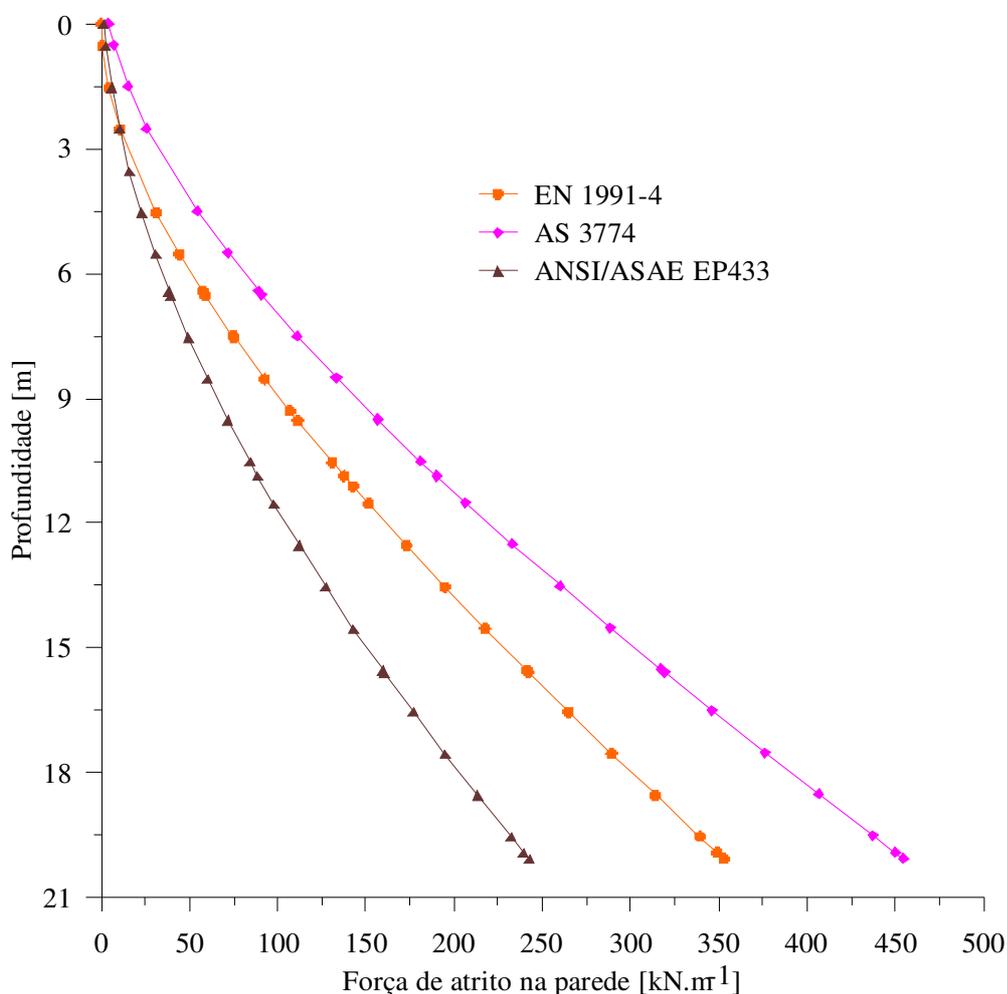


Figura 86. Variação da força de atrito na parede com a profundidade no carregamento.

Na fase de carregamento nota-se acentuada divergência entre as diferentes normas para os valores das forças de atrito, com valores maiores para a norma australiana e

menores para a norma americana. Todos os três códigos normativos baseiam-se na formulação de Janssen para cálculo das pressões horizontais e verticais e mesmo critério de transferência dos esforços para as paredes, mas diferenciam-se nos valores do coeficiente K, conduzindo, portanto, às divergências observadas.

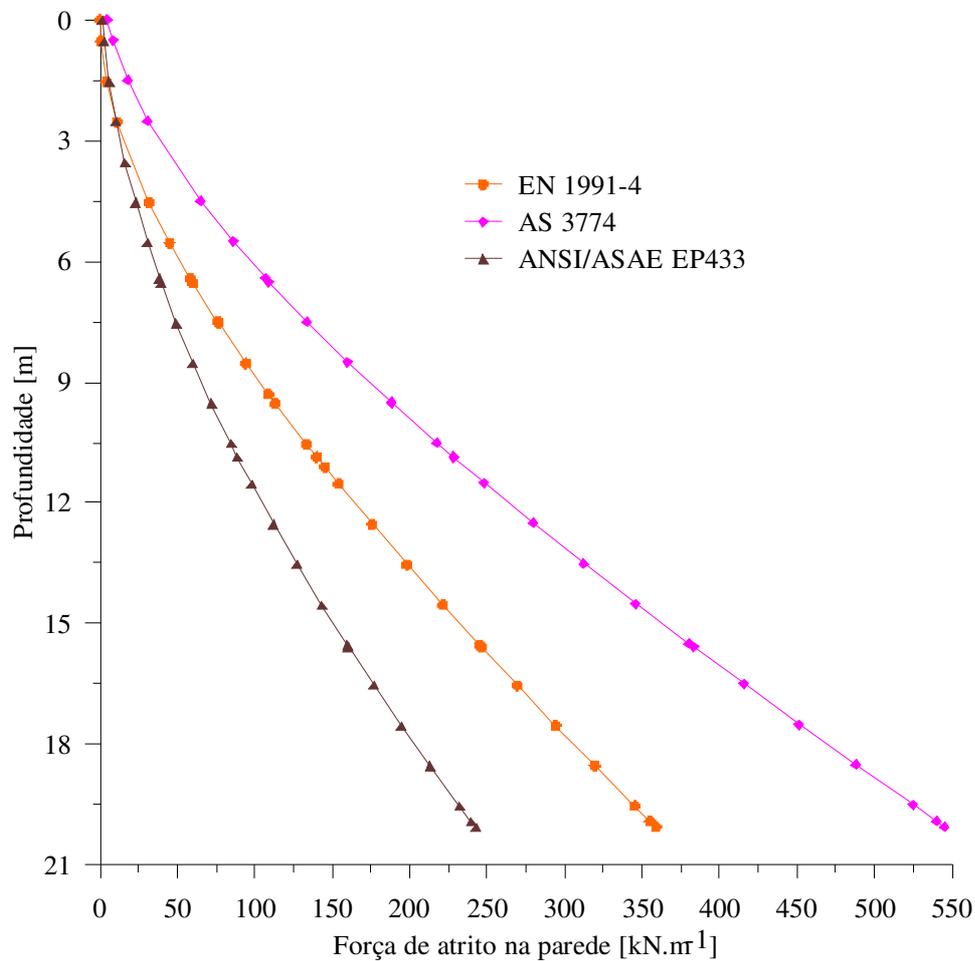


Figura 87. Variação da força de atrito na parede com a profundidade no descarregamento.

Na fase descarregamento ocorreu ligeiro incremento de 1,68 % na força calculada pela norma europeia e de 19,96 % pela norma australiana; conforme já discutido, a norma americana não aplica coeficiente de sobrepessão para o tipo de fluxo desta análise.

De modo a comparar os dados teóricos aos experimentais, é necessário converter a carga distribuída para força de atrito pontual no montante. O procedimento para tal consiste em tomar o produto da carga distribuída máxima pelo perímetro do silo e dividi-lo pelo número de montantes (40), cujos resultados são apresentados na Tabela 43. Um procedimento alternativo que conduz aos mesmos resultados é fazer o produto da carga

distribuída pelo arco de influência de cada montante, o qual no silo em análise é de 1,45 m. Este procedimento é mais adequado por ser generalizado, podendo ser aplicado mesmo em situações com diferentes espaçamentos entre os montantes.

Tabela 43. Força pontual aplicada nos montantes

Fase	Força teórica [tf]			Força experimental [tf]	
	EN 1991-4	AS 3774	EP433	M1	M2
Carga	51,06	65,76	35,10	39,80	35,34
Descarga	51,92	78,91	35,10	32,39	29,18

As normas europeia e australiana superestimam as forças de atrito, quantificadas em 28,29 % e 65,23 % respectivamente, em relação ao valor máximo experimental, no carregamento. Já a Norma americana subestima o máximo valor experimental em 11,81%.

Na descarga a norma australiana majora acentuadamente a força de atrito, em 143,62 %, enquanto as normas europeia e americana superestimam a força nos montantes em 60,30 % e 8,34 %, respectivamente.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho implantou-se uma instrumentação *in situ* para mensurar os principais tipos de esforços causados pelo armazenamento de grãos de milho, cobrindo tanto as condições estáticas quanto as condições dinâmicas. Deste modo foram quantificadas as pressões verticais atuantes na laje de fundo, as pressões horizontais e de atrito atuantes nas paredes, bem como as cargas transferidas pelos montantes para as fundações do silo. Tais esforços foram também calculados conforme as prescrições das normas EN 1991-4, AS 3774 e ANSI/ASAE EP433.

A norma EN 1991-4 superestimou as pressões verticais no silo enquanto a norma ANSI/ASAE EP433 as subestimou, sendo que ambas não preconizam efeito dinâmico devido ao descarregamento, o que também foi constatado pela instrumentação. Os resultados experimentais mostraram uma distribuição radial das pressões atuantes no fundo do silo, em conformidade ao procedimento alternativo da AS 3774 para o carregamento; para o descarregamento o código prescreve aplicação de coeficiente de sobrepressão, o que superestimou os valores experimentais.

Os valores das pressões horizontais teóricas das normas EN 1991-4 e AS 3774 são muito próximos na fase de carregamento e superiores aos valores da norma ANSI/ASAE EP433. Na descarga, as pressões do código australiano são as mais elevadas devido ao maior coeficiente de sobrepressão. Os coeficientes de sobrepressão experimentais não foram constantes ao longo da profundidade, variando desde 1,02 até 1,42. Os coeficientes 1,025 e 1,27 preconizados pelas normas EN 1991-4 e AS 3774, respectivamente, encontram-se dentro desses limites.

O coeficiente  $K$  variou com o fluxo dos grãos tanto no enchimento quanto na descarga do silo, inclusive com mudança no estado de tensões para a condição passiva de Rankine no descarregamento, contrariando o pressuposto teórico de Janssen de  $K$  constante.

Em referência aos resultados experimentais, as normas ANSI/ASAE EP433, EN-1991-4 e AS 3774 majoram os valores das cargas transferidas aos montantes do silo em 8,34 %, 60,30 % e 143,62 %, respectivamente, mostrando a grande divergência entre essas prescrições normativas.

A instrumentação com duas células de carga localizadas sob os montantes permite avaliar o coeficiente de transferência das cargas para as fundações do silo. Adotou-se o critério de traçar uma curva envoltória aos dados experimentais testando coeficientes

arbitrários, até se obter aquele que atendesse simultaneamente aos requisitos de segurança e economia; o coeficiente 0,35 mostrou ser o mais adequado.

A instrumentação limitou-se à localização das células em um quadrante do silo, assim possíveis ocorrências de assimetria dos esforços somente puderam ser inferidas, mas não observadas *in loco*. As células utilizadas para leitura das pressões horizontais não mostraram adequada sensibilidade para baixos valores de carga dos grãos.

Registros de possíveis efeitos devidos a variações térmicas, vibrações provocadas por cargas de vento e tráfego de caminhões, e a distribuição de maior número de instrumentos ao longo da altura da parede e no fundo do silo, são sugeridos para futuras pesquisas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Concrete Institute (ACI). Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials. Revised. ACI 313.EUA, 1991. p. 313-377. Detroit.
- American Society for Testing and Materials – ASTM D6128-06. (2006). “Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell.” ASTM International, West Conshohocken, PA.
- American Society of Agricultural Engineers (ASAE). (2002). “Loads exerted by free-flowing grain on bins.” ANSI/ASAE EP433 DEC 1988 (R2001), St. Joseph, MI.
- Andrade Junior, L. J. de e Calil Junior, C. A ação do vento em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, v. 9, n.41, p. 129-155, 2007.
- Aoki, R. Stresses of powders and granular materials in bins and hoppers. *Theory and Applied Mechanics*, v. 26, p. 9-24, 1978.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Solo Análise granulométrica. ABNT, Rio de Janeiro, 2004. 13 p.
- ASTM: D6128-06. Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell. American Society for Testing and Materials, 2011.
- Australian Standard. AS 3774: Loads on bulks containers. 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, 1995.
- Ayuga, F.; Guaita, M.; Aguado, P.; Couto, A. Discharge and the eccentricity of the hopper influence on the silo wall pressures, *Journal of Engineering Mechanics*, v.127, p.1067–1074, 2001.
- Ayuga, F.; Aguado, P.; Gallego, E.; Ramirez, A. New Steps towards the knowledge of silos behaviours. *International Agrophysics*, v.19, p.7-17, 2005.
- Ayuga, F.; Aguado, P.; Gallego, E.; Ramírez, A. Experimental tests to validate numerical models in silos design. ASABE Paper No. 064002. St. Joseph, Mich.: ASABE. 2006.
- Ayuga F. Some unresolved problems in the design of steel cylindrical silos. In: Chen JF, Ooi JY, Teng JG, editors. *Structures and granular solids. From scientific principles to engineering applications*. London: Taylor e Francis Group, p.123-133, 2008.

- Balevicius, R., Sielamowicz, I., Mroz, Z., Kac̆ianauskas, R. Investigation of wall stress and outflow rate in a flat-bottomed bin: a comparison of the DEM model results with the experimental measurements. *Powder Technology*, v.214, p.322–336, 2011.
- Batista, C. S. Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulados em silos verticais. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande - PB, 2009, 99 p.
- Benink, E.J. Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes. 1989. 162p. Thesis - Universiteit Twente, Netherlands, 1989.
- Calil, C. J. Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais. 1990. 198 p. Tese de Livre Docência, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 1990.
- Calil, C. J.; Nascimento, J.W.B. Ações em silos pelo método dos estados limites: proposta de norma brasileira. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*. v.16, n. 4, p.110- 117, 1997.
- Calil Júnior, C.; Cheung, A. B. Silos: pressões, fluxo, recomendações para projetos e exemplos de cálculo. Editora Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos, SP, 2007, p.232.
- Calil Junior., C. ; Palma, G. ; Cheung, A. B. Failure of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns and repair methods using a sensitivity analysis. *Bulk Solids Handling, Engineering Failure Analysis*, v. 18, 2011.
- Carson, J.; Craig, D. Silo design codes: Their limits and inconsistencies. *Procedia Engineering*, v.102, p.647 – 656, 2015.
- Chen, J.F., et al., Correlation between the flow pattern and wall pressures in a full scale experimental silo. *Engineering Structures*, vol. 29, p. 2308-2320, 2007.
- Cheung, A. B. Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos. São Carlos: USP, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007, 305 p.
- Cheung, A. B.; Calil Júnior, C. Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. São Carlos: EESC-USP. 2007. 232 p.
- Cheung, A. B.; Calil Júnior, C. Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, v. 11, n. 48, p. 1-22, 2009.
- Cheung, A. B.; Calil Junior, C.; Bertocini, S. R.. *Investigação Estrutural de Silos Metálicos e de Concreto no Brasil*. Compat 2015. Lisboa, 2015.

- Coetzee, C.J., Els, D.N.J. Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling. *Computers and electronics in Agriculture*, v. 65, p. 198–212, 2009.
- Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de grãos - Safra 2016/17 - Nono levantamento, Brasília, v. 4, p. 1-161, 2017.
- CONSILOS. Catálogo. Disponível em <http://www.consilos.com.br/armazenagem/catalogo>. Acesso em 10/08/2016.
- Costa, C. A. Propriedades físicas, mecânicas, e de fluxo de produtos agroindustriais. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. UFCG. Campina Grande. 2013. 120 p.
- Costa, C. A. da; Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B. do; Diniz, M. J.; Silva, V. R. da. Propriedades mecânicas e de fluxo de produtos agroindustriais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, p.774–780, Campina Grande, PB, 2014.
- Couto, A.; Ruiz, A.; Aguado, P. J. Design and instrumentation of a mid-size test station for measuring static and dynamic pressures in silos under different conditions – Part I: Description. *Computers and Electronics in Agriculture*. v. 85. p.164–173, 2012.
- Couto, A.; Ruiz, A.; Aguado, P.J. Experimental study of the pressures exerted by wheat stored in slender cylindrical silos, varying the flow rate of material during discharge. Comparison with Eurocode 1 part 4. *Powder Technol.* v.237, p.450–467, 2013a.
- Couto A.; Ruiz, A. Herraez, L.; Moran, J. Aguado, P.J. Measuring pressures in a slender cylindrical silo for storing maize. Filling, static state and discharge with different material flow rates and comparison with Eurocode 1 part 4. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 96 p. 40–56, 2013b.
- Deutsche Norm – DIN 1055-6: basis of design and actions on structures – Part 6: design loads for buildings and loads in silos. Belin, Verlaz, 2005.
- Ding, S.; Rotter, J.M.; Ooi, J.Y.; Enstad, G. Development of normal pressure and frictional traction along the walls of a steep conical hopper during filling. *Thin-Walled Structures*, v. 49, p.1246–1250, 2011.
- Dogangun, A.; Karaca, Z.; Durmus, A.; Sezen, H. Cause of damage and failures in silo structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities New York*, v. 23, p. 65–71, 2009.
- EN 1991-4: EUROCODE 1. Actions on structures - Part 4: Silos and tanks. European Committee for Normalisation. Bruxelles, 2006, 108 p.

- 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 (Online)*, v. 19, p. 887-891, 2015.
- Freitas, E. G. A.; Calil Junir, C. Estudo teórico experimental das pressões em silos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, v. 7, n.24, p. 1-34, 2005.
- Gallego, E. Numerical simulation of loads exerted by stored materials in silos with non-elastic material (PhD thesis). Technical University of Madrid. 2006.
- Gallego, E.; Rombach, G. A.; Neumann, F.; Ayuga, F. Simulations of granular flow in silos with different finite element programs: ANSYS vs SILO. *2010 American Society of Agricultural and Biological Engineers*. v.53,p.819-829, 2010.
- Gallego, E.; González-Montellano, C.; Ramírez, A.; Ayuga, F. A simplified analytical procedure for assessing the worst patch load location on circular steel silos with corrugated walls, *Engineering Structures*, v. 33, p. 1940-1954, 2011.
- Gallego, E.; Ruiz, A.; Aguado, P. J. Simulation of silo filling and discharge using ANSYS and comparison with experimental data. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.118, p.281-289, 2015.
- Garbaza, I. E. Programa computacional para cálculo de pressões em silos verticais de acordo com a norma australiana. *Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras - UFLA, Lavras - MG*, 2011.
- Gomes, F. C.; Calil Júnior, C. Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, v. 7, n. 24, p. 35-63, 2005.
- Gomes, F. C.; Calil Junior, C. .Theoretical and experimental study of loads in horizontal silos. *Bulk Solids Handling*, v. 12, p. 145-156, 2009.
- Gomes, F. C.; Deckers, H. P. F. Evaluation of aci-313:1997 standard implementation in dimensioning of multi-celled elevated concrete-reinforced silos for coffee. *Bulk Solids Handling*, v. 15, p. 227-240, 2010.
- González-Montellano, C.; Ramírez-Gomez, Á.; Gallego, E.; Ayuga, F. Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silos. *Chemical Engineering Science*, v.66, p.5116-5126, 2011.
- Guaita, M.; Couto, A.; Ayuga, F. Numerical simulation of wall pressure during discharge of granular material from cylindrical silos with eccentric hoppers. *Biosystems Engineering*, v. 85, n. 1, p. 101–109, 2003.

- Hibbeler, R.C. Resistência dos materiais. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.
- International Standart.ISO – 11697. Bases for design of structures: Loads due to bulk materials. 1997.
- Instituto Argentino de Racionalizacion de Materiales. IRAM 8015:1977, Buenos Aires, 1977.
- Jaky, J. Pressure in silos. In: Proceedings of 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1. p. 103–107, 1948.
- Janssen, H. A. Experiments on grain pressures in silos. Verein Deutscher Ingenieure, Zeitschrift. Vol. 39, pp. 1045-1049, Aug. 31, 1895.
- Jenike, A. W. Storage and flow of solids.Bulletin 123.Utah Engineering Experiment Station.University of Utah.Salt Lake City. Utah. Estados Unidos. 197p, 1964.
- Juliano, P.; Muhunthan, B.; Cánovas, G. V. B. Flow and shear descriptors of preconsolidated food powders.Journal of Food Engineering, v.72, p.157-166, 2006.
- Kibar, H.; Öztürk, T.; Esen, B.The effect of moisture content on physical and mechanical properties of rice (*Oryza sativa* L.)Spanish Journal of Agricultural Research , vol.3, p. 741-749, 2010.
- Lobato, J. C. M. Caracterização das propriedades de fluxo da lama vermelha para fins de dimensionamento de silos – Aplicação para tremonhas cônicas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém – PA, 2013. p.110.
- Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B. do; Silva, V. R. da; Lopes, F. F. M. Propriedade de fluxo e característica de escoabilidade de rações avícolas para dimensionamento de silos. Revista Ciência e Agrotecnologia, v.31, p.851-859, 2007.
- Lopes Neto, J. P. Análise teórico-experimental das forças verticais e de atrito em silos cilíndricos. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande – PB, 2009, p.116.
- Lopes Neto, J. P.; Silva, V. R. da; Nascimento, J. W. B. do. Propriedades de fluxo de produtos pulverulentos alimentícios. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, p.639–644, 2009a.
- Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B. do; Silva, V. R. da. Efeito do tempo de armazenagem de rações avícolas no dimensionamento de silos. Engenharia Agrícola, v.29, p.518-527, 2009b.

- Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B. do; Lopes, F. de M. Modelos de previsão do fluxo e vazão de descarga de produtos agrícolas. *Revista Educação Agrícola Superiores*, v.27, p.54-58, 2012.
- Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B. do. Características de fluxo e projeto de tremonhas cônicas em silos verticais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.17, n.3, p.339–345, 2013.
- Lopes Neto, J. P. ; Nascimento, J. W. B. ; Silva, Rafael C. ; Costa, C. A. . Powder flow criteria for design of vertical silo walls. *Engenharia Agrícola (Impresso)* , v. 33, p. 453-462, 2013a.
- Lopes Neto, J. P. ; Nascimento, J. W. B. ; Montross, M. D. . Horizontal pressures in cylindrical metal silos and comparison with different international standards. *Engenharia Agrícola (Impresso)* , v. 33, p. 601-611, 2013b.
- Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B. do; Fank, M. Z. Forças verticais e de atrito em silos cilíndricos com fundo plano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*.v.18, n.6, p.652–657, 2014a.
- Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B. do; Silva, R. C. Forças de atrito em silos verticais de paredes lisas em diferentes relações altura/diâmetro. *Agríc. Jaboticabal*, v.34, p.8-16, 2014b.
- Madrona, F. S. Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- Madrona, F. S.; Calil Junior, 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.
- Martinez, M. A.; Alfaro, I.; Doblare, M. Simulation of axisymmetric discharging in metallic silos. Analysis of the induced pressure distribution and comparison with difference standards. *Engineering Structures*. Zaragoza, v. 24, p.1561-1574, 2002.
- Medeiros, I. F. de. Características de fluxo e vazão de descarga em silos verticais. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. UFCCG. Campina Grande. 2012. 80 p.
- Milani, A. P. Determinação das propriedades de produtos armazenados para o projeto de pressões e fluxo em silos. São Carlos: USP, 1993. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1993.

- Moya, M.; Ayuga F.; Guaita M.; Aguado P.J. Mechanical properties of granular agricultural materials. *Trans. ASAE*, v.45, p.1569-1577, 2002.
- Moya M.; Guaita M.; Aguado P.J.; Ayuga F. Mechanical properties of granular agricultural materials. Part 2. *Trans. ASABE*, v.49, p.479-489, 2006.
- Moya M.; Aguado P.J.; Ayuga F. Mechanical properties of some granular agricultural materials used in silo design. *Institute of Agrophysics*, v.27, p.181-193, 2013.
- Nascimento, F. C.; Calil Junior, C. A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: o parâmetro K. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, v. 11, n. 52, p. 17-37, 2009.
- Nascimento, W. B. do, Lopes neto, J. P.; Montross, M. D. Horizontal pressures in cylindrical metal silos and comparison with diferente international standarts. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v.33, p.601-611, 2013.
- Nedderman, R. M. *Statics and Kinematics of Granular Materials*. Cambridge University Press. 1992. Cap 6. pp. 84-126.
- Palma, G.; Calil Júnior, C. Pressões e fluxo em silos esbeltos ( $H/D \geq 1,5$ ). *Caderno de Engenharia de Estruturas*, v.10, p.129-150, 2008.
- Ramírez, A.; Nielsen, J.; Ayuga, F. Pressure measurements in steel silos with eccentric hoppers. *Powder Technology*, v.201, p.7-20, 2010a.
- Ramirez A.; Moya M.; Ayuga F. Determination of the mechanical properties of powdered agricultural products and sugar. *Inter Science*, v.26, p.220-230, 2010b.
- Ramírez, A.; Nielsen, J. Ayuga, F. On the use of plate-type normal pressure cells in silos. Part 2: validation for pressure measurements. *Comput.Electron.Agr.* V.71,p.64-10, 2010c.
- Ramírez, A.; Gallego, E.; Fuentes, J. M.; González, C.; Porras, C. J.; Ayuga, F. Full-scale tests to measure stresses and vertical displacements in an 18.34 m-diameter agricultural steel silo roof. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 106, p. 56–65, 2014.
- Rankine, W. J. M.; Koenen, M. Calculation of side and floor pressure in silo walls. *Zentralblatt der bauverwalyung*, p. 446-449, 1895.
- Reis, S. G. dos. Determinação das ações atuantes nos silos através de redes neurais artificiais. *Dissertação (mestrado)*, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2011, 77p.
- Ribeiro, D. M.; Corrêa, P. C.; Furtado, B. F.; Goneli, A. L. D.; Resende, O. Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 493-500, 2007.

- Roberts, A. W. 100 years of Janssen. *Storage. Bulk Solids Handling*, v.15, n.3, p.369-383, 1995.
- Rotter, J.M. 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. P. 85-104, 2001.
- 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. A Study of Buckling in Steel Silos under Eccentric Discharge Flows of Stored Solids. *Jrnl. of Eng. Mech., ASCE*, v.136, p. 769-776, 2010.
- Sadowski A.J.; Rotter J.M. Buckling of very slender metal silos under eccentric discharge. *Engineering Structures*, v.33, p.1187-1194, 2011a.
- Sadowski, A.J., Rotter, J.M. Steel silos with different aspect ratios: I— behaviour under concentric discharge. *Journal of Constructional Steel Research*.v.67, p. 1537–1544, 2011b.
- Sadowski, A. J.; Rotter, J. M. Steel silos with different aspect ratios: II— behaviour under eccentric discharge, *Journal of Constructional Steel Research*, v. 67, p. 1545-1553, 2011c.
- Sadowski, A. J.; Michael Rotter, J. Exploration of novel geometric imperfection forms in buckling failures of thin-walled metal silos under eccentric discharge. *International Journal of Solids and Structures*, v.50, p.781–794, 2013.
- Scalabrin, L. A. Dimensionamento de silos metálicos para armazenagem de grãos. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFRGS, Porto Alegre, 2008. p.158.*
- Seville, J., Tuzun, U., Clift, R. *Processing of Particulate Solids*. Chapman e Hall. 1997. 383 p.
- Sielamowicz, I., Czech, M., Kowalewski, T.A. Empirical description of granular flow inside a model silo with vertical walls. *Biosystems Engineering*, v.108, p.334–34. 2011.
- Silva, F. S. da; Corrêa, P. C.; Calil Júnior, C.; Gomes, F. C. Ângulo de repouso, atrito interno e efetivo dos grãos de café com pergaminho. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.8, p.17-23, Campina Grande, 2006.
- Silva Neto, I. T. Estado da Arte de Silos Verticais de Madeira. *Dissertação de Mestrado em Engenharia das Edificações e Ambiental. PPGEEA. UFMT. 2013. 163 p.*

- Silva, F. S.; Corrêa, P. C. Estrutura, composição e propriedades dos grãos. In: Silva, J. S.. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. 2ª Edição. Editora Aprenda Fácil, Viçosa – MG, p.19-36. 2008.
- Silva, F. S. da.; Côrrea, P. C.; Calil Junior, C.; Gomes, F. C. Análise dos coeficientes de atrito estático e dinâmico de grãos de café com pergaminho, determinados em diferentes equipamentos, teores de água e materiais de parede. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.13, n.2, p.143-156, 2011.
- Silva, M. C. A. T. da e Carvalho, L. da S. Ferramenta computacional para dimensionamento de silo unicelular de concreto armado – parte I: silo de seção circular. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.35, n.2, p.378-389, 2015.
- SNBATI. Reglas para proyecto y calculo de silos de hormigón. Sindicato Nacional del Hormigón Armado y Técnicas Industrializadas. França: 1975.
- Slominski, C.; Niedostatkiewicz, M.; Tejchman, J. Application of particle image velocimetry (PIV) for deformation measurement during granular silo flow. Powder Technology, v.173, p.1-18, 2007.
- Vidal, P.; Guaita, M.; Ayuga, F. Discharge from cylindrical slender steel silos: Finite element simulation and comparison with Eurocode 1. Trans. ASAE, v.48, p. 2315-2321, 2005a.
- Vidal, P.; Guaita, M.; Ayuga, F. Analysis of discharge pressures in cylindrical slender silos with a flat bottom or with a hopper: Comparison with Eurocode 1. Biosystems Eng. v.91, p. 335-348, 2005b.
- Vidal, P.; Couto, A.; Ayuga, F.; Guaita, M. Influence of hopper eccentricity on discharge of cylindrical mass flow silos with rigid walls. J. Eng. Mech.v.132, p.1026–1033, 2006a.
- 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, p.1881–1895, 2006b.
- Vidal, P.; Gallego, E.; Guaita, M.; Ayuga, F. Finite element analysis under different boundary conditions of the filling cylindrical steel silos having an eccentric hopper, Journal of Constructional Steel Research, v. 64, p. 480–492, 2008.
- Vieira, L. H. de S. Estudo teórico e experimental das pressões em tremonhas cônicas e piramidais para silos metálicos esbeltos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2009, 110 p.

- Walker, D. M. An approximate theory for pressures and arching in hoppers. *Chemical Engineering Science*, v.21, p.975-997, 1966. Pergamon Press. Oxford.
- Walters, J. K. A theoretical analysis of stresses in silos with vertical walls. *Chemical Engineering Science*, V. 28, pp. 13 – 21, 1973.
- Zheng, Q. J. Yu, A.B. Yu. Finite element investigation of the flow and stress patterns in conical hopper during discharge. *Chemical Engineering Science*, v.129, p.49–57, 2015.
- Zhu, Y. Z.; Meng, S. P.; Sun, W. W. Lateral Pressure in Squat Silos under Eccentric Discharge. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, v.6, p.448-456, 2012.