



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

KAROLINE CARVALHO DORNELAS

**ANÁLISES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DAS PRESSÕES EM
SILOS VERTICAIS DE FUNDO PLANO COM DIFERENTES
RELAÇÕES ALTURA/DIÂMETRO (H/D)**

Campina Grande - PB

Dezembro - 2022

KAROLINE CARVALHO DORNELAS

**ANÁLISES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DAS PRESSÕES EM
SILOS VERTICAIS DE FUNDO PLANO COM DIFERENTES
RELAÇÕES ALTURA/DIÂMETRO (H/D)**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, como parte das exigências para a obtenção do Título de Doutora em Engenharia Agrícola, na Área de Construções Rurais e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento

Campina Grande - PB

Dezembro - 2022

D713a Dornelas, Karoline Carvalho.

Análises numérica e experimental das pressões em silos verticais de fundo plano com diferentes relações altura/diâmetro (H/D) / Karoline Carvalho Dornelas. – Campina Grande, 2022.
188 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.

"Orientação: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento".
Referências.

1. Silos. 2. Instrumentação. 3. Carregamento.
5. Descarregamento. 6. Produto de Fluxo Livre. 7. Silo Baixo.
8. Silo Esbelto. 9. Método dos Elementos Finitos I. Nascimento, José Wallace Barbosa do. II. Título.

CDU 631.24 (043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRICOLA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

KAROLINE CARVALHO
DORNELAS

ANÁLISES NUMÉRICA E
EXPERIMENTAL DAS PRESSÕES
EM SILOS VERTICAIS DE FUNDO
PLANO COM DIFERENTES
RELAÇÕES ALTURA/DIÂMETRO
(H/D)

Tese apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola como pré-requisito para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia Agrícola.

Aprovada em: 09/12/2022

Jose Wallace Barbosa do Nascimento - Orientador(a) - PPGEA/CTRN/UFCG
José Pinheiro Lopes Neto - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFCG
Josivanda Palmeira Gomes - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFCG
Carlito Calil Junior - Examinador(a) Externo(a) - USP
Francisco Carlos Gomes - Examinador(a) Externo(a) - UFLA
Andrés Batista Cheung - Examinador(a) Externo(a) - UFMS



Documento assinado eletronicamente por **JOSIVANDA PALMEIRA GOMES, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/12/2022, às 10:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andrés Batista Cheung, Usuário Externo**, em 12/12/2022, às 14:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE PINHEIRO LOPES NETO, COORDENADOR(A) ADMINISTRATIVO(A)**, em 13/12/2022, às 09:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE WALLACE BARBOSA DO NASCIMENTO, PROFESSOR 3 GRAU**, em 14/12/2022, às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Carlos Gomes, Usuário Externo**, em 15/12/2022, às 18:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **CARLITO CALIL JUNIOR, Usuário Externo**, em 16/12/2022, às 06:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **2978837** e o código CRC **D389832D**.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRICOLA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA DE DEFESA DE TESE PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA AGRÍCOLA, REALIZADA EM 09 DE DEZEMBRO DE 2022.

CANDIDATO(A): **KAROLINE CARVALHO DORNELAS**

COMISSÃO EXAMINADORA: Jose Wallace Barbosa do Nascimento - Orientador(a) - PPGEA/CTRN/UFCG; José Pinheiro Lopes Neto - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFCG; Josivanda Palmeira Gomes - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFCG; Carlito Calil Junior - Examinador(a) Externo(a) - USP; Francisco Carlos Gomes - Examinador(a) Externo(a) - UFLA; e Andrés Batista Cheung - Examinador(a) Externo(a) - UFMS (PORTARIA PPGEA - DT 25/2022)

TÍTULO: ANÁLISES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DAS PRESSÕES EM SILOS VERTICAIS DE FUNDO PLANO COM DIFERENTES RELAÇÕES ALTURA/DIÂMETRO (H/D)

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Construções Rurais e Ambiência

LOCAL: Laboratório de Construções Rurais e Ambiência (Lacra/UFCG)

HORÁRIO: 8h30

Em sessão pública, após exposição de cerca de 50 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Tese, sendo **APROVADO(A)**, com modificações no texto, de acordo com as exigências da Comissão Examinadora, que deverão ser cumpridas no prazo máximo de 30 (trinta) dias. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, assinada pelo(a) coordenador(a) do PPGEA e demais membros da Comissão Examinadora presentes. Campina Grande/PB, 09 de dezembro de 2022.

Josivanda Palmeira Gomes - Coordenadora do PPGEA

Jose Wallace Barbosa do Nascimento - Orientador(a) - PPGEA/CTRN/UFCG
 José Pinheiro Lopes Neto - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFCG
 Josivanda Palmeira Gomes - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFCG
 Carlito Calil Junior - Examinador(a) Externo(a) - USP
 Francisco Carlos Gomes - Examinador(a) Externo(a) - UFLA
 Andrés Batista Cheung - Examinador(a) Externo(a) - UFMS
 Karoline Carvalho Dornelas - Discente

1. Segue a presente Ata de Defesa de Tese do(a) candidato(a) **KAROLINE CARVALHO DORNELAS**, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

DEZEMBRO DE 2022

 Documento assinado eletronicamente por **JOSIVANDA PALMEIRA GOMES, COORDENADOR(A)**, em 12/12/2022, às 10:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

 Documento assinado eletronicamente por **Andrés Batista Cheung, Usuário Externo**, em 12/12/2022, às 14:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

 Documento assinado eletronicamente por **JOSE PINHEIRO LOPES NETO, COORDENADOR(A) ADMINISTRATIVO(A)**, em 13/12/2022, às 09:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

 Documento assinado eletronicamente por **JOSE WALLACE BARBOSA DO NASCIMENTO, PROFESSOR 3 GRAU**, em 14/12/2022, às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

 Documento assinado eletronicamente por **Francisco Carlos Gomes, Usuário Externo**, em 15/12/2022, às 18:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

 Documento assinado eletronicamente por **CARLITO CALIL JUNIOR, Usuário Externo**, em 16/12/2022, às 06:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

 Documento assinado eletronicamente por **Karoline Carvalho Dornelas, Usuário Externo**, em 16/12/2022, às 19:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **2978686** e o código CRC **7E561AB6**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus *pais*:

Base, essência, abrigo e amor!

Dedico também a quem colaborou diretamente comigo:

Meu orientador, professor e amigo, *Dr. José Wallace*

Barbosa do Nascimento, sem o qual eu não teria

concluído este projeto.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, **Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento**, que contribuiu decisivamente para que esta tese pudesse ser concluída. Agradeço cada minuto dedicado à orientação. Muito obrigada por toda paciência, incentivo, conselhos e acolhimento. Com seu carinho, apoio e dedicação, fui impulsionada nos momentos mais conturbados dessa trajetória, removendo as pedras do caminho. Aprendi muito sobre a vida, dentro e fora da sala de aula. Minha maior fonte de inspiração profissional, meu professor, orientador e grande amigo!

Ao **Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes**, por, literalmente possibilitar esse trabalho, diante da disponibilização da estação experimental, principal equipamento utilizado na pesquisa. Obrigada pelo acolhimento, ajuda e ensinamentos nessa jornada. Ao **Prof. Dr. Andrés Batista Cheung** pela parceria, ensinamentos e contribuições. Agradeço imensamente por todo material compartilhado. Ao **Prof. Dr. Carlito Calil Junior** por ser a base teórica de minha tese. Suas contribuições foram essenciais nessa trajetória acadêmica.

Aos **membros da banca examinadora**, por terem dedicado parte do seu tempo para participar da avaliação deste trabalho.

Aos meus pais, **Maurilio Turibio Dornelas e Conceição Aparecida Carvalho Dornelas**, que contribuíram ao longo do doutorado com força, apoio, motivação e muito amor, sendo compreensivos com os momentos de ausência. Vocês abdicaram de muitos sonhos para que o meu pudesse ser realizado. O exemplo e o apoio de vocês me fizeram ser quem sou hoje! Espero que possa ter lhes retribuído e que todo sacrifício tenha valido a pena.

À minha avó, **Dona Lola**, uma das minhas maiores inspirações e incentivadora do meu crescimento pessoal. Obrigada por tudo e por tanto! Aos avós **Norvino, Pedro e Luzia**, “*In memoriam*”, pela existência de meus pais... Sem eles este trabalho e muitos dos meus sonhos não se realizariam.

À minha tia, **Maria Célia Carvalho Gimenez**, pelos conselhos, carinhos, cuidado e apoio sempre prestados nos momentos difíceis, que tanto me auxiliaram e incentivaram nesse período de estudos. Agradeço a paciência, amor incondicional e companheirismo! Você é minha segunda mãe.

Agradeço ao **Raimundo Calixto Martins Rodrigues** pela amizade que modificou tudo, injetando ânimo novo em minha existência. Obrigada por abrir as portas de sua casa e me receber gentilmente em seu lar. Graças ao convívio, descobri que a importância de alguém não é definida pelo tempo que ela permaneceu em nossas vidas, e sim pela forma como ela nos transformou. Não se trata de duração, e sim de sutileza. A linha tênue entre presença física e habilidade de tocar uma alma. E você tocou a minha. Obrigada por ser meu amigo, irmão, conselheiro, terapeuta e divã. Por ser minha segunda família, pelo acolhimento, cuidado, carinho e amor. Por partilhar comigo dificuldades

e vitórias. Conviver contigo foi um presente de Deus!

Ao **Dr. Rômulo Marçal Gandia**, agradecimento mais que especial, por ter me acompanhado e muito me auxiliado no experimento e, sobretudo, pelas orientações, colaborando para a realização deste trabalho. Unidos fizemos um ótimo trabalho. Minha eterna gratidão, ardido!

Aos membros da equipe de trabalho do Centro de Processamento e Pesquisa dos Produtos Armazenados da Universidade Federal de Lavras, **Estácio Antunes de Oliveira Júnior** e **Luiz Felipe Souza**, que contribuíram diretamente nessa tese, auxiliando no transporte do produto e preparação da estrutura. Agradeço com especial carinho!

Agradecimento especial as meninas que foram meu braço direito na determinação das propriedades físicas e de fluxo do milho, **Valneide Rodrigues da Silva** e **Yokiny Chanti Cordeiro Pessoa**. Muito obrigada pela colaboração e por estarem sempre prontas para ajudar!

Ao **Hygor Cesar Soares Rodrigues**, amigo e braço direito, por sua grande contribuição ao longo de todas as atividades, fornecendo suporte no desenvolvimento deste trabalho. Obrigada por ter colocado seus amplos conhecimentos ao dispor desta tese. Nossa parceria não encerra aqui, é só o começo da jornada! Avante, siliano!

Ao **Gypson Dutra Junqueira Ayres**, por todos os galhos quebrados ao longo da minha estadia em Campina Grande (não foram poucos), pela amizade construída ao longo desses anos e principalmente, por toda contribuição na parte gráfica dos artigos.

Ao **Airton Gonçalves de Oliveira**, que se tornou amigo e irmão, entre os tropeços e pedras no caminho que surgiram no decorrer do ingresso na pós-graduação. Obrigada por tudo e por tanto!

Aos amigos que fiz durante o curso, em particular aos pós-graduandos: **Raimundo Calixto Martins Rodrigues**, **Hygor Cesar Soares Rodrigues**, **Rafael Torres do Nascimento**, **Gypson Dutra Junqueira Ayres**, **Nágela Maria Henrique Mascarenhas**, **Airton Gonçalves de Oliveira**, **Vitória Régia do Nascimento Lima**, **Alicia Nayana dos Santos Lima de Brito**, **Valneide Rodrigues da Silva**, **Yokiny Chanti Cordeiro Pessoa**, **Daniele Ferreira de Melo**, **Mailson Gonçalves Gregório** e **Patricio Gomes Leite**. Família que a ciência me deu! As melhores amizades são aquelas marcadas pela simplicidade, e até, arrisco dizer, pelas dificuldades. Levarei vocês do lado esquerdo do peito.

Aos professores do Laboratório de Construções Rurais e Ambiente, **Dr. José Lopes Pinheiro Neto** e **Dr. Dermeval Araújo Furtado**, que contribuíram valiosamente na minha formação, no decorrer do doutorado com os ensinamentos adquiridos em sala.

À **Universidade Federal de Campina Grande** e ao **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola** pela oportunidade de realizar o curso de doutorado. Foram 4 anos de desenvolvimento pessoal e profissional.

Às amigas **Ana Paula Favretto Bussolaro, Camila Buck, Gabriella de Souza Machiavelli, Maria Louise Murilho Leal e Mariana Novaes Carvalho Guimarães**, que mesmo distantes se fizeram presentes nessa caminhada, sendo amigas, confidentes e irmãs. Sempre com as melhores palavras nas horas mais importantes da minha vida. Vocês são exemplos de amor, companheirismo e compreensão.

À minha amiga, irmã e confidente **Rejane Ramos**, que mesmo distante sempre esteve ao meu lado, me fortalecendo, torcendo e incentivando para a concretização dessa pesquisa, por meio de mensagens de apoio e carinho. Sua bravura e luta diárias me inspiram a ser alguém melhor. Te amo!

Ao meu irmão **Eltiene Soares**, graças a você pude perceber que ainda existem pessoas boas no mundo. Serei eternamente grata por todo incentivo, apoio, cuidado e carinho. Obrigada por aparecer em meu caminho e me ajudar a conquistar o sonho! Serei eternamente grata pela linda amizade que construímos. Te aguardo em Sinop!

Ao casal, **Maricelia Bezerra e Bezerra Soares**! Não tenho palavras para explicar meu carinho por vocês! Obrigada por me tirarem da rotina nos momentos que eu mais precisei e compreenderem a minha ausência nesses últimos meses.

À minha mãe paraibana, **Márcia Nascimento** e irmã de outras vidas, **Ana Luiza Nascimento**, por todo afeto, abraço, aconchego. O encantamento, a simpatia gratuita e a conexão imediata que sentimos ao lado de algumas pessoas nos fazem acreditar que nem tudo tem explicação lógica e a vida tem mais mistérios do que podemos supor ou entender. Riqueza na vida é ter com quem contar nos altos e baixos. Minha família da Paraíba!

Às Professoras **Dr.^a Roselene Maria Schneider, Dr.^a Adriana Garcia do Amaral, Dr.^a Ana Paula Silva Ton e Dr.^a Milene Carvalho Bongiovani**, referências fundamentais para a minha formação. Agradeço, sobretudo pela amizade, carinho, por serem em muitos momentos minhas inspirações e por acreditarem sempre na minha capacidade.

A **todos** que ao longo de toda minha trajetória puderam contribuir de alguma forma para a realização desta pesquisa.

A **Deus** por ser meu porto seguro e por ter me dado forças para persistir e conquistar meus objetivos. A Ele toda gratidão pelas bênçãos concedidas.

EPÍGRAFE

"Se pude enxergar mais longe, foi porque me apoiei em ombros de gigantes".

Isaac Newton.

"Nada pode ser considerado totalmente concluído, se não foi tentado de todos os modos possíveis melhorá-lo".

Phillip Sidney

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
CAPÍTULO I - CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA	19
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	20
2. OBJETIVOS.....	22
2.1 Objetivo Geral.....	22
2.2 Objetivos específicos.....	22
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	23
3.1 Silos: caracterização e importância.....	23
3.1.1 Classificação dos silos.....	24
3.1.2 Classificação dos silos quanto à esbeltez.....	24
3.1.3 Classificação dos silos quanto ao tipo de fundo.....	25
3.2 Propriedades dos produtos armazenados.....	28
3.3 Fluxo em silos.....	31
3.4. Ações em silos.....	36
3.4.1 Pressões em silos verticais.....	37
3.5 Teoria de Janssen (1895).....	39
3.6 Teoria de Jenike et al. (1973).....	43
3.7 Teoria de Rankine-Calil (2005).....	47
3.8 Medições das pressões em silos.....	49
3.9 Códigos Normativos para projeto de silos.....	49
3.9.1 <i>European Committee of Standardization - EN 1991-4 (2006)</i>	51
3.9.2 <i>American National Standards Institute - ANSI/ASAE S433.1 (2019)</i>	69
3.10 Método dos Elementos Finitos em silos.....	77
4. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	85
5. REFERÊNCIAS.....	86
CAPÍTULO II - PRESSÕES EM SILO METÁLICO BAIXO COM FUNDO PLANO ARMAZENANDO GRÃOS DE MILHO	96

Nomenclatura – <i>Símbolos</i>	97
RESUMO	98
ABSTRACT	98
1. Introdução	99
2. Material e métodos	102
2.1. <i>Descrição Geral da Instalação</i>	102
2.1.1. <i>Geometria do silo experimental</i>	103
2.1.2. <i>Instrumentação e sistema de aquisição de dados</i>	103
3. <i>Processamento de dados</i>	106
3.1. <i>Cálculos</i>	106
3.1.1. <i>Pressão horizontal na parede</i>	106
3.1.2. <i>Pressão de atrito na parede</i>	106
3.1.3. <i>Peso do produto armazenado</i>	107
3.1.4. <i>Definição dos coeficientes de sobrepressão</i>	107
3.2. <i>Propriedades do produto armazenado</i>	107
3.3. <i>Configuração dos testes</i>	108
4. Resultados e discussão	110
4.1. <i>Pressões horizontais na parede do silo</i>	110
4.2. <i>Pressões de atrito na parede do silo</i>	114
5. Conclusões	117
Declaração de conflito de interesses	118
Agradecimentos	118
Referências	118

CAPÍTULO III - ANÁLISE DE PRESSÕES DE GRÃOS DE MILHO EM SILOS CILÍNDRICOS METÁLICOS E COMPARAÇÃO COM DIFERENTES NORMAS INTERNACIONAIS

	125
Nomenclatura – <i>Símbolos</i>	126
RESUMO	127
ABSTRACT	127
1. Introdução	128
2. Material e métodos	129
2.1. <i>Estação Experimental</i>	129
2.2. <i>Medição das forças verticais e horizontais</i>	131

2.3.	<i>Processamento de dados - Cálculo das pressões e outros componentes.....</i>	132
2.4.	<i>Configurações dos testes.....</i>	133
2.5.	<i>Propriedades do produto armazenado.....</i>	135
2.6.	<i>Descrição das análises.....</i>	136
3.	Resultados e discussão.....	137
3.1.	<i>Pressões normais na parede do cilindro.....</i>	137
3.1.1.	<i>H/D igual a 2 (altura de 1.5 m).....</i>	137
3.1.2.	<i>H/D igual a 3 (altura de 2.0 m).....</i>	141
3.2.	<i>Pressões de atrito na parede do silo.....</i>	144
3.2.1.	<i>H/D igual a 2 (altura de 1.5 m).....</i>	144
3.2.2.	<i>H/D igual 3 (altura de 2.0 m).....</i>	146
3.3.	<i>Coefficiente de Sobrepressão (Cd).....</i>	149
3.3.1.	<i>H/D igual a 2 (altura de 1.5 m).....</i>	149
3.3.2.	<i>H/D igual 3 (altura de 2.0 m).....</i>	151
4.	Conclusões.....	152
	Declarações de crédito aos autores.....	153
	Declaração de conflitos de interesses.....	153
	Agradecimentos.....	153
	Referências.....	153

**CAPÍTULO IV – SIMULAÇÃO DE CARREGAMENTO E
DESCARREGAMENTO EM SILOS CILÍNDRICOS METÁLICOS USANDO O
MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E COMPARAÇÃO COM DADOS
EXPERIMENTAIS**

		160
	RESUMO.....	161
	ABSTRACT.....	161
1.	Introdução.....	162
2.	Material e métodos.....	165
2.1.	<i>Propriedades físicas e mecânicas do produto.....</i>	165
3.	Testes experimentais.....	165
3.1.	<i>Descrição da instalação Experimental.....</i>	165
3.2.	<i>Descrição dos testes.....</i>	167
4.	Análise numérica – Elementos Finitos.....	169
4.1.	<i>Geometrias dos silos.....</i>	169

4.2.	<i>Elementos usados e simulação de contato.....</i>	<i>170</i>
4.3.	<i>Cargas e restrições.....</i>	<i>171</i>
4.4.	<i>Modelo de material.....</i>	<i>172</i>
5.	Resultados e discussão.....	173
5.1.	<i>Pressões normais sobre a parede do silo – condição estática.....</i>	<i>173</i>
5.2.	<i>Pressões normais sobre a parede do silo – condição dinâmica.....</i>	<i>177</i>
6.	Conclusões.....	182
	Agradecimentos.....	182
	Referências.....	183

LISTA DE TABELAS

Capítulo I – CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

	Pág.
Tabela 1. Classificação geométrica dos silos em relação à esbeltez (H/D).....	25
Tabela 2. Classificação dos silos em classes de confiabilidade.....	54
Tabela 3. Valores limites das propriedades dos produtos para cálculo de pressões.....	55
Tabela 4. Valores do coeficiente C _b para cada classe de confiabilidade dos silos.	62
Tabela 5. Valores do coeficiente de atrito efetivo na tremonha.....	63
Tabela 6. Fatores de sobrepressão e propriedades do material armazenado.....	71
Tabela 7. Valores das propriedades mecânicas recomendado para diferentes produtos.....	81

Capítulo II – PRESSÕES EM SILO METÁLICO BAIXO COM FUNDO PLANO ARMAZENANDO GRÃOS DE MILHO

Tabela 1. Valores das constantes obtidas em cada anel do silo piloto.....	106
Tabela 2. Peso do produto.....	110

Capítulo III – ANÁLISE DE PRESSÕES DE GRÃOS DE MILHO EM SILOS CILÍNDRICOS METÁLICOS E COMPARAÇÃO COM DIFERENTES NORMAS INTERNACIONAIS

Tabela 1. Valores das constantes obtidas para cada anel do silo piloto.....	133
Tabela 2. Carga média para cada teste.....	135
Tabela 3. Variações das propriedades físicas e fluxo do milho (<i>Zea mays</i>).....	136
Tabela 4. Coeficientes de sobrepressão horizontal para o silo-piloto na configuração H/D igual a 2.....	151
Tabela 5. Coeficientes de sobrepressão horizontal para o silo-piloto na configuração H/D igual a 3.....	151

Capítulo IV – SIMULAÇÃO DE CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO EM SILOS CILÍNDRICOS METÁLICOS USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E COMPARAÇÃO COM DADOS EXPERIMENTAIS

Tabela 1. Propriedades do milho usadas na simulação EF.....	166
Tabela 2. Configuração das relações H/D avaliadas no silo piloto.....	168
Tabela 3. Valores das constantes dos anéis - silo piloto.....	169

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I – CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

	Pág.
Figura 1. Parâmetros geométricos silo vertical.....	25
Figura 2. Silos de fundo plano.....	26
Figura 3. Silos de fundo cônico (tremonha).....	26
Figura 4. Trajetos (a) axissimétrico, (b) planar e (c) excêntrico.....	26
Figura 5. Formas usuais das tremonhas.....	27
Figura 6. Formatos típicos de orifícios de descarga para silos.....	27
Figura 7. Célula de cisalhamento de Jenike.....	29
Figura 8. Tipos de fluxo em silos com descarga concêntrica.....	32
Figura 9. Tipos de fluxo em silos com descarga excêntrica.....	33
Figura 10. Efeitos da esbeltez no fluxo.....	33
Figura 11. Determinação do tipo de fluxo pela ISO 11697 (2012) para tremonha cônica.....	34
Figura 12. Determinação do tipo de fluxo pela ISO 11697 (2012) para tremonha em cunha.....	34
Figura 13. Determinação do tipo de fluxo pela EN 1991-4 (2006).....	35
Figura 14. Determinação do tipo de fluxo pela ANSI/ASAE EP433.1 (2019).....	35
Figura 15. Pressões atuantes nas paredes do silo nas fases de carregamento, armazenamento e descarga.....	37
Figura 16. Pressões geradas pelo produto armazenado.....	37
Figura 17. Pressões estática e dinâmica em silo.....	38
Figura 18. Forças atuantes em uma camada infinitesimal no produto armazenado.....	40
Figura 19. Pressões exercidas pelo produto em silos baixos de fundo plano, de acordo com a teoria de Rankine-Calil.....	47
Figura 20. Parâmetros geométricos do silo.....	53
Figura 21. Pressões em silos esbeltos <i>versus</i> medianamente esbeltos/baixos.....	56
Figura 22. Pressão estática simétrica no corpo do silo.....	58
Figura 23. Distribuição da pressão adicional em silos cilíndricos de paredes finas.....	60
Figura 24. Pressões na tremonha durante o carregamento do produto.....	65
Figura 25. Pressões na tremonha durante o descarregamento do produto.....	66
Figura 26. Distribuição de pressões nas tremonhas pelo método alternativo da Eurocode.....	67
Figura 27. Tipos de fluxo no interior de um silo.....	70
Figura 28. Dimensões do silo.....	73
Figura 29. Pressões sobre tremonha.....	75
Figura 30. Representação da dilatação nas linhas de deslizamento.....	80
Figura 31. Comparação das pressões normais sobre a parede do silo na condição estática (a) e dinâmica (b).....	82
Figura 32. Pressões horizontais ao longo da altura do silo.....	83
Figura 33. Pressões estáticas normais variando o coeficiente de atrito da parede e comparadas com Eurocode 1, part 4.....	84
Figura 34. Pressões estáticas normais variando o peso específico do produto armazenado e comparadas com Eurocode 1, part 4.....	84

Capítulo II – PRESSÕES EM SILO METÁLICO BAIXO COM FUNDO PLANO ARMAZENANDO GRÃOS DE MILHO

Figura 1.	Estação de teste em escala piloto.....	102
Figura 2.	Geometria do silo piloto e visão detalhada dos anéis.....	103
Figura 3.	Localização das células de medição no silo piloto: célula de carga do tipo viga na base do pilar.....	104
Figura 4.	Localização dos sensores no silo piloto: fundo plano e posicionamento das células de pressão tipo diafragma.....	105
Figura 5.	Localização dos sensores no silo piloto: células de carga de tração posicionadas nos anéis (vertical - atrito, horizontal - normal).....	105
Figura 6.	Configuração do silo com relação $(H/D) = 1$	108
Figura 7.	Descrição dos ensaios.....	109
Figura 8.	Pressões horizontais teóricas e experimentais de carregamento para o silo com relação H/D igual a 1 (produto: milho).....	111
Figura 9.	Pressões horizontais teóricas e experimentais de descarregamento para o silo com relação H/D igual a 1 (produto: milho).....	111
Figura 10.	Pressões de atrito teóricas e experimentais durante o carregamento para silo com relação H/D igual a 1 (produto: milho).....	115
Figura 11.	Pressões de atrito teóricas e experimentais durante o descarregamento para o silo com relação H/D igual a 1 (produto: milho).....	115

Capítulo III – ANÁLISE DE PRESSÕES DE GRÃOS DE MILHO EM SILOS CILÍNDRICOS METÁLICOS E COMPARAÇÃO COM DIFERENTES NORMAS INTERNACIONAIS

Figura 1.	Estação experimental do silo piloto.....	130
Figura 2.	Geometria do silo piloto e visualização detalhada de anéis com instrumentação e pontos de medição de forças e pressões no silo piloto.....	131
Figura 3.	Instrumentação e pontos de medição de forças e pressões no silo piloto.....	132
Figura 4.	Configuração do ensaio, variando a altura de carregamento do produto.....	134
Figura 5.	Descrição dos ensaios.....	135
Figura 6.	Pressões horizontais teóricas e experimentais durante o carregamento para silo com relação H/D igual a 2 (produto: milho).....	138
Figura 7.	Pressões horizontais teóricas e experimentais durante o descarregamento para silo com relação H/D igual a 2 (produto: milho).....	140
Figura 8.	Pressões horizontais teóricas e experimentais durante o carregamento para silo com relação H/D igual a 3 (produto: milho).....	141
Figura 9.	Pressões horizontais teóricas e experimentais durante o descarregamento para silo com relação H/D igual a 3 (produto: milho).....	143
Figura 10.	Pressões de atrito teóricas e experimentais durante o carregamento para silo com relação H/D igual a 2 (produto: milho).....	144
Figura 11.	Pressões de atrito teóricas e experimentais durante o descarregamento para silo com relação H/D igual a 2 (produto: milho).....	145
Figura 12.	Pressões de atrito teóricas e experimentais durante o carregamento para silo com relação H/D igual a 3 (produto: milho).....	147

Figura 13.	Pressões de atrito teóricas e experimentais durante o descarregamento para silo com relação H/D igual a 3 (produto: milho).....	149
------------	---	-----

Capítulo IV – SIMULAÇÃO DE CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO EM SILOS CILÍNDRICOS METÁLICOS USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E COMPARAÇÃO COM DADOS EXPERIMENTAIS

Figura 1.	Configuração da estação experimental.....	166
Figura 2.	Sistema de medição das pressões horizontais e de atrito nas paredes, células de carga de 8 kN.....	167
Figura 3.	Células de carga tipo viga, localizado na base de cada pilar do silo, com capacidade de 50 kN para medição da força total mobilizada pelo atrito.....	167
Figura 4.	Descrição do teste. a) Relações de H/D analisadas no silo piloto; b) Fases dos testes: Condições de carregamento, estática e descarregamento.....	168
Figura 5.	Geometrias dos silos no modelo numérico desenvolvido.....	170
Figura 6.	Simulação do contato produto – parede.....	171
Figura 7.	Cargas e restrições consideradas no modelo numérico.....	172
Figura 8.	Comparação das pressões normais estáticas sobre a parede do silo com relação H/D = 1.....	173
Figura 9.	Comparação das pressões normais estáticas sobre a parede do silo com relação H/D = 2.....	175
Figura 10.	Comparação das pressões normais estáticas sobre a parede do silo com relação H/D = 3.....	177
Figura 11.	Comparação das pressões normais dinâmicas sobre a parede do silo com relação H/D = 1.....	178
Figura 12.	Comparação das pressões normais dinâmicas sobre a parede do silo com relação H/D = 2.....	179
Figura 13.	Comparação das pressões normais dinâmicas sobre a parede do silo com relação H/D = 3.....	181

DORNELAS, Karoline Carvalho. **ANÁLISES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DAS PRESSÕES EM SILOS VERTICAIS DE FUNDO PLANO COM DIFERENTES RELAÇÕES ALTURA/DIÂMETRO (H/D)**. 2022. 188p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola.) Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB.

RESUMO

Na conjuntura econômica mundial, o crescimento vertiginoso da produção e exportação dos setores de agroindústria e de alimentos do Brasil, consolida o país como papel fundamental no setor, principalmente das *commodities* soja e milho, entretanto, o déficit de armazenagem configura um dos desafios da cadeia produtiva. Nesse contexto, os silos verticais metálicos apresentam-se como soluções alternativas tanto para indústrias quanto para produtores agropecuários. Contudo, silos são estruturas que podem apresentar elevadas falhas estruturais, especialmente pela diversidade de variáveis que afetam o comportamento das tensões e deformações nas paredes e fundo. Objetivou-se com o trabalho avaliar as pressões exercidas por produto granular (milho) nas paredes lisas de silo vertical, para diferentes relações de altura e diâmetro (H/D igual a 1, 2 e 3, respectivamente) e fundo plano concêntrico. As pressões estáticas e dinâmicas foram avaliadas em um silo piloto, cujo projeto baseia-se no princípio de modelos de Pieper e Schütz utilizado como padrão pela norma alemã DIN 1055-6 (2000), com capacidade total de armazenagem de 2,35 m³. Com base nos resultados experimentais, determinou-se experimentalmente o coeficiente de sobrepressão para as configurações estudadas. Para obtenção das propriedades físicas e de fluxo do produto foram realizados ensaios empregando-se equipamento de cisalhamento translacional conjugado com célula de cisalhamento denominada Jenike Shear Cell (TSG 70-140), de acordo com a metodologia recomendada pela British Materials Handling Posteriormente Board - BMHB. A partir destes resultados experimentais de pressões, pode-se confrontar os valores com as principais normas estrangeiras vigentes (ANSI/ASAE EP433.1:2019 e EN 1991-4:2006) e modelos teóricos (Rankine-Calil (2005) para silos baixos e Jenike et al. (1973) para silos esbeltos, fazendo-se um comparativo entre os principais métodos de previsão de pressões. Posteriormente, realizou-se simulação numérica, utilizando modelos de elementos finitos (MEF) para avaliar as pressões normais à parede. Os resultados obtidos numericamente foram comparados com as pressões normais nas paredes do silo obtidas experimentalmente. Estas informações se fazem importantes, por ser necessária ao projeto e desenvolvimento de silos, visando à integridade da estrutura e equipamentos durante o processamento de produtos, para diversas combinações entre relações H/D e formas de descarregamento. Os dados obtidos experimentalmente apresentam substancial contribuição. Conclui-se que a formulação de Rankine-Calil é a mais indicada para silos metálicos de fundo plano baixos e a formulação de Jenike é a mais adequada para silos metálicos esbeltos de fundo plano (H/D=3). Em relação à análise comparativa das normas estrangeiras e dados experimentais, constatou-se que para a fase dinâmica, as pressões horizontais da parede podem exceder as obtidas pelo método de cálculo proposto pela ANSI/ASAE S433.1 para a relação H/D = 2, para silos cuja relação H/D=3, dentre as normas analisadas, a EN 1991-4:2006 ajustou-se melhor aos dados experimentais. Os coeficientes de sobrepressão obtidos decresceram ao longo da altura do silo. Os coeficientes de sobrepressão médios foram 1.11, 1.38 e 1.21, para H/D igual a 1, 2 e 3, respectivamente.

Palavras-chave: Instrumentação, carregamento, descarregamento, produto de fluxo livre, silo baixo; silo esbelto, Método dos Elementos Finitos.

DORNELAS, Karoline Carvalho. **NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF PRESSURES IN VERTICAL FLAT BOTTOM SILOS WITH DIFFERENT HEIGHT/DIAMETER (H/D) RATIOS.** 2022. 188p. Thesis (Doctorate in Agricultural Engineering). Federal University of Campina Grande. Campina Grande, PB.

ABSTRACT

In the global economic situation, the vertiginous growth of production and exports of the agroindustry and food sectors in Brazil, consolidates the country as a fundamental role in the sector, mainly of soy and corn commodities, however, the storage deficit configures one of the challenges of the chain productive. In this context, metallic vertical silos are presented as alternative solutions for both industries and agricultural producers. However, silos are structures that can present high structural failures, especially due to the diversity of variables that affect the behavior of stresses and deformations in the walls and bottom. The objective of this work was to evaluate the pressures exerted by a granular product (corn) on the smooth walls of a vertical silo, for different height and diameter ratios (H/D equal to 1, 2 and 3, respectively) and concentric flat bottom. Static and dynamic pressures were evaluated in a pilot silo, whose design is based on the principle of Pieper and Schütz models used as standard by the German standard DIN 1055-6 (2000), with a total storage capacity of 2.35 m³. Based on the experimental results, the overpressure coefficient was experimentally determined for the studied configurations. To obtain the physical and flow properties of the product, tests were carried out using translational shear equipment combined with a shear cell called Jenike Shear Cell (TSG 70-140), according to the methodology recommended by the British Materials Handling Posterior Board - BMHB. From these experimental pressure results, the values can be compared with the main current foreign standards (ANSI/ASAE EP433.1:2019 and EN 1991-4:2006) and theoretical models (Rankine-Calil (2005) for low silos and Jenike et al.(1973) for slender silos, making a comparison between the main pressure prediction methods. Later, a numerical simulation was carried out, using finite element models (FEM) to evaluate the pressures normal to the wall. The numerically obtained results were compared with the normal pressures on the silo walls obtained experimentally. This information is important, as it is necessary for the design and development of silos, aiming at the integrity of the structure and equipment during the processing of products, for different combinations between H/D ratios and unloading forms. The data obtained experimentally present a substantial contribution. It is concluded that the Rankine-Calil formulation is the most indicated for low flat bottom metal silos and the Jenike formulation is the most suitable for flat bottom slender metal silos (H/D=3). Regarding the comparative analysis of foreign standards and experimental data, it was found that for the dynamic phase, the horizontal wall pressures can exceed those obtained by the calculation method proposed by ANSI/ASAE S433.1 for the ratio H/D = 2, for silos whose H/D=3 ratio, among the norms analyzed, the EN 1991-4:2006 adjusted better to the experimental data. The overpressure coefficients obtained decreased along the height of the silo. The average overpressure coefficients were 1.11, 1.38 and 1.21, for H/D equal to 1, 2 and 3, respectively.

Keywords: Instrumentation, loading, unloading, free flowing product, low silo; slender silo, Finite Element Method.

CAPÍTULO I

CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

1. INTRODUÇÃO GERAL

O constante crescimento da produção agrícola mundial aumenta a demanda por instalações para seu armazenamento e, no Brasil, estima-se para safra 2022/23 um total de 308 milhões de toneladas, 37 milhões de toneladas superior ao colhido em 2021/22, com destaque para as *commodities* de soja e milho. O milho torna-se alvo de estudo diante do crescente interesse nacional e internacional, concomitante ao aumento da produção nacional, estimando-se uma colheita recorde 9,4% superior ao ano de 2022 (CONAB, 2022). Concomitantemente à sua importância em termos de produção, a cultura ainda se notabiliza pelos diversos usos.

Contudo, o ritmo intensificado da produção no Brasil não foi acompanhado na mesma proporção pela capacidade estática de armazenagem do país, apresentando um déficit em torno de 89 milhões de toneladas, desta forma, a construção de silos, como os verticais, surge como uma das alternativas para solução deste problema. Os silos verticais são estruturas utilizadas pelas indústrias, setor agrícola e mineral para armazenar e conservar a granel, produtos sólidos granulares ou pulverulentos. Ao projetar-se os silos, o objetivo principal é garantir a qualidade do produto e, pelo lado funcional de operação, que os sólidos armazenados fluam sob a ação da gravidade, sem obstruções do fluxo.

Entretanto, os silos podem não ter as condições ideais de operação, devido ao insuficiente conhecimento das pressões que variam no tempo e no espaço interno, do fluxo e das variáveis que afetam o comportamento dos produtos armazenados e, tais situações tem contribuído para os acidentes e colapsos em silos. Os acidentes envolvendo silos verticais têm se intensificado, destacando-se que alguns dos eventos ocorridos no Brasil foram de silos baixos e medianamente esbeltos para estocar grãos, como milho e trigo.

Em geral, os silos utilizados para armazenagem de grãos em nível de fazenda apresentam baixa relação entre altura e diâmetro (H/D) e fundo plano. Em contrapartida, em nível agroindustrial (processamento de alimentos, fábricas de rações, etc.) predominam as estruturas de armazenamento verticais esbeltas ou medianamente esbeltas, com melhor aproveitamento de espaço e facilitando o uso de transportadores e acesso de caminhões no descarregamento dos produtos.

Com essa crescente demanda por capacidade de armazenagem e acréscimo no número de acidentes, o entendimento do comportamento estrutural, prevenção de falhas e otimização dos componentes estruturais tornam-se necessários. No dimensionamento de silos devem ser consideradas as ações que solicitam a estrutura, destacando-se aquelas

provocadas pelos produtos armazenados, os quais transferem pressões para as paredes e fundo.

A previsão das pressões estáticas e dinâmicas em silos depende das propriedades físicas e de fluxo do produto armazenado, da relação altura/diâmetro (H/D) da estrutura e modo de descarregamento (concêntrico ou excêntrico), sendo divergente entre os pesquisadores e códigos normativos existentes. Cada tipo de configuração requer um tratamento específico de projeto, havendo diferenças entre as grandezas das pressões observadas para os variados arranjos de armazenamento.

As normas estrangeiras adotam a formulação de Janssen (obtida originalmente para silos altos) para previsão das pressões na condição de carregamento (inicial) tanto de silos altos quanto baixos. Além disso, são escassos os trabalhos experimentais conduzidos em silos de baixa relação altura/diâmetro. Dentro desse cenário, existem poucas instalações experimentais de silo em escala real no mundo, devido aos elevados investimentos necessários para construção, instrumentação da estrutura.

Para solucionar esse e outros problemas de engenharia, utiliza-se a simulação computacional baseada no método numérico, que trata de técnicas de aproximação dos resultados para simplificação das equações. Dentre os tipos de método numérico, o método dos elementos finitos (MEF) é o mais difundido para a simulação de carregamento ou descarregamento de produtos armazenados em silos, desde que inseridas suas propriedades referentes à geometria e aos produtos e interface entre as paredes.

Diante do exposto, observa-se que para garantir a competitividade do Brasil em um mundo globalizado, a construção de silos é uma premissa necessária tanto para produtores agrícolas quanto indústrias, sendo aqui inseridas avaliações que contribuirão para elaboração de norma brasileira para projetos de silos, verificando-se o comportamento das pressões em silos cilíndricos metálicos nas configurações mais empregadas no setor agropecuário para produto granular.

A presente pesquisa almeja o avanço na área científica de silos com fundo plano, relacionando pressões e esbeltez e utilizando produto armazenado de fluxo livre avaliado experimentalmente (estação em escala real) com validações e comparações das pressões exercidas por meio dos principais códigos normativos empregados e de estudos numéricos (Método dos Elementos Finitos - MEF) com a finalidade de tornar os modelos confiáveis, otimizar as respostas e possibilitar o aprofundamento da teoria.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Mensurar e avaliar as pressões de silo com fundo plano, comparando-as com calculadas pelos códigos normativos EN 1991-4 e ANSI/ASAE EP433.1 e com as obtidas pelo Método dos Elementos Finitos, contribuindo com âmbito de pesquisa que assegure procedimentos coerentes para a quantificação das pressões nas principais configurações de silo empregadas no país.

2.2. Objetivos Específicos

- Análise das pressões estáticas e dinâmicas obtidas experimentalmente no silo-piloto com fundo plano, variando as configurações de relações altura/diâmetro (H/D igual a 1, 2 e 3) para produto granular (milho);

- Determinar as propriedades físicas e de fluxo de grãos de milho necessárias à obtenção das pressões por meio das formulações teóricas;

- Simular, a partir do método dos elementos finitos, as pressões horizontais exercidas pelos grãos de milho durante o carregamento e descarga;

- Confrontar os valores obtidos experimentalmente com os prescritos pelas principais normas estrangeiras de silos (ANSI/ASAE S433.1 e EN 1991-4), para avaliar se as normas superestimam ou subestimam as pressões nas configurações de silo analisadas;

- Comparação da teoria de cálculo de Rankine-Calil (2005) com as principais normas estrangeiras (ANSI/ASAE S433.1 e EN 1991-4), tendo como referência os resultados de pressões e sobrepressões obtidos no silo piloto, consideração silo com H/D igual a 1.

- Comparação da teoria de cálculo de Jenike et al. (1973) com as principais normas estrangeiras de silos esbeltos (ANSI/ASAE EP433:1988 e EN 1991-4:200), tendo como referência os resultados de pressões e sobrepressões obtidos no silo piloto, consideração silo com H/D igual a 3.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Silos: caracterização e importância

Silos são células individualizadas, construídas em chapas metálicas, alvenaria ou concreto, possuindo ou não sistema de aeração e, propiciando condições para preservação da qualidade do produto e, os primeiros silos altos (esbeltez elevada) foram construídos no final do século XIX para armazenamento de grãos (Gallego et al., 2015). Os silos são estruturas de armazenamento amplamente utilizadas pelo setor agrícola e industrial, como mineração, química e alimentícia, para materiais granulares e pulverulentos (Yu et al., 2017; Zhang et al., 2018), sendo equipados com dispositivos de carregamento e capazes de serem esvaziadas, preferencialmente, pela ação da gravidade ou com auxílio de dispositivos mecânicos ou pneumáticos.

Para a norma europeia (*European Committee of Standardization* - EN 1991-4:2006), silos são definidos como estruturas utilizadas para o armazenamento e a conservação de produtos sólidos particulados, a granel ou pulverulentos, enquanto a norma americana (ANSI/ASAE S433.1:2019) define o termo silo (*bin*) como estrutura que apresente relação altura/diâmetro (ou lado mais curto) superior a 0,5.

Esse tipo específico de construção apresenta expressiva importância para o Brasil pelo *boom* do setor agropecuário (Rodrigues et al., 2018), onde o país consolidou-se no cenário mundial como um dos maiores produtores e exportadores de *commodities* agrícolas e proteína animal e, em termos de exportação, destacam-se a soja, milho, frango, carne bovina, suína e farelo de soja (IBGE, 2020).

Em 2023 a projeção para safra brasileira é um montante de 308 milhões de toneladas, recorde histórico, devendo-se o aumento no comparativo anual ao crescimento vertiginoso das culturas de soja e milho (CONAB, 2022), produtos que atendem uma gama crescente de mercados e produtos derivados, tais como proteínas animais. A perspectiva é que o Brasil alcance uma produção de 125,5 milhões de toneladas de milho, estimuladas pelo incremento da produção interna de proteínas animais, puxado pelas exportações e por recuperação no consumo interno, especialmente pela produção de etanol de milho.

No *ranking* mundial de exportações de proteína animal, o país ocupa o primeiro lugar para carne bovina e aves (ABIEC, 2022; ABPA, 2022) e, para manutenção da competitividade econômica do país em relação a produção e exportações de carnes, é necessário domínio sobre a tecnologia de construção de silos, muitos deles utilizados em fábricas de rações (Lopes Neto et al., 2008).

A capacidade estática de armazenagem é importante para a comercialização de produtos agrícolas, onde os produtores podem negociar os produtos por preços mais atrativos na entressafra, evitam gargalos logísticos e a agroindústria garante a qualidade e a continuidade no fornecimento das matérias-primas utilizadas no processo produtivo (Silva Neto & Santos, 2019).

A evolução da capacidade estática brasileira não ocorreu na mesma proporção que produção agropecuária. A capacidade estática total registrada no Brasil em 2022 foi de 182,6 milhões de toneladas, culminando um déficit de aproximadamente 80 milhões de toneladas (CONAB, 2022) e, o fato de o país tornar-se grande produtor de grãos e seus derivados, salienta as preocupações quanto ao armazenamento, onde além da excelência em termos de produção, se faz necessário investimento em silos (Baroni et al., 2017).

3.1.1. Classificação dos silos

Existem vários parâmetros para a classificação dos silos, podendo ser definidos de acordo com o material empregado em sua construção, nível em relação ao solo, geometria, tipo de fundo e fluxo desenvolvido durante o descarregamento, havendo uma diversidade de silos em função do material de construção empregado, podendo-se citar silos de concreto (armado ou protendido), alvenaria, argamassa armada, pré-moldado, chapas metálicas (lisas, corrugadas ou trapezoidais), madeira, dentre outros (Paula, 2020). Para o nível em relação ao solo, de acordo com Calil Júnior & Cheung (2007) os silos dividem-se em aéreos ou elevados: construídos acima do nível do solo; subterrâneos: apresentam compartimento de armazenamento situado abaixo do nível do solo e semi-subterrâneos: os que possuem estrutura intermediária entre os dois anteriores.

3.1.2. Classificação dos silos quanto à esbeltez

Quanto à geometria, Calil Júnior & Cheung (2007) classificam os silos em horizontais e verticais e subdividem os verticais em esbeltos e baixos, considerando-se a relação entre altura e diâmetro: a) esbeltos aqueles cuja relação altura do corpo e diâmetro (H/D) é igual ou superior a 1,5; b) baixos aqueles cuja relação altura do corpo e diâmetro (H/D) é inferior a 1,5. Enquadram-se na classificação de silos horizontais aqueles que possuem dimensão longitudinal preponderante em relação às demais (altura e largura).

As principais normas estrangeiras existentes classificam os silos verticais como esbeltos, medianamente esbeltos ou baixos, considerando-se a relação entre altura do

corpo (H) e diâmetro (D), havendo variações entre elas (Tabela 1). Os principais parâmetros geométricos de silo vertical são apresentados na Figura 1.

Tabela 1. Classificação geométrica dos silos em relação à esbeltez (H/D*).

Normas	Classificação		
	Baixo	Medianamente esbelto	Esbelto
EN 1991-4:2006	$0,4 \leq H/D < 1,0$	$1,0 \leq H/D < 2,0$	$H/D \geq 2,0$
ISO 11697:2012	$H/D < 1,0$	$1,0 \leq H/D \leq 1,5$	$H/D > 1,5$
DIN 1055-06:2005	$0,4 \leq H/D < 1,0$	$1,0 \leq H/D < 2,0$	$H/D \geq 2,0$
AS 3774:1996	$H/D < 1,0$	$1,0 \leq H/D \leq 3,0$	$H/D > 3,0$
ACI-313/2016	$H/D \leq 2,0$	**	$H/D > 2,0$
ANSI/ASAE EP433.1:2019	$H/D \leq 2,0$	**	$H/D > 2,0$

*A consideração da altura equivalente (H) varia entre as normas, deste modo, deve-se consultar o código normativo.

**Não possui esta classificação.

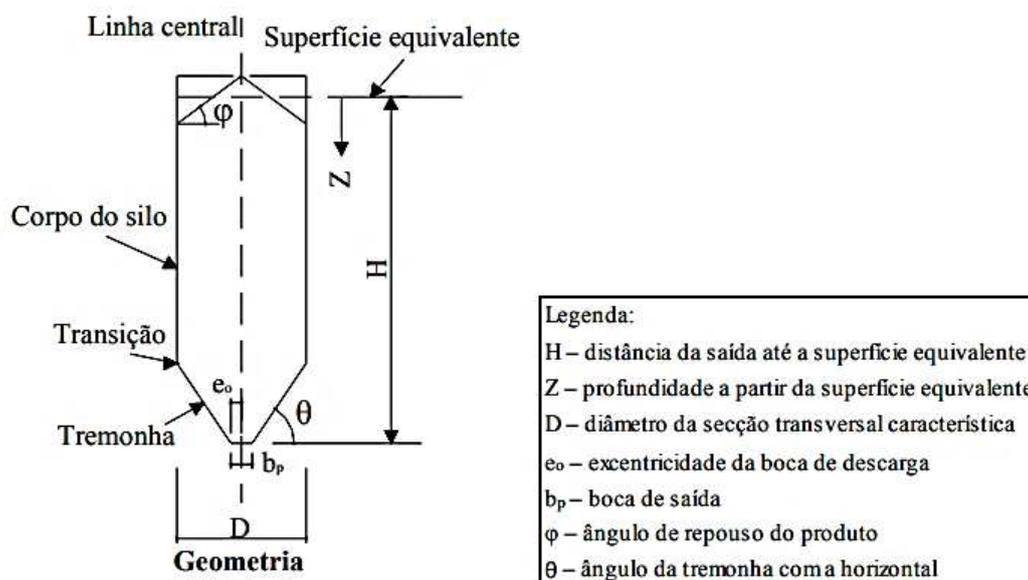


Figura 1. Parâmetros geométricos silo vertical.

Como a previsão das pressões estáticas e dinâmicas nos códigos normativos vigentes para dimensionamento de silos baseiam-se segundo a classificação de esbeltez, propondo métodos de cálculo das diferentes pressões de acordo com a classe a que pertence o silo, denota-se, deste modo, a importância da classificação (Diniz & Nascimento, 2006; Couto et al., 2012) e do estudo das influências das diversas relações H/D das estruturas de armazenamento de produtos a granel nas pressões.

3.1.3. Classificação dos silos quanto ao tipo de fundo

Outro atributo geométrico empregado para classificação é o tipo de fundo, podendo-se apresentar na forma plana ou cônica (Han et al., 2019). Caracterizam-se como

fundo plano os silos de fundo horizontal ou fundo com paredes inclinadas de um ângulo $\alpha \leq 20^\circ$ em relação à horizontal (Deckers, 2014) (Figura 2); ao passo que para a norma europeia EN 1991-4 (Eurocode, 2006) este ângulo deve ser inferior a 5° .

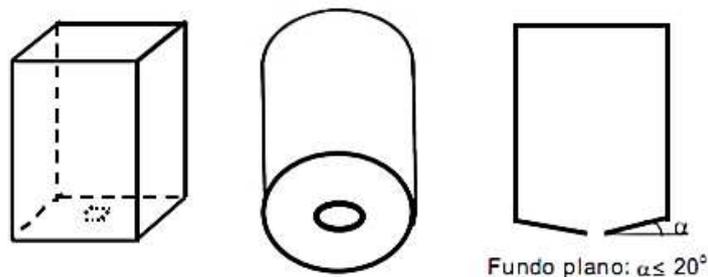


Figura 2. Silos de fundo plano. Fonte: Freitas (2001).

Em contrapartida, silos com fundo cônico são aqueles constituídos de fundo em formato de funil, denominados tremonha (Figura 3). De acordo com a variação geométrica da tremonha, o fluxo de um produto pode assumir diferentes trajetórias podendo-se destacar trajeto de fluxo axissimétrico (canal do fluxo é simétrico), plano-simétrico (denominado também de planar, ocorre em silos de seção transversal retangular, com tremonha em forma de cunha) ou excêntrico (canal do fluxo não é simétrico) (Figura 4) (Saleh et al., 2018).

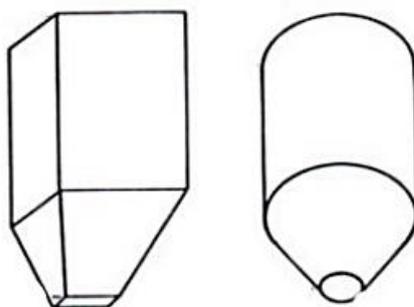


Figura 3. Silos de fundo cônico (tremonha). Fonte: Freitas (2001).

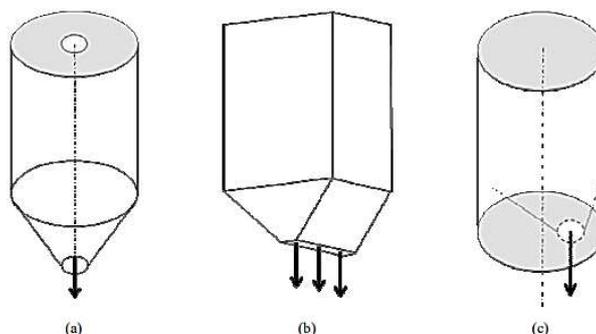


Figura 4. Trajetos (a) axissimétrico, (b) planar e (c) excêntrico. Fonte: Argenta (2010).

Quanto à geometria das tremonhas, existem várias opções, como supracitado (Figura 5). Além disso, a tremonha pode ser mais ou menos profunda, apresentar variados ângulos de inclinação e diferentes geometrias do orifício de descarga, como circular, retangular etc. (Figura 6) (Saleh et al., 2018). A definição do modelo de tremonha resultará da combinação de determinadas informações, tais como como as características do produto a ser armazenado, o espaço físico disponível e o tipo de fluxo desejado, de tal modo que adeque-se a cada necessidade.

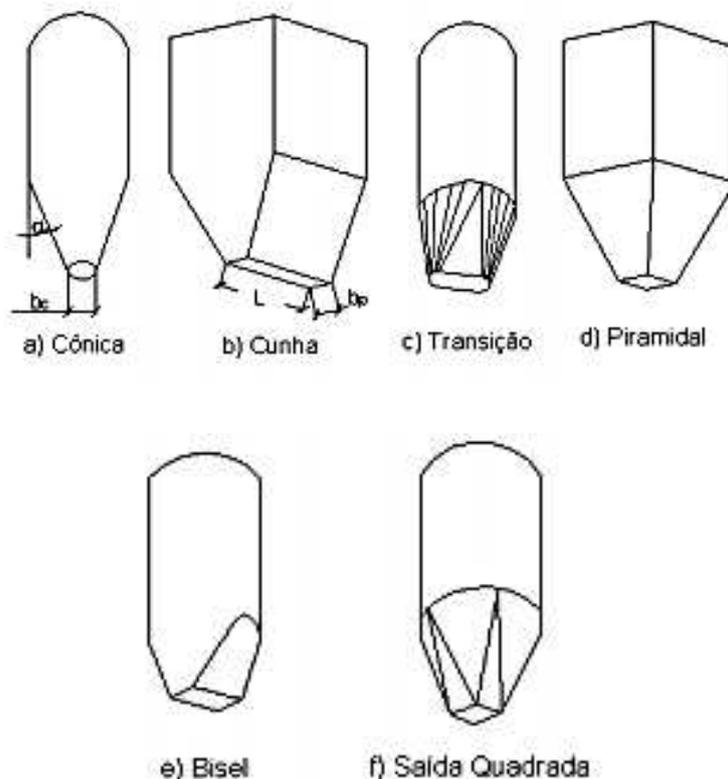


Figura 5. Formas usuais das tremonhas. Fonte: Palma (2005).

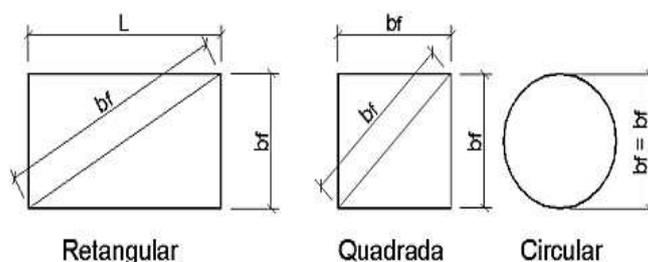


Figura 6. Formatos típicos de orifícios de descarga para silos. Fonte: Palma (2005).

Silos com tremonhas podem apresentar problemas de segregação do produto e ovalizações da estrutura provocadas por pressões localizadas na região de transição entre corpo do silo e tremonha. Estas questões, dentre diversas outras, relacionam-se diretamente à geometria da tremonha e às propriedades físicas dos produtos

armazenados, fatores que provocam diferentes concentrações de tensões nessas partes do silo (Paula, 2020). Deste modo, a consideração de como ocorre o descarregamento do produto no projeto do silo é fundamental para evitar falhas estruturais (Ramírez et al., 2010).

3.2. Propriedades dos produtos armazenados

No projeto de silos a determinação das propriedades do produto a se armazenar são fundamentais para compreensão do fluxo e cálculo das pressões que irão ocorrer durante as operações de carregamento, armazenamento e descarregamento, de tal modo que se obtenha uma estrutura econômica, segura e com durabilidade (Alonso-Miravalles et al., 2020).

Durante o carregamento do produto problemas como compactação e segregação podem ocorrer e, na operação de descarregamento, há possibilidade de formação de abóbadas estáveis sobre o orifício de descarga, ocasionando sérios problemas de fluxo (obstruções) e estruturais na instalação (Paula, 2020). A complexidade do comportamento do fluxo de produtos sólidos (granulares e pulverulentos) torna-os muito mais desafiadores de manusear do que líquidos e gases. Problemas comuns incluem entupimento, segregação, orifício de descarga obstruído ou parcialmente limitado, fluxo errático, fluxo repentino e incontrolável e aderência de produto às paredes do silo, o que causa perda de área útil de armazenamento e pode levar à deterioração do material armazenado (Westover et al., 2015).

Muitos métodos e equipamentos para determinação das propriedades dos materiais armazenados existem, nos quais as células de cisalhamento são os dispositivos mais empregados mundialmente (Jin et al., 2018; García-Triñanes et al., 2019; Macri et al., 2020), destacando a “*Jenike Shear Cell*” ou célula de cisalhamento de Jenike como um dos métodos mais aceitos para determinar as propriedades de fluxo e recomendado pela maioria das normas estrangeiras (Guo et al., 2018; Mallick et al., 2018; Meira et al., 2019).

A célula de cisalhamento Jenike (Figura 7) consiste em uma base cilíndrica fixa sobre qual é colocada uma célula/anel de cisalhamento, tampa, um pendural com pesos para aplicação de carga vertical por gravidade na célula, suporte de carga acionado eletromecanicamente, o qual promove a ação de cisalhamento movendo-se horizontalmente; uma célula de carga para medir a força de cisalhamento e um registrador para indicação desta força (Salehi et al., 2017).

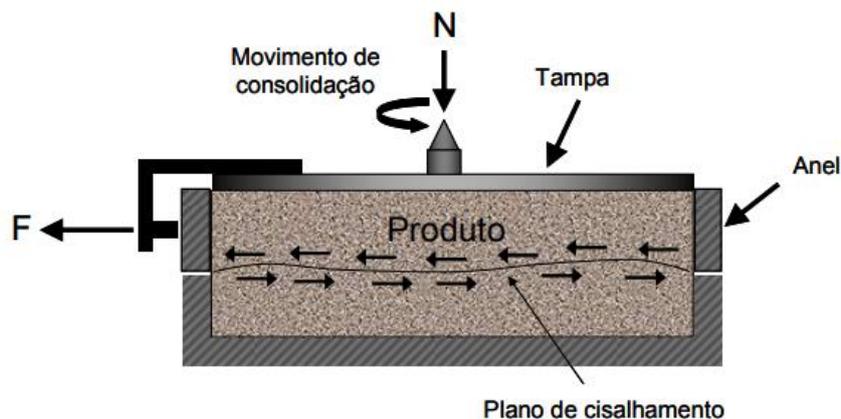


Figura 7. Célula de cisalhamento de Jenike. Fonte: Cheung (2007).

A obtenção das propriedades de fluxo e o desenvolvimento dos critérios de projeto dependem do conhecimento do lugar geométrico da tensão de cisalhamento *versus* a tensão normal para o produto deslizando sobre si mesmo e sobre o material da parede do silo (Salehi et al., 2017; Malagalage et al., 2018). Sendo possível, por meio deste equipamento, a determinação das tensões sob as quais os produtos (coesivos ou não) estarão sujeitos durante o armazenamento, assim como as condições de fluxo previstas para acontecer no interior da estrutura.

Deste modo, a abordagem de Jenike para o projeto de silos considera os efeitos da densidade do produto a granel, as forças de atrito que atuam entre as partículas do produto, as forças de atrito que atuam entre o produto e a parede da estrutura e a força coesiva do produto. Usando esta abordagem, as propriedades de fluxo dos produtos são medidas em função da tensão de consolidação, a fim de prever o comportamento do fluxo (peso específico, ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno) (Jager et al., 2015).

As principais propriedades físicas dos produtos determinadas e utilizadas para o projeto de fluxo e estruturas de silos são: peso específico consolidado (γ); granulometria ($d_{máx}$ e $d_{mín}$); teor de umidade (w); ângulo de atrito interno (ϕ_i); efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e); ângulo de atrito interno do produto com a parede (ϕ_w); função fluxo (FF) e fator fluxo da tremonha (ff) (Fürl & Hoffmann, 2015; Stasiak et al., 2015; Calderón et al., 2017; Malagalage et al., 2018).

Contudo, novas ferramentas e métodos para dimensionamento estrutural dos silos surgiram no decorrer do tempo, 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 (ν) e ângulo de dilatação (ψ).

Valores correspondentes para estas propriedades ainda são pouco encontrados na literatura, motivo pelo qual estão sendo estudadas por diversos autores, destacando-se os trabalhos realizados por Ramirez et al. (2010), Moya et al. (2002; 2006; 2013; 2022) e 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 (ϕ_i), o coeficiente de atrito grão-parede (μ_w) e o peso específico (γ), não contemplando o coeficiente de Poisson (ν), o módulo de elasticidade (E) e o ângulo de dilatação (ψ), propriedades indispensáveis para parametrizar o comportamento do produto ensilado (Moya et al., 2013; 2022).

As principais normas estrangeiras, tais como as europeias EN 1991-4:2006; ISO 11697:2012, australiana AS 3774:1996 e a americana ANSI/ASAE EP433.1:2019 fornecem por meio de tabelas, valores característicos de algumas propriedades (limites inferior e superior) para determinados produtos agrícolas e industriais. Porém, esses valores variam muito entre as normas, recomendando-se, sempre que possível, realizar testes em laboratório para caracterização do produto a ser armazenado.

Ao realizar uma comparação entre dados tabelados nas normas ISO 11697, EP 433.1 e AS 3774 e as propriedades de grãos de trigo cv. soft red determinadas experimentalmente, notou-se que o valor do peso específico consolidado (γ) foi compatível com o recomendado pelas normas estudadas, porém, para o ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w), apenas o valor fixado pela ISO 11697 apresentou-se próximo ao determinado experimentalmente, ao passo que, houve diferença significativa para o ângulo de atrito interno efetivo (ϕ_e), de 20 e 33% superior aos limites máximos propostos por AS 3774 (1996) e ISO 11697 (1995), respectivamente, e estas as diferenças podem ser decorrentes de características físicas do produto como formato, granulometria e peso específico consolidado intrínseco a cada cultivar de trigo (Nascimento et al., 2013).

3.3. Fluxo em silos

A descarga de produtos pulverulentos e granulares por gravidade tem sido um assunto de interesse para as comunidades acadêmicas e industriais (Saleh et al., 2018; Hammadeh et al., 2019; Xue et al., 2019), notoriamente pelo fato de que quantidades crescentes de materiais passaram a ser armazenados como produtos finais ou como matérias-primas em processos produtivos (por exemplo, grãos e cereais, carvão, minério de ferro, cimento, etc.). De fato, é difícil encontrar um produto granular que não tenha estado, em um momento ou outro de seu ciclo de vida, em um silo (Saleh et al., 2018).

A fluidez de um material é uma característica complexa, dependente não apenas das propriedades do produto, mas também do histórico de tensões submetidas ao material e fatores estruturais (rugosidade da parede, ângulo da tremonha etc.) (Koynov et al., 2015; Mathews & Wu, 2016). Os tipos de padrões de fluxo produzidos no interior dos silos têm um efeito significativo na distribuição da pressão dinâmica exercida nas paredes e tremonha (Hammadeh et al., 2019; Saleh et al., 2018; Xue et al., 2019).

O tipo de fluxo caracteriza o descarregamento do produto, a formação ou não de zonas estagnadas de produto, se o silo pode ser esvaziado totalmente, o tipo de segregação do material, além de determinar a integridade e custo da construção, pelo fato de influenciar na distribuição das pressões nas paredes do silo e fundação (Calil Júnior, 1990). Quando ocorre abertura do orifício de descarga, as partículas ao redor do orifício caem, deixando o lugar para outras partículas se moverem (Saleh et al., 2018). As partículas então se movem para baixo com uma velocidade que depende de sua posição, das tensões que elas sofreram e das forças dissipativas (por exemplo, atrito, coesão) que se opõem ao fluxo (Saleh et al., 2018).

Podem-se formar basicamente dois tipos de fluxo durante a descarga, o de massa e funil (Figura 8). O primeiro caracteriza-se pelo movimento de todas as partículas no interior da estrutura, imediatamente após abertura do orifício de descarga (Oginni & Fasina, 2018). Em contrapartida, o segundo é definido pela formação de um canal preferencial de fluxo e porções de produtos estagnadas no entorno das paredes (Fullard et al., 2020), configurando padrão típico de silos de fundo plano (Han et al., 2019). O fluxo de massa ocorre normalmente quando as paredes da tremonha são suficientemente inclinadas e lisas (baixo coeficiente de atrito) e não existem abruptas transições e o fluxo do funil é padrão típico para silos de fundo plano (Olivares et al., 2018).

Além destes, há um terceiro tipo de fluxo, caracterizado por um regime de transição entre os outros dois, ou seja, uma combinação de fluxo de funil para partículas próximas

ao orifício de descarga até uma determinada altura e um fluxo de massa para partículas do topo até um determinado ponto do corpo do silo (Figura 8). Denominado de fluxo misto, é característico para tremonhas com pequenas inclinações das paredes (Olivares et al., 2018) sendo característico de silos esbeltos, cuja relação $H/D \geq 2$ (Sadowski & Rotter, 2011). No caso de silos com descarga excêntrica, os tipos de fluxo são basicamente os mesmos de silos concêntricos, de acordo com Figura 9.

O fluxo excêntrico pode surgir pela formação de zonas estacionárias assimétricas em silos com fluxo de funil; em silos com sistema de descarga que remove o produto apenas de uma parcela do orifício de descarga; silos com tremonhas assimétricas ou em silos que apresentem mais de uma abertura de descarga sendo que uma ou mais estão obstruídas ou em desuso (Schulze, 1996).

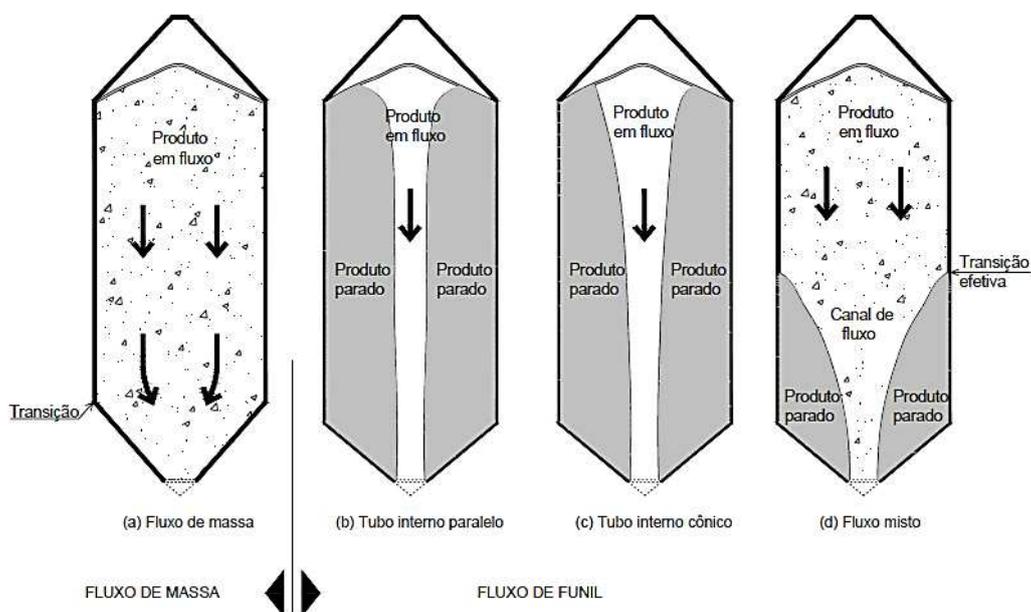


Figura 8. Tipos de fluxo em silos com descarga concêntrica. Fonte: EN 1991-4 (2006).

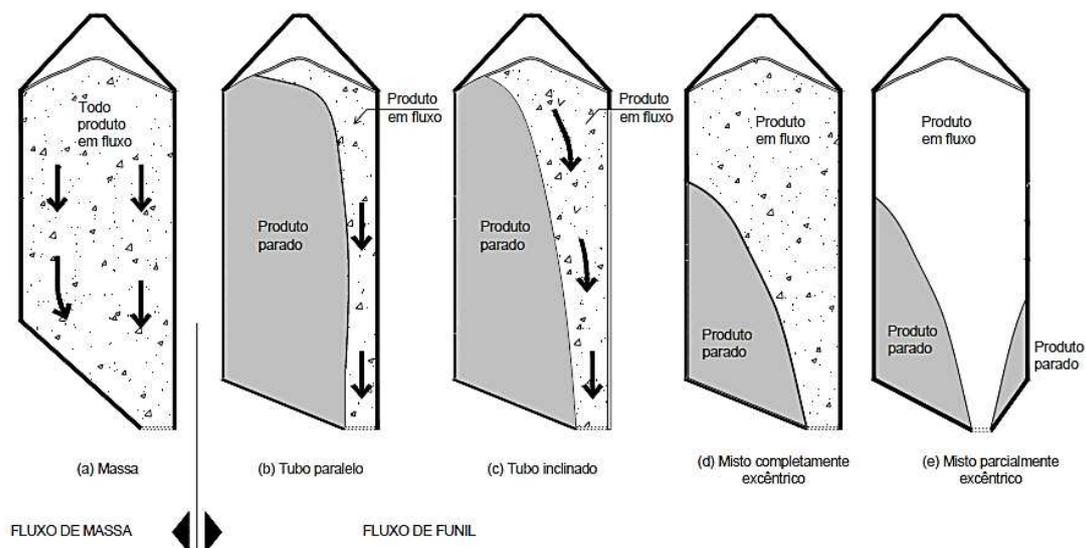


Figura 9. Tipos de fluxo em silos com descarga excêntrica. Fonte: EN 1991-4 (2006).

A diferença básica entre o fluxo de funil e o misto reside no fato de que no fluxo do funil as partículas que fluem não entram em contato com as paredes do silo, enquanto no fluxo misto, o limite do fluxo cruza a parede do silo em algum ponto (Wang et al., 2015). As possíveis configurações do canal de fluxo no interior dos silos em função de sua esbeltez são apresentadas na Figura 10, determinando, também, a distribuição das pressões nas paredes da estrutura e fundação, a integridade e custo da construção. Observa-se também que o canal de fluxo pode ser excêntrico, mesmo o silo possuindo o orifício de saída centralizado, influenciado pela esbeltez.

Em silos com saídas concêntricas, o fluxo excêntrico pode surgir nos casos de ocorrência de segregação do material armazenado; de bloqueio parcial ou falhas do sistema de descarga e em situações de diferenças de temperatura e umidade em diferentes lados do silo, proporcionando fluxo preferencial em um dos lados (Rotter, 2001).

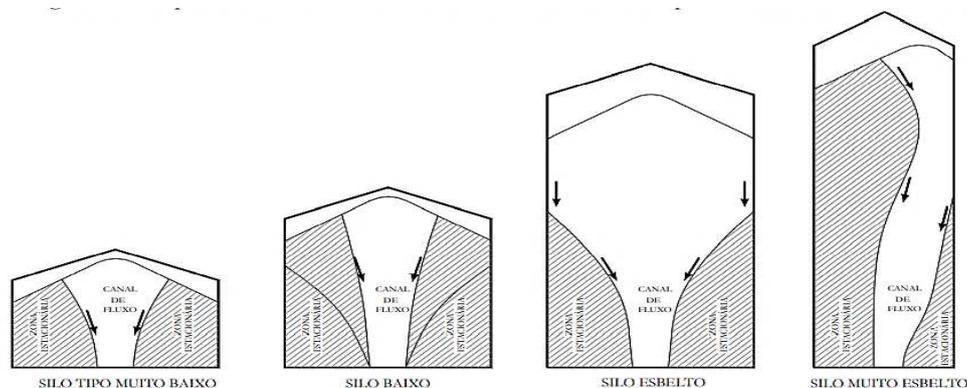


Figura 10. Efeitos da esbeltez no fluxo. Fonte: EN 1991-4 (2006).

Para produtos granulares de fluxo livre os canais de fluxo tipo 'misto' mais amplos são possíveis de ocorrer durante o descarregamento, podendo iniciar o fluxo como funil, mas em algum momento da descarga ocorre o desenvolvimento do fluxo misto (Sadowski et al., 2020).

As normas *International Organization for Standardization* – ISO 11698:2012, europeia (*European Committee of Standardization* - EN 1991-4:2006) e americana (ANSI/ASAE EP 433.1:2019), apresentam procedimentos para determinação do tipo de fluxo, conforme apresentado nas Figuras 11, 12, 13 e 14, respectivamente. Os gráficos apresentados nas normas supracitadas predizem o tipo de fluxo em função de alguns parâmetros, sendo eles: ângulo ou coeficiente de atrito do produto com a parede, inclinação das paredes da tremonha e de sua geometria (fluxo plano e axissimétrico).

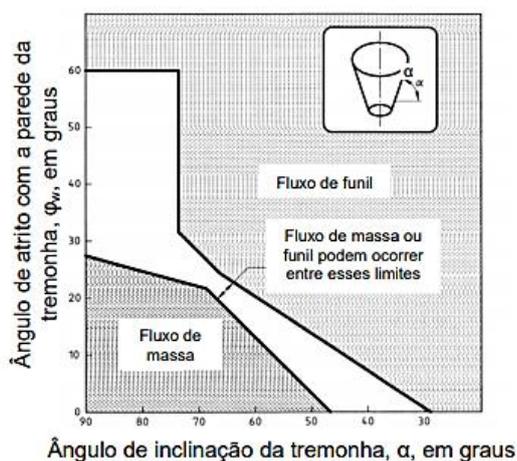


Figura 11. Determinação do tipo de fluxo pela ISO 11697 (2012) para tremonha cônica.

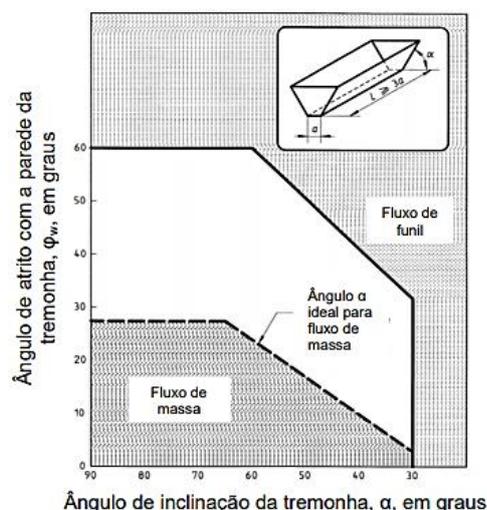
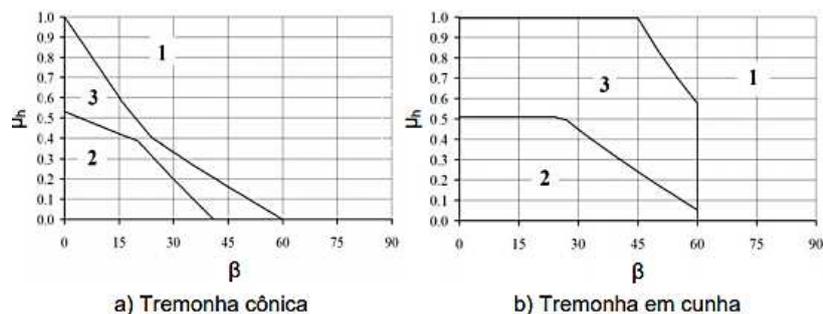


Figura 12. Determinação do tipo de fluxo pela ISO 11697 (2012) para tremonha em cunha.



Sendo:
 1 = Fluxo de funil;
 2 = Fluxo de massa;
 3 = Fluxo de massa ou funil;
 β = Ângulo de inclinação da tremonha;
 μ_h = Coeficiente de atrito.

Figura 13. Determinação do tipo de fluxo pela EN 1991-4 (2006).

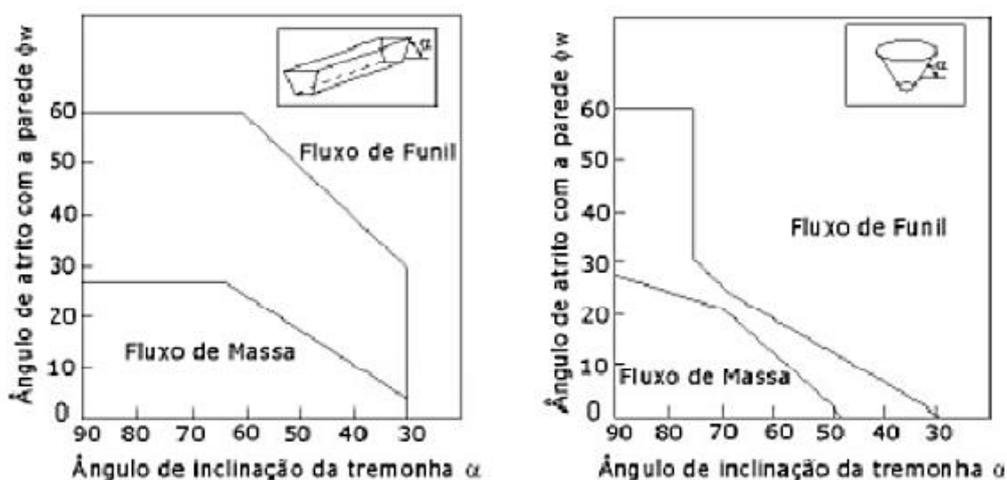


Figura 14. Determinação do tipo de fluxo pela ANSI/ASAE EP433.1 (2019).

Contudo, trabalhos apontam que mesmo para partículas de fluxo livre e silos com tremonhas íngremes, o fluxo de massa nem sempre é garantido (Saleh et al., 2018). A ocorrência do fluxo de massa durante todo o processo de descarga é difícil, porque as paredes do silo induzem tensões de cisalhamento no material, produzindo um gradiente de velocidade e como resultado, diferentes tipos de fluxo de funil serão produzidos no estágio posterior de descarga, incluindo fluxo de tubo paralelo, fluxo misto cônico e fluxo misto concêntrico (Mathews & Wu, 2016).

Obviamente, a maior atenção foi dada ao estudo do fluxo de pós coesos em razão das dificuldades de descarregamento por gravidade desses produtos, mas partículas de granulometria maior e de fluxo livre também apresentam alguns problemas desafiadores, denotando-se a necessidade de pesquisas na área (Saleh et al., 2018).

3.4. Ações em silos

Como todas as outras estruturas de engenharia, o ponto de partida para análise estrutural no projeto de silos é a determinação das ações atuantes durante o ciclo de vida da estrutura, as quais podem ser classificadas em permanentes, variáveis e excepcionais (Tascón, 2017; Mehretehran & Maleki, 2018). As ações permanentes incluem o peso próprio do silo e dos equipamentos fixados nele. As cargas variáveis referem-se aos produtos armazenados, elementos estruturais que sofrem vibrações e estão fixados no silo, como por exemplo, as correias transportadoras, ações do vento etc. (Mehretehran & Maleki, 2018). As ações excepcionais englobam os prováveis impactos de veículos e pressões decorrentes da explosão de pós e gases provenientes dos produtos.

Uma particularidade das ações que atuam nos silos encontra-se na avaliação das cargas de carregamento e as cargas induzidas pelo descarregamento do produto no silo. Cada um dos processos, seja carregamento, armazenamento ou descarga, geram esforços na estrutura com magnitudes bastante diversas. É de extrema importância para o dimensionamento adequado do silo que se conheça as distribuições de carga do material armazenado exercida na estrutura, sendo depende do padrão de fluxo (Wójcik et al., 2017).

Na condição de carregamento e armazenamento (momento anterior ao início do descarregamento), o produto encontra-se submetido a um estado de tensões denominado de estado ativo, caracterizado por apresentar a tensão principal máxima na direção vertical, coincidente com o eixo do silo, e a tensão mínima na direção horizontal, chamado de pressões estáticas (Paula, 2020).

A partir do instante em que se inicia o descarregamento do produto armazenado, essa configuração de tensões modifica, passando a maior tensão principal a atuar na direção horizontal e a menor tensão principal, na direção vertical. Neste momento, têm-se o estado passivo de tensões e é caracterizado pela expansão vertical do produto e contração horizontal (deformação plástica), sendo conhecido como pressões dinâmicas (Figura 15) (Paula, 2020). Acredita-se que estados não uniformes de tensão em silos de grãos sejam a causa de muitas falhas estruturais (Kobyłka et al., 2020).

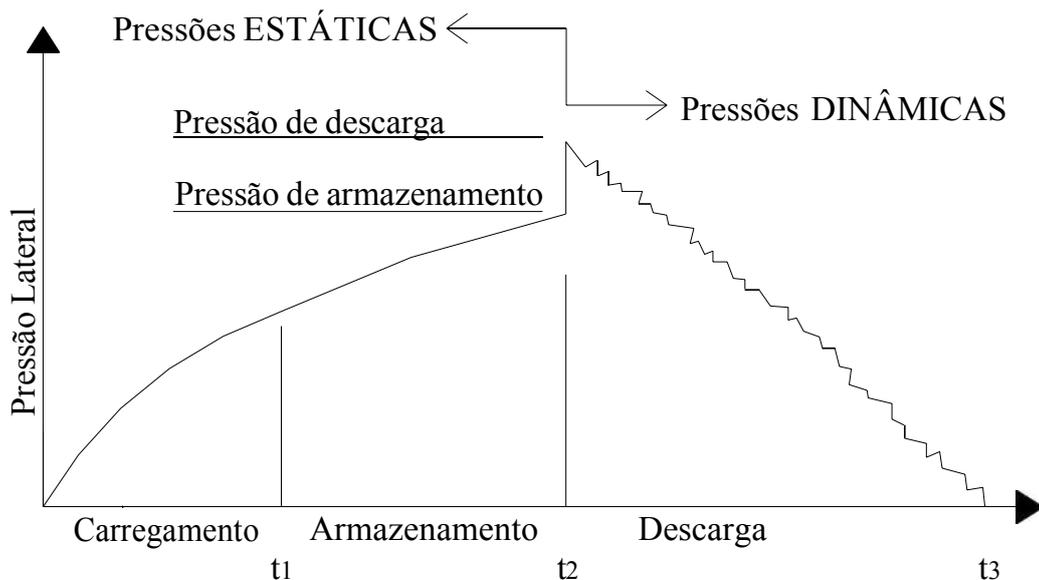


Figura 15. Pressões atuantes nas paredes do silo nas fases de carregamento, armazenamento e descarga. Fonte: Deckers (2014).

3.4.1. Pressões em silos verticais

Como a integridade estrutural do silo depende da quantidade de pressão exercida pelo material armazenado, é fundamental compreender e quantificar as pressões no projeto (Oginni & Fasina, 2018). Nas paredes verticais atuam pressões normais e paralelas, denominadas pressões horizontais (p_h) e pressões de atrito (p_w), respectivamente. No fundo do silo atuam as pressões verticais (p_v), sendo decompostas em pressões normais (p_n) e tangenciais (p_t) às paredes da tremonha (Figura 16).

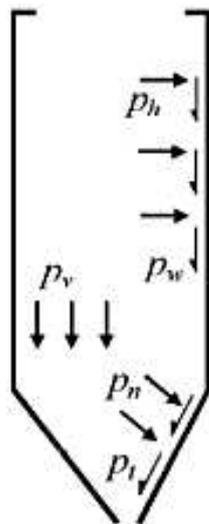


Figura 16. Pressões geradas pelo produto armazenado. Fonte: EN 1991-4 (2006).

A pressão de atrito é distribuída na superfície das paredes e equilibra parte do peso do produto, resultando em esforços de compressão nas paredes (Palma & Calil Junior,

2008). As pressões horizontais exercidas nas paredes pelo produto não aumentam indefinidamente com a altura do silo, como ocorrem no caso das pressões hidrostáticas, justamente pela existência deste atrito, fazendo com que apresentem um crescimento que tende a uma assíntota (Figura 17).

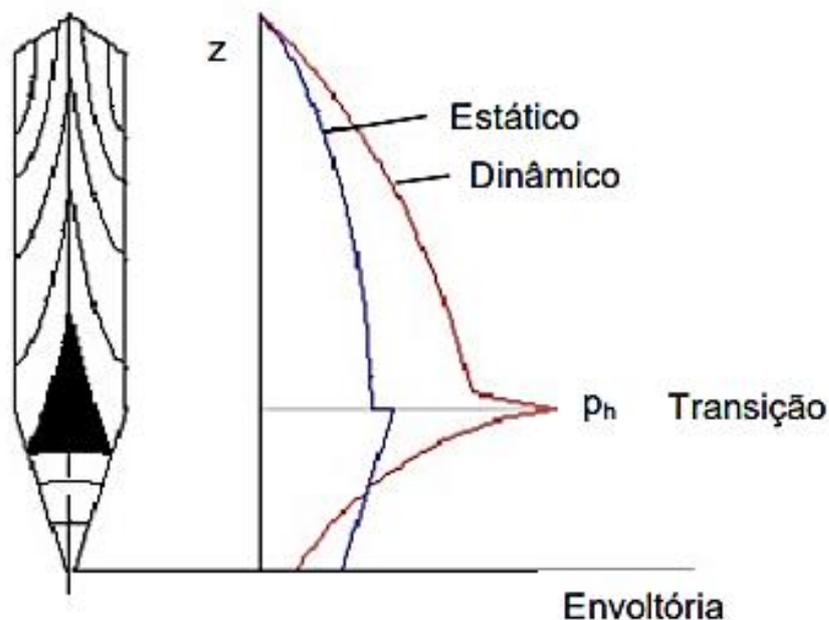


Figura 17. Pressões estática e dinâmica em silo. Fonte: Palma (2005).

A determinação da magnitude e distribuição das pressões durante a descarga é particularmente desafiadora, pois a pressão tende a exibir flutuações significativas e suas distribuições ao longo das paredes do silo dependem intimamente do padrão de fluxo desenvolvido ao longo do silo (Wang et al., 2015), exigindo previsões mais conservadoras na ocorrência de tremonha excêntrica.

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

Lopes Neto et al. (2014) analisaram as forças verticais e de atrito em silo cilíndrico com fundo plano, sendo carregado concentricamente e descarregado concêntrica e excêntrica, a partir de duas excentricidades, com os valores experimentais confrontados com os prescritos pelas normas ENV 1991-4, ISO 11697, AS 3774 e DIN 1055. Os autores observaram que em comparação à força de atrito no descarregamento concêntrico e excêntrico a 75%, as descargas múltiplas produziram valores cerca de 30% superiores e que descarga excêntrica apresentaram seus valores subestimados por todas as normas na profundidade de 1,00 m com uma diferença de até 48,8%.

A abertura do orifício de descarga gera uma diminuição na pressão vertical que pode ser acompanhada por um aumento na pressão horizontal dependendo da relação altura-diâmetro (H/D), geometria e do tamanho do silo, sendo encontrados picos de pressão na faixa de 1,1 a 3,9 (Kobyłka et al., 2017).

As pressões geradas por grãos de trigo em um silo cilíndrico metálico de paredes lisas com relação H/D igual a 2, foram máximas nos primeiros segundos da descarga, atingindo diferenças acima de 20% entre as fases estática e dinâmica (Ruiz et al., 2012). Para silo metálico de relação H/D igual a 3 com tremonha, os maiores valores de pressão foram obtidos no início do descarregamento, com diferença para as pressões estáticas de aproximadamente 22% (Wójcika et al., 2012).

A variação do fluxo durante a descarga implica em variação de pressão não associada e o estado de sobrepressão durante a descarga deve-se principalmente à compactação do produto em determinadas áreas do silo e em muito menor grau à dilatação, além disso, valores de pressão obtidos durante a descarga podem ultrapassar, em alguns casos, os fornecidos pelo método de cálculo propostos pelas normas estrangeiras (Couto et al., 2013a e 2013b).

Apesar da predição das pressões estáticas e dinâmicas constituírem objeto de estudo por vários pesquisadores e muito progresso tenha sido alcançado, ainda não podem ser perfeitamente estimadas (Sun et al., 2018), entretanto, algumas metodologias de cálculos são aceitas por apresentarem boa aproximação, destacando-se as formulações desenvolvidas por Janssen (1985), Reimbert et al. (1943), Jenike et al. (1973) e Walker (1966).

3.5. Teoria de Janssen (1895)

Em 1895, com base nos fatos de que a propagação de tensões em uma coluna granular raramente é isotrópica e o atrito desempenha papel importante em materiais sólidos armazenados, Janssen desenvolveu uma teoria para o cálculo das pressões que ocorrem em silos (Lei et al., 2019). A equação de Janssen é a abordagem mais antiga e mais utilizada no projeto de silos. Foi considerada como a primeira equação na condução da equação diferencial para o equilíbrio de uma camada sólida em um silo (Hilal et al., 2022). Neste trabalho será somente apresentada a formulação de modo resumido e sucinto.

Seu estudo baseou-se em silos quadrados de secção transversal de área (A) e perímetro (U) no qual, por meio da análise de uma parte infinitesimal do produto

armazenado de peso específico uniforme (γ) e altura (d_z), obtiveram-se as pressões via equilíbrio de forças (Figura 18). Atuam nessa parcela as pressões horizontais (p_h), de atrito do produto com a parede (p_w), pressões verticais acima (p_v) e abaixo da camada ($p_v + \frac{\partial p_v}{\partial z} \cdot dz$). Seu modelo apresenta algumas premissas básicas (Horabik et al., 2016; Lei et al., 2019; Hilal et al., 2022):

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

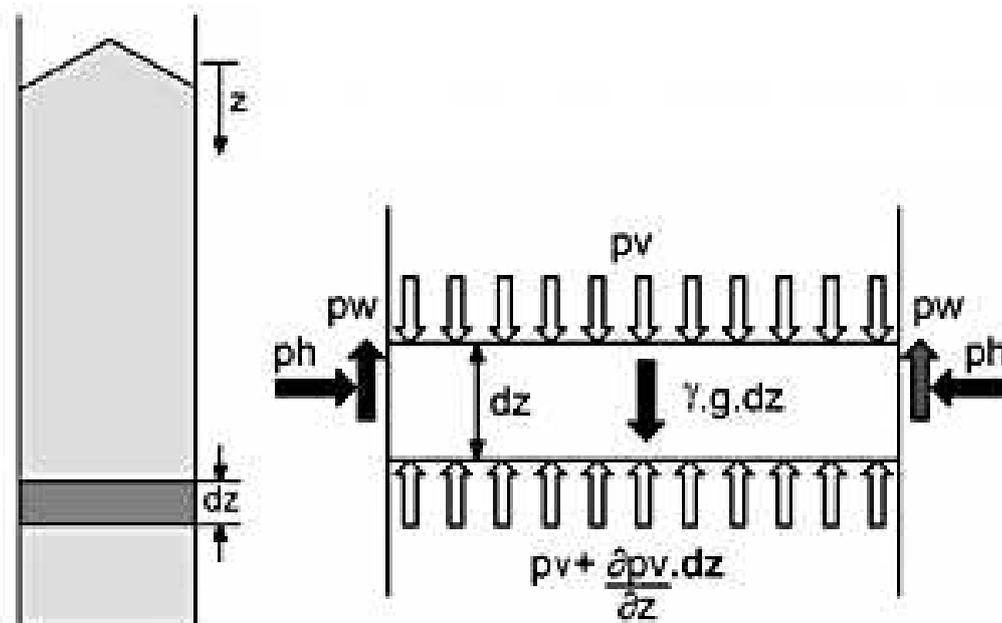


Figura 18. Forças atuantes em uma camada infinitesimal no produto armazenado. Fonte: Madrona (2008).

Sendo:

- z - ordenada com base na camada infinitesimal (m);
- γ - peso específico do produto armazenado (kN m^{-3});
- g - aceleração da gravidade (m s^{-2}).

Obtêm-se o equilíbrio das forças verticais atuantes nessa camada infinitesimal de altura d_z e peso específico γ pela Equação 01:

$$p_{hf} \cdot \mu_w \cdot dz \cdot U + (p_{vf} + p_{d_{vf}} - p_{vf}) A - \gamma \cdot A \cdot dz = 0 \quad (\text{Eq. 01})$$

A equação de Janssen (Eq. 02) é obtida rearranjando os termos da Equação 01, considerando a condição de contorno $p_{vf}(0) = 0$ e substituindo $K \cdot dp_{vf}$ por dp_{hf} . Conhecida como fórmula de Janssen para o cálculo teórico da pressão horizontal, a partir da qual são obtidas as pressões vertical e de atrito (Ito, 2016).

$$p_{hf}(z) = \frac{\gamma}{\mu_w} \cdot \frac{A}{U} \left(1 - e^{-z \cdot K \cdot \mu_w \cdot \frac{U}{A}} \right) \quad (\text{Eq. 02})$$

Em que:

p_{hf} - pressão horizontal estática após o enchimento do silo (kN m^{-2});

γ - peso específico do produto armazenado (kN m^{-3});

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

A - área da seção transversal do silo (m^2);

U - perímetro da seção transversal do silo (m);

Z - ordenada com base na camada infinitesimal (m);

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

O valor empírico para K é representado por:

$$K = \frac{1 - \sin \phi_i}{1 + \sin \phi_i} \quad (\text{Eq. 03})$$

A pressão vertical estática (Eq. 04) pode ser calculada a partir da equação anterior como supracitado, pois $p_{vf} = \frac{p_{hf}}{K}$.

$$p_{vf}(z) = \frac{\gamma}{K \cdot \mu_w} \cdot \frac{A}{U} \left(1 - e^{-z \cdot K \cdot \mu_w \cdot \frac{U}{A}} \right) \quad (\text{Eq. 04})$$

A pressão de atrito nas paredes é dada pela Equação 05, podendo ser expressa por metro quadrado de superfície de parede do silo (Eq. 06), sendo essa pressão a responsável por causar compressão nas paredes do silo e equilibrar parte do peso produto armazenado. Conseqüentemente, fazendo com que as pressões horizontais não aumentem linearmente com a profundidade, tal qual aconteceria em um reservatório submetido a uma carga hidrostática (Paula, 2020).

$$p_{wf}(z) = \mu_w \cdot p_{hf}(z) \quad (\text{Eq. 05})$$

$$p_{wf}(z) = \gamma \cdot \frac{A}{U} \left(1 - e^{-z \cdot K \cdot \mu_w \cdot \frac{U}{A}} \right) \quad (\text{Eq. 06})$$

A formulação básica para a previsão das pressões durante o carregamento nas normas estrangeiras é obtida da teoria de Janssen (Goodey et al., 2017). Todavia, esse ponto em comum não implica que as normas apresentem as mesmas pressões estáticas para um determinado produto a armazenar, pois a equação de Janssen é função de quatro variáveis, sendo três dependentes das propriedades intrínsecas ao produto: densidade, coeficiente de atrito com a parede e a relação entre pressões horizontais e verticais (fator K); e a quarta variável dependente da geometria do silo (raio hidráulico).

Muitas normas estrangeiras de previsão de pressões em silos também adotam a teoria de Janssen para a determinação das pressões dinâmicas (devidas ao descarregamento), aplicando-se coeficientes de majoração as pressões estáticas (Paula, 2020), apesar de existirem, são divergentes nas recomendações, refletindo diretamente nas discrepâncias observadas em trabalhos de pesquisas, falhas de projetos e grande ocorrência de colapsos estruturais (Ito, 2016).

Contudo, estudos sobre pressões em silos mostram que desvios significantes da distribuição de pressão de Janssen podem ocorrer, ocorrendo em alguns casos justamente o contrário à suposição da teoria de Janssen, os quais têm sido atribuídos a diversos fatores, como não homogeneização dos produtos armazenados, variação da rugosidade das paredes e da presença de imperfeições geométricas na parede do silo (Diniz & Nascimento, 2006; Lei et al., 2019).

Originalmente, o modelo de Janssen foi estabelecido para silos muito esbeltos, pois negligencia qualquer efeito do tipo de fundo como uma condição de contorno. Evesque & de Gennes (1998) *apud* Saleh et al. (2018) definiram uma altura característica abaixo da qual o modelo de Janssen não é válido. Para silos baixos a pressão vertical média foi considerada mais alta do que a prevista por este modelo, impondo-se a conclusão de que os ensaios efetuados por Janssen resultam em pressões notavelmente inferiores as obtidas na realidade (Saleh et al., 2018).

3.6. Teoria de Jenike et al. (1973)

Jenike e colaboradores foram os primeiros pesquisadores que apresentaram uma teoria para explicar o efeito das sobrepressões que surgem no momento da descarga do

silos, baseando-se na teoria do balanço de energia. Quando o silo está sendo carregado, o produto se comprime verticalmente sem deformação horizontal, desenvolvendo campo ativo de tensões, com a maior tensão principal atuando na direção vertical ao longo do eixo do silo, aproximando-se da horizontal próximo das paredes.

Durante o armazenamento, constata-se que as pressões no corpo do silo aumentam com a profundidade de acordo com as expressões formuladas por Janssen, apresentando descontinuidade na transição entre corpo e tremonha. As pressões na tremonha dependem principalmente de sua inclinação.

A abertura do orifício de descarga gera uma mudança no estado de equilíbrio do produto, dando início ao estado passivo de tensões, caracterizado pela redução das pressões verticais no fundo do silo.

Em silos com fluxo de massa, a transição do estado ativo para o estado passivo ocorre na altura da transição, gerando um pico de pressões neste local, denominado “*switch*”. Em silos com fluxo de funil, o produto flui formando um canal no interior do silo, com zonas do produto estático adjacente à parede da tremonha. No local onde o canal de fluxo intercepta a parede, ocorrerá um pico de pressões (*switch*). A posição deste pico não pode ser prevista com exatidão pois depende das propriedades físicas dos produtos. Portanto, toda a parede vertical deve ser dimensionada para resistir este pico.

A localização do pico de pressão na mudança do estado ativo para o estado passivo é de difícil determinação. Ele pode ocorrer na parede vertical, mesmo em silos com fluxo de massa, devido a pequenas imperfeições na parede. Segundo Jenike et al. (1973) o canal de fluxo em silos com relação H/D inferior a 2 e com fundo plano, raramente intercepta a parede e caso interceptasse, ele seria insignificante. Portanto, nesse caso específico, a estrutura do silo pode ser projetada considerando o silo com fluxo de massa, com a teoria de Janssen para a predição das pressões.

No caso estático, Jenike et al. (1973) mostraram por meio de experimentos, que a formulação proposta por Janssen fornece bons resultados para as pressões no corpo do silo quando comparados aos resultados da teoria do balanço de energia. Portanto, recomendam que no caso estático as pressões no corpo do silo sejam determinadas pela teoria de Janssen com $K=0,4$, independente do fluxo do silo (massa ou funil). O emprego de $K=0,4$ para todos os materiais armazenados (Jenike et al, 1973) pode ser justificado para silos esbeltos, onde K tem pequeno efeito, mas em silos baixos é necessária maior precisão (Calil Júnior, 1990).

Em contrapartida, na condição dinâmica para silos com fluxo de massa Jenike et al. (1973) recomendam que as pressões sejam calculadas considerando a segunda lei da termodinâmica, baseada no princípio de que a energia interna de um sistema tende a ser minimizada. Dado a complexidade de obtenção das pressões a partir deste método, em Jenike et al. (1973) são apresentados gráficos para a determinação das envoltórias da pressão horizontal sob condições de fluxo.

Neste trabalho será somente apresentada a formulação de modo resumido e sucinto da Teoria de Jenike et al. (1973). A pressão horizontal dinâmica em silos com fluxo de massa é dada pela Equação 07:

$$p_{he}(z) = \left(\frac{\gamma R}{\mu_{eff}} \right) \cdot \left(1 - (\partial - \omega) \cdot \frac{\mu_{eff}}{M^{m_c}} \right) \quad (\text{Eq. 07})$$

Em que:

p_{he} - Pressão horizontal dinâmica;

R - Raio da seção transversal;

μ_{eff} - Coeficiente de atrito efetivo.

Onde ∂ e ω são dados pelas Equações 08 e 09:

$$\partial = \frac{-(K \cdot M^{m_c - 1}) \cdot (S_0 - N) \cdot e^{-j} + M^{m_c} \cdot (\mu_{eff}^{-1} - K \cdot N)}{(K \cdot M^{m_c + 1}) \cdot e^j - (K \cdot M^{m_c - 1}) \cdot e^j} \quad (\text{Eq. 08})$$

$$\omega = S_0 - N - \partial \quad (\text{Eq. 09})$$

Sendo j e S_0 obtidos por:

$$j = \frac{\mu_{eff}}{M^{m_c} \cdot R} \cdot (H - z) \quad (\text{Eq. 10})$$

$$S_0 = \frac{1}{\mu_{eff} \cdot K} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\mu_{eff} \cdot K \cdot z}{R}} \right) \quad (\text{Eq. 11})$$

As constantes M e N são dadas pelas Equações 12 e 13:

$$M = \sqrt{2 \cdot (1 - \nu)} \quad (\text{Eq. 12})$$

$$N = \frac{2 \cdot \nu}{\mu_{eff} \cdot M^{2 \cdot (1 - m_c)}} \quad (\text{Eq. 13})$$

Considera-se que:

v - é igual a 0,3 para fluxo assimétrico;

v - é igual a 0,2 para fluxo plano;

mc - é igual a 0 para fluxo assimétrico; e

mc - é igual a 1 para fluxo plano.

Em contrapartida, na condição dinâmica para silo com fluxo de funil, segundo a teoria de Jenike et al. (1973) o ângulo que o canal de fluxo forma com o eixo vertical exerce influência na intensidade do pico das pressões dinâmicas. Deste modo, para o dimensionamento de silos com fluxo de funil, deve-se construir uma envoltória de pressões, com o cálculo dos picos de pressões para vários valores de z .

Nas pressões dinâmicas para o fluxo de funil, o produto armazenado cumpre papel de tremonha, e sua intensidade no local de transição, onde há o pico de pressões denominado “*switch*”, tem seu valor de pressão horizontal definido por:

A intensidade dos picos de pressão é dada pela Equação (14):

$$p_{he}(z) = \lambda \cdot p_{ve}(z) \quad (\text{Eq. 14})$$

Em que:

$p_{ve}(z)$ - pressão vertical dinâmica calculada com a teoria de Janssen, considerando $k = 0$, 4).

λ para tremonhas de eixo simétrico:

$$\lambda = \frac{(24 \cdot \text{tg}(\alpha_f) + \frac{\pi}{q}) \cdot (1 - \text{sen}(\varnothing_e) \cdot \text{tg}(\alpha_f))}{16 \cdot (\text{sen}(\varnothing_e) + \text{tg}(\alpha_f))} \quad (\text{Eq. 15})$$

Com:

$$q = \frac{\pi}{24 \cdot \text{sen}(\alpha_f)} \cdot \left[\frac{2 \cdot Y}{(X-1) \cdot \text{sen}(\alpha_f)} \cdot (\text{tg}(\alpha_f) + \text{sen}(\varnothing_e)) - 1 \right] \quad (\text{Eq. 16})$$

$$X = \frac{2^m \cdot \text{sen}(\varnothing_e)}{1 - \text{sen}(\varnothing_e)} \cdot \left[\frac{\text{sen}(2\beta + \alpha_f)}{\text{sen}(\alpha_f)} + 1 \right] \quad (\text{Eq. 17})$$

$$Y = \frac{(2-2\cos(\beta+\alpha_f))^m (\beta+\alpha_f)^{1-m} \text{sen}(\alpha_f) + \text{sen}(\beta) \text{sen}^{1+m}(\beta+\alpha_f)}{(1-\text{sen}(\phi_e)) \cdot \text{sen}^{2+m}(\beta+\alpha_f)} \quad (\text{Eq. 18})$$

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot \left[\phi_w + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}(\phi_w)}{\text{sen}(\phi_e)} \right) \right] \quad (\text{Eq. 19})$$

Jenike et al. (1973) consideram que em silos com fluxo tipo funil, o campo de pressões no corpo da estrutura estende-se até a tremonha, deste modo:

$$p_{ne}(z) = p_{he} \cdot (h_c) \cdot \left[\left(\frac{\text{sen}^2(\alpha)}{K} + \cos^2(\alpha) \right) + \left(\frac{2r}{D} \cdot \mu_w \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \right) \right] \quad (\text{Eq. 20})$$

$$p_{te} = p_{he}(h_c) \cdot \left[\left(\frac{1}{K} - 1 \right) \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot \cos(\alpha) + \frac{2r}{D} \cdot \mu_w \cdot \left(\cos^2(\alpha) - \frac{\text{sen}^2(\alpha)}{K} \right) \right] \quad (\text{Eq. 21})$$

Em que:

r - coordenada radial; e

p_{he} - Pressão horizontal dinâmica de Janssen para $z = h_c$.

A força de atrito com a parede (p_{we}), calculada para os dois tipos de fluxo, pode ser definida como (Eq. 22):

$$p_{we}(z) = \frac{\gamma \cdot D^2}{4} \cdot \left(\frac{z}{D} - \frac{Ae^x + Be^{-x} + N}{4} \right) \quad (\text{Eq. 22})$$

Em que:

p_{we} - Pressão de atrito dinâmica com a parede.

Os valores de M e N são definidos respectivamente pelas Equações 12 e 13, descritas anteriormente. Os demais parâmetros, são obtidos através das Equações 23 a 26.

$$K_h = K_0 = \frac{v}{1-v} \quad (\text{Eq. 23})$$

$$x = \frac{\mu_w \cdot z}{M^{m_c} \cdot R} \quad (\text{Eq. 24})$$

$$A = \frac{-(K_h \cdot M^{m_c} - 1) \cdot (-N) \cdot e^{-x} + M^{m_c} \cdot (\mu^{-1} \cdot K_h \cdot N)}{(K_h \cdot M^{m_c} + 1) \cdot e^{-x} - (K_h \cdot M^{m_c} - 1) \cdot e^{-x}} \quad (\text{Eq. 25})$$

$$B = -A - N \quad (\text{Eq. 26})$$

3.7. Teoria de Rankine-Calil (2005)

A magnitude e distribuição da pressão normal às paredes em silos baixos não é investigada minuciosamente como em silos esbeltos (Xu e Liang, 2022). Calil Júnior (1990) afirma que de uma perspectiva técnica, os silos de baixa relação H/D dificilmente apresentam problemas de estabilidade geral, contudo, muitos problemas de estabilidade local. Silos baixos com descarregamento concêntrico não estão sujeitos a significativas redistribuições de pressões durante a fase dinâmica. As pressões em silos baixo são afetadas consideravelmente pela forma da superfície livre do produto armazenado, o que não tem a mesma influência em silos esbeltos. Mas, de um modo geral, os códigos normativos vigentes não levam em consideração as implicações desse fato, de tal modo que sejam obtidas formulações mais conservadoras e menos econômicas (Sun et al., 2018).

Para silos baixos, a validade da solução de Janssen ou Reimbert são questionadas na literatura, sendo proposta a solução de Rankine, desenvolvida para uma parede de contenção de terra de extensão ilimitada (Calil Júnior, 1987). Como mencionado na Introdução do presente trabalho (Tópico 1), isto é também reconhecido pela norma alemã DIN 1055-6 (DIN, 2005), que indica que as pressões nas paredes sejam obtidas pela teoria das pressões de terra para $H/D < 0,8$ e pela norma europeia EN 1991-4:2006 que sugere a aplicação do modelo de Reimbert modificado para silos baixos ($0,4 < H/D \leq 1,0$).

O pesquisador Calil Jr. (1987) com base em experimentação em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro, propôs a modificação do valor de K da teoria de Rankine para a formulação de Hartmann (Eq. 27). Esta proposta foi denominada no trabalho de Freitas e Calil Júnior (2005) de teoria de Rankine-Calil, sendo válida para silos onde a superfície livre do produto é plana ou não.

Sendo assim, para silos de baixa relação H/D, essa teoria considera que a profundidade z é obtida a partir da superfície de referência, conforme apresentado na Figura 19.

$$K = \frac{1 - \text{sen}^2 \varnothing_i}{1 + \text{sen}^2 \varnothing_i} \quad (\text{Eq. 27})$$

Em que:

\varnothing_r – Ângulo de atrito interno do produto armazenado (°).

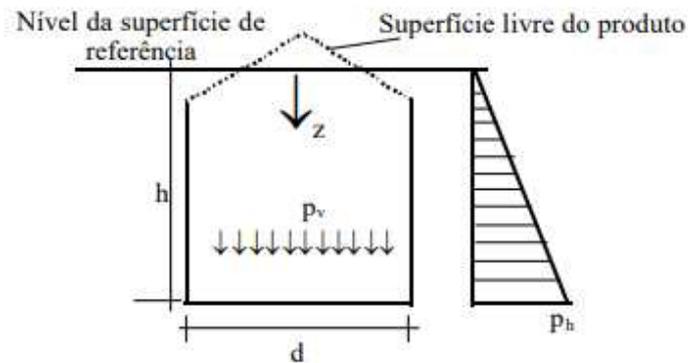


Figura 19. Pressões exercidas pelo produto em silos baixos de fundo plano, de acordo com a teoria de Rankine-Calil. Fonte: Freitas e Calil Júnior (2005).

De acordo com as seguintes situações em relação à superfície livre do produto, as formulações para as pressões horizontais e verticais são obtidas da seguinte maneira:

a) Superfície livre do produto armazenado horizontal (plana):

Pressão horizontal estática na profundidade z

$$p_h = K\gamma z \quad (\text{Eq. 28})$$

Em que:

K – Relação entre as pressões horizontais e verticais do silo (adimensional), sendo obtido pela Eq. 27;

γ - Peso específico do produto armazenado (kN m^{-3});

z – Profundidade (m);

Pressão vertical estática na profundidade z

$$p_v = \gamma z \quad (\text{Eq. 29})$$

b) Superfície livre do produto armazenado com inclinação igual ao ângulo de repouso (plana):

Pressão horizontal estática na profundidade z

$$p_h = \gamma z \cos^2 \phi_r \quad (\text{Eq. 30})$$

Em que:

ϕ_r – Ângulo de repouso do produto ($^\circ$).

Pressão vertical estática na profundidade z

$$p_v = \gamma(z + a_0 \tan \phi_r) \quad (\text{Eq. 31})$$

3.8. Medições das pressões em silos

A avaliação das pressões causadas pela descarga de produtos granulares em silos cilíndricos continua a representar um desafio científico significativo, mesmo na de equipamentos de medição avançados e acesso a alto poder de computação (Sadowski et al., 2020). Uma alternativa para estimar as pressões é o emprego de simulações, contudo, há divergências nos resultados, um sendo necessário procedimento de validação experimental para garantir a qualidade dos resultados obtidos (Ramírez-Gómez, 2020).

O estudo do comportamento das pressões nas condições estáticas e dinâmicas em função do produto armazenado tem sido possibilitada através da instrumentação dos silos com sensores de pressão (Paula, 2020). As células de pressão encontraram grande aplicação no estudo do comportamento dos meios granulares e pulverulentos destinados ao armazenamento agrícola e industrial, podendo ser utilizadas de forma satisfatória no conhecimento da distribuição de pressão nas paredes do silo com resultados de campo confiáveis (Ramírez et al., 2010), tornando-se possível minimizar os aspectos limitantes ao projeto dessas estruturas, contribuindo para uma futura e adequada padronização dos projetos de silos e, assim, mitigar os problemas de colapsos (Fank et al., 2018).

3.9. Códigos Normativos para projeto de silos

Apesar das normas vigentes para dimensionamento de silos, existem muitas lacunas no estado atual do conhecimento sendo imprescindíveis pesquisas adicionais sobre o tema (Fank et al., 2015, Lei et al., 2019). As normas ANSI/ASAE EP433.1:2019 e EN 1991-4:2006 são largamente recomendadas para dimensionamento e pesquisas, em função de sua eficácia.

Como supracitado, para se determinar as pressões estáticas na parede do silo, todas as normas estudadas baseiam-se na teoria de Janssen (1985). Com uma falta geral de compreensão e informações sobre o processo de descarga, a maioria dos padrões definiu a pressão de descarga do silo usando simplesmente um multiplicador aplicado à pressão de enchimento com base na teoria de Janssen e suas versões modificadas (Wang et al., 2015). Os coeficientes são determinados de formas distintas entre as normas, com algumas fornecendo valores fixos e outras utilizando equações empíricas.

Constata-se que nenhum procedimento de cálculo presente nas normas vigentes leva em consideração os efeitos da dilatância do produto, mudança do estado de tensão, variação da sobrepressão ao longo da altura do silo, entre outros efeitos que influenciam na magnitude e distribuição das pressões.

A determinação das pressões na tremonha pelas normas estrangeiras ANSI/ASAE EP433.1:2019 e EN 1991-4:2006, são calculadas pela soma dos carregamentos devidos ao enchimento da tremonha e aos carregamentos resultantes da sobrecarga vertical diretamente acima da transição. No cálculo das pressões, as normas sugerem a aplicação de equações variadas próprias.

Entre os códigos normativos, a europeia EN 1991-4: 2006 e australiana AS 3774-1996 são mais abrangentes pois abordam fatores de carregamento e descarregamento para diferentes geometrias de silo, em contrapartida, a americana ANSI/ASAE EP433.1:2019 foca apenas na geometria simétrica de cone, excluindo as formas em cunha e pirâmides (Maraveas, 2020).

Estudo envolvendo ensaios em um silo metálico protótipo com relação H/D igual a 0,98 (produto armazenado: milho em grãos) e um silo piloto para relações H/D iguais a 0,98, 1,25 e 1,49, respectivamente (produto armazenado: areia), ambos de fundo plano, evidenciaram que as formulações previstas pela norma americana e a norma europeia ISO, para a previsão das pressões verticais na base do silo, não se mostraram adequadas comparativamente aos valores obtidos experimentalmente, tanto no silo protótipo quanto nas três relações H/D ensaiadas com o silo piloto (Freitas & Calil Júnior, 2005).

Nas mesmas condições, os valores das pressões horizontais corroboram com o comportamento das verticais, sendo os dados experimentais superiores aos obtidos com as normas analisadas em até 110% no silo protótipo e, no silo piloto, de até 53%, na relação H/D igual a 0,98; 43%, na relação H/D igual a 1,25 e 46%, na relação H/D igual a 1,49, salientando-se que essas diferenças percentuais obtidas entre os valores teóricos e os experimentais constitui uma das razões do grande número de acidentes com silos de baixa relação altura/diâmetro que ocorrem em todo o mundo (Freitas & Calil Júnior, 2005). Denota-se, portanto, que para silos baixos a maioria das normas estrangeiras não demonstram-se adequadas para a previsão de pressões horizontais estáticas, sobretudo no terço inferior da parede do silo.

O comparativo entre pressões obtidas experimentalmente em silos com relação altura/diâmetro igual a 1 e fundo plano com as encontradas teoricamente por meio da norma estrangeira ISO 11697, demonstram que a pressão horizontal de carregamento apresenta desvio significativo em relação a norma, não sendo compatível com as calculadas pelo código normativo (Diniz & Nascimento, 2006).

O estudo de pressões em um silo metálico ligeiramente esbelto para armazenamento de milho em grãos, apresentando carregamento e descarregamento concêntricos resultou

em pressões estáticas superiores as pressões calculadas pela normativa ANSI/ASAE EP433.1:2019 e inferior à norma teórica EN 1991-4 (2006), sendo o valor de pressão uniforme calculado pelo padrão europeu 11,79% maior e o padrão americano 36,28% menor que o experimental (Fank et al., 2018). No descarregamento, as pressões experimentais sofreram redução em relação às do carregamento, evidenciando a não ocorrência de sobrepressão, a padronização da distribuição das pressões exercidas no fundo do silo pela massa de grãos, a norma americana leva a valores mais realistas e as pressões padronizadas pelos códigos EN 1991 superestimam os valores experimentais (Fank et al., 2018).

3.9.1 European Committee of Standardization - EN 1991-4 (2006)

A EN 1991-4 fornece orientações de projeto para a avaliação de ações para o projeto estrutural de silos e tanques. Deve-se usar esta norma somente quando os silos se enquadrarem nos seguintes casos:

- Silos com seções transversais como as mostradas na Figura 20; embora pequenas variações possam ser aceitas desde que sejam consideradas as consequências estruturais das mudanças de pressão resultantes;

- Onde carregamento produz efeitos de inércia e cargas de impacto desprezíveis;

- O diâmetro máximo do material a ser armazenado não for maior que $0,3d_c$ (diâmetro inscrito do silo);

- A excentricidade (e_i) do material armazenado devido ao carregamento deve ser menor que $0,25d_c$;

- A excentricidade do centro da descarga (e_a) deve ser menor que $0,25d_c$, nenhuma parte da descarga deverá estar a uma distância maior que $0,30d_c$ plano central para um silo com descarga alongada ou da linha de centro para os demais silos (Figura 20);

- A relação entre a altura e o diâmetro deve ser menor que 10 ($h/d_c < 10$), a altura deve ser menor que 100m ($h < 100$ m) e o diâmetro deve ser menor que 50m ($d_c < 50$ m).

Os principais termos empregados na norma europeia são definidos a seguir:

- Superfície Equivalente: Superfície horizontal a um nível que resulte o mesmo volume armazenado no silo com a superfície real. Os grãos dentro do silo formam cones na parte superior e a superfície equivalente resultaria do trabalho de nivelar a superfície superior encontrando-se o nível equivalente;

- Fundo plano: Silo com o fundo plano ou silo com fundo inclinado menor ou igual a 20° com a horizontal;

- Funil: Fundo de silo com paredes inclinadas com $\alpha > 20^\circ$;
- Tipo de Fluxo: Modo de fluir do material armazenado quando o fluxo estiver completamente estabelecido (com o silo próximo a sua capacidade máxima);
- Fluxo de Funil: Tipo de fluxo onde se produz um canal de fluxo de material dentro de uma zona confinada acima da saída enquanto o material adjacente a parede e próxima a saída permanece estagnado. O canal de fluxo pode interceptar a parede vertical ou estender-se até a superfície do material armazenado.
- Fluxo interno: Tipo de fluxo de funil onde o canal de fluxo se estende até a superfície do material armazenado;
- Fluxo de Massa: Tipo de fluxo em que todas as partículas armazenadas se movem durante o descarregamento;
- Material fluidizado: Material armazenado ao qual se injeta ar tendo como objetivo modificar significativamente o comportamento do fluxo;
- Silo de homogeneização: Silo que contém material fluidizado.;
- Sobrepressão na tremonha: Carga local produzida na transição (tremonha *versus* corpo do silo) durante o descarregamento;
- Transição: Interseção da tremonha com a parede vertical.

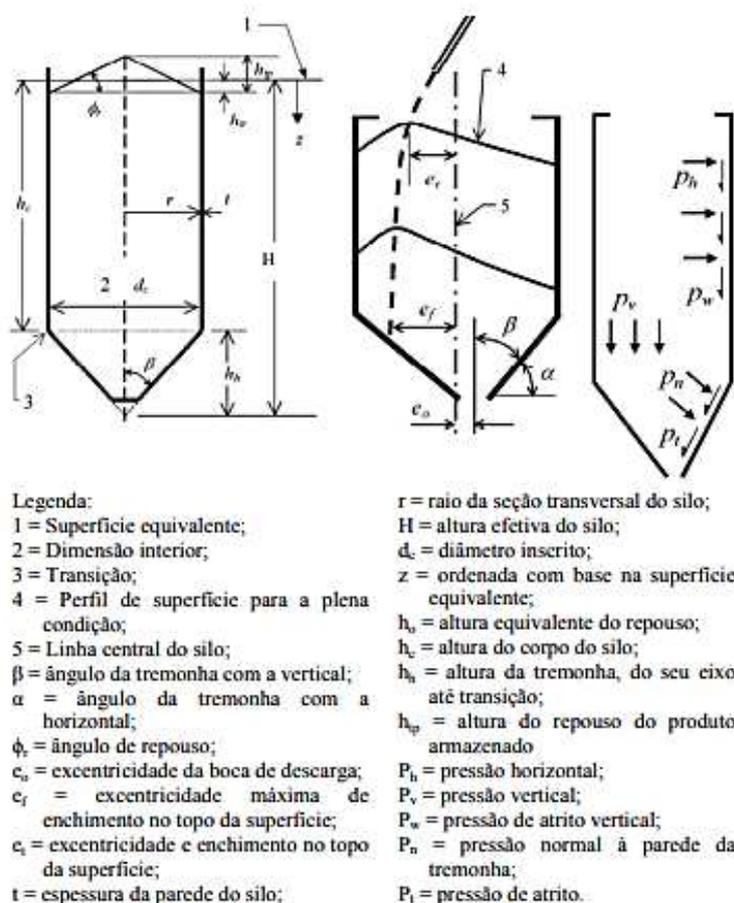


Figura 20. Parâmetros geométricos do silo. Fonte: EN 1991-4 (2006).

A norma europeia considera diferentes critérios para o projeto estrutural dos silos e por essa razão os silos são separados em classes de risco, seguindo os parâmetros indicados na Tabela 2.

A separação das estruturas segundo a classe de risco visa reduzir o risco de falha para as diferentes estruturas. A rigorosidade do método de cálculo recomendado para o projeto é compatível com a classe de confiabilidade. Assim, são permitidas simplificações para classes com menores riscos, enquanto para estruturas com maiores riscos, os cálculos são mais rigorosos. Nos silos de classe 3, por exemplo, é necessário fazer a determinação experimental das propriedades físicas e de fluxo do produto a ser armazenado, não sendo permitido o emprego dos valores das propriedades tabelados.

Para efeito de cálculo das pressões, recomenda-se uma faixa de variação das propriedades dos produtos, adotando-se os valores extremos a fim de se obter as combinações críticas para cada situação, conforme Tabela 3.

Tabela 2. Classificação dos silos em classes de risco.

RISCO	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	Silos com capacidade acima de 10000 toneladas Silos com capacidade acima de 1000 toneladas em que ocorre pelo menos uma das seguintes situações: (a) descarga excêntrica com $e_o / d_c > 0,25$ (b) silos quadrados com excentricidade de carregamento $e_t / d_c > 0,25$

Nota: e_o é excentricidade do orifício de descarga, d_c é diâmetro inscrito e e_t corresponde a excentricidade de enchimento no topo da superfície. Fonte: EN 1991-4 (2006).

A metodologia de cálculo das pressões estáticas e dinâmicas nas paredes do silo também varia de acordo com sua esbeltez, ou seja, segundo a relação H/D, uma vez que esta relação influencia significativamente as magnitudes e padrões de normalidade das tensões exercidas pelo produto armazenado nas paredes do silo e, conseqüentemente, também o comportamento estrutural do mesmo. Esta classificação encontra-se apresentada na Tabela 1.

A norma Eurocode trata sobre as pressões em silos em duas partes: a primeira aborda as pressões nas paredes verticais dos silos, enquanto a segunda trata sobre as pressões no fundo do silo. Na primeira parte, são relatadas as pressões de carregamento e descarregamento nas paredes para os silos conforme sua classificação quanto a esbeltez, ainda são apresentadas equações para o cálculo de sobrepressões, para as pressões de carregamento e descarregamento, que representam assimetrias causadas por excentricidades e imperfeições no processo de carregamento e podem variar entre pressões simétricas, assimétricas, locais ou globais.

A segunda parte trata sobre as pressões no fundo do silo, para silos de fundo plano, tremonhas íngremes e rasas. A norma ainda permite simplificações levando em conta a classe de risco do silo e sua esbeltez.

Tabela 3. Valores limites das propriedades dos produtos para cálculo de pressões.

Aplicação das propriedades		Peso específico (γ)	Ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w)	Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)	Razão das pressões (K)
Tipo de Fluxo	Funil	Inferior	Superior	Inferior	-----
	Massa	Inferior	Inferior	Superior	-----
Máxima pressão horizontal (p_h)		Superior	Inferior	Inferior	Superior
Máximo pressão vertical (p_v)		Superior	Inferior	Superior	Inferior
Máxima pressão de atrito (p_w)		Superior	Superior	Inferior	Superior
Pressões máximas da tremonha		Superior	Inferior	Superior	Inferior

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

Pressões de carregamento para silos baixos e medianamente esbeltos

A norma europeia define as mesmas formulações para as pressões de carregamento quando se trata de silos baixos e medianamente esbeltos. As pressões estáticas para silos baixos e medianamente esbeltos diferem da distribuição de pressões em silos esbeltos por serem nulas na altura $z = h_0$ e não em $z = 0$, ou seja, no ponto de contato entre a parede e o grão, como apresentado na Figura 21.

Os valores para pressões horizontal (p_{hf}), de atrito na parede (p_{wf}) e vertical (p_{vf}), são determinados pelas seguintes expressões (Equações 32 a 25):

$$p_{hf}(z) = p_{h0} \cdot Y_R(z) \quad (\text{Eq. 32})$$

$$p_{wf}(z) = \mu \cdot p_{h0} \cdot Y_R(z) \quad (\text{Eq. 33})$$

$$p_{vf}(z) = \gamma \cdot z_v(z) \quad (\text{Eq. 34})$$

Sendo:

$$p_{h_0} = \gamma \cdot K \cdot z_0 \quad (\text{Eq. 35})$$

$$z_0 = \frac{1A}{K\mu U} \quad (\text{Eq. 36})$$

$$Y_R(z) = (1,0 - \left\{ \left(\frac{z-h_0}{z_0-h_0} \right) + 1 \right\}^n) \quad (\text{Eq. 37})$$

$$n = -(1,0 + \tan\phi_r) \left(1 - \frac{h_0}{z_0} \right) \quad (\text{Eq. 38})$$

$$z_v = h_0 - \frac{1}{(n+1)} \left(z_0 - h_0 - \frac{(z+z_0-2h_0)^{n+1}}{(z_0+h_0)^n} \right) \quad (\text{Eq. 39})$$

Em que:

z - tem como a origem da coordenada vertical, obtida no centroide do talude formado pelo produto armazenado, denominada de altura de referência;

h_0 - é o valor de z para o ponto mais alto onde há contato do produto com a parede (conforme mostrado na Figura 21).

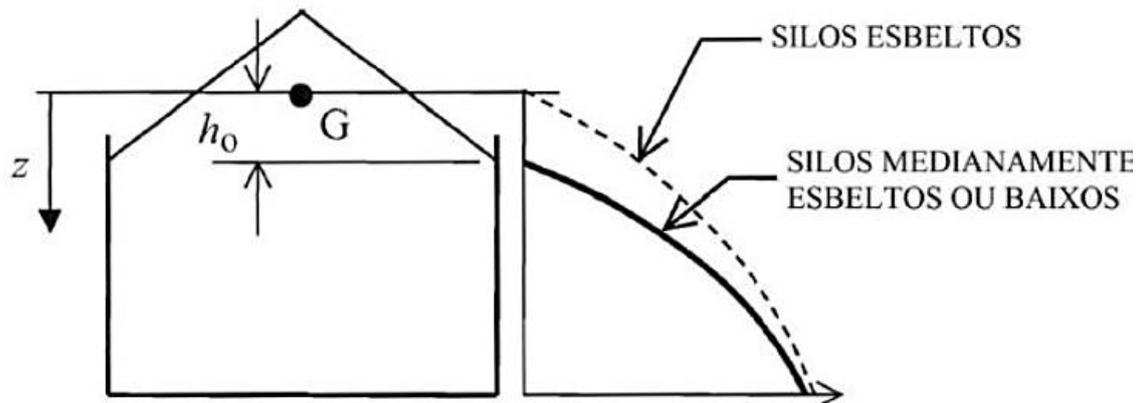


Figura 21. Pressões em silos esbeltos *versus* medianamente esbeltos/baixos. Fonte: Coelho (2016).

A sobrecarga para pressões de carregamento para silos baixos de qualquer classe de risco, além de silos de esbelteza intermediária de classe 1, é desconsiderada pela norma europeia.

Para casos de silos de esbelteza intermediária, pertencentes a classes 2 ou 3 de confiabilidade, a sobrecarga de carregamento (p_{pff}) deve ser calculada conforme metodologia proposta para silos esbeltos, para representar assimetrias acidentais de carregamento e pequenas excentricidades de carregamento.

Pressões de descarregamento para silos baixos

As pressões dinâmicas, são calculadas multiplicando as pressões de carregamento por fatores de sobrepressão. Contudo, para silos baixos a pressão dinâmica é idêntica à estática, não necessitando considerar a majoração obtida pelos fatores de descarga.

O código normativo indica que para silos baixos em todas as classes de risco, e silos de esbeltez intermediária classe 1, a sobrecarga seja desconsiderada ($C_{pff} = 0$).

Pressões de descarregamento para silos medianamente esbeltos

As pressões adicionais devem ser consideradas, pois sua ocorrência é inevitável. Mesmo em silos com carregamento centrado e eixo simétrico elas ocorrem devido às imperfeições na geometria das paredes da tremonha e do silo.

Também chamadas de pressões assimétricas, elas contribuem para a ocorrência de momentos de flexão. A norma EN 1991-4 (2006) propõe uma equação para as pressões localizadas atuando sobre qualquer parte do silo, no carregamento e na descarga. Para silos com diâmetro menor que 5,0 m, esta norma adota equações simplificadoras.

Como mencionado anteriormente, para silos de esbeltez intermediária classe 1, a sobrecarga é desconsiderada ($C_{pff} = 0$).

Para silos de esbeltez intermediária, classes 2 e 3, a sobrecarga de carregamento (p_{pff}) deve ser calculada conforme silos esbeltos para representar assimetrias acidentais de carregamento e pequenas excentricidades de carregamento. Entretanto, os fatores de descarregamento C_h e C_{ww} não são iguais aos dos silos esbeltos, sendo obtidos pelas Equações 40 e 41.

$$C_h = 1,0 + 0,15C_s \quad (\text{Eq. 40})$$

$$C_w = 1,0 + 0,10C_s \quad (\text{Eq. 41})$$

Em que:

C_s – Fator de ajuste de esbeltez (adimensional), sendo obtido pela Equação 42.

$$C_s = \frac{h_c}{d_c} - 1,0 \quad (\text{Eq. 42})$$

Pressões de carregamento para silos esbeltos

Os silos esbeltos, na norma europeia, são compostos de uma carga fixa conhecida como pressão estática simétrica (*symmetrical load*) (Figura 22) e uma carga variável

conhecida como pressão estática adicional (*patch load*) às quais devem ser tomadas como atuando simultaneamente.

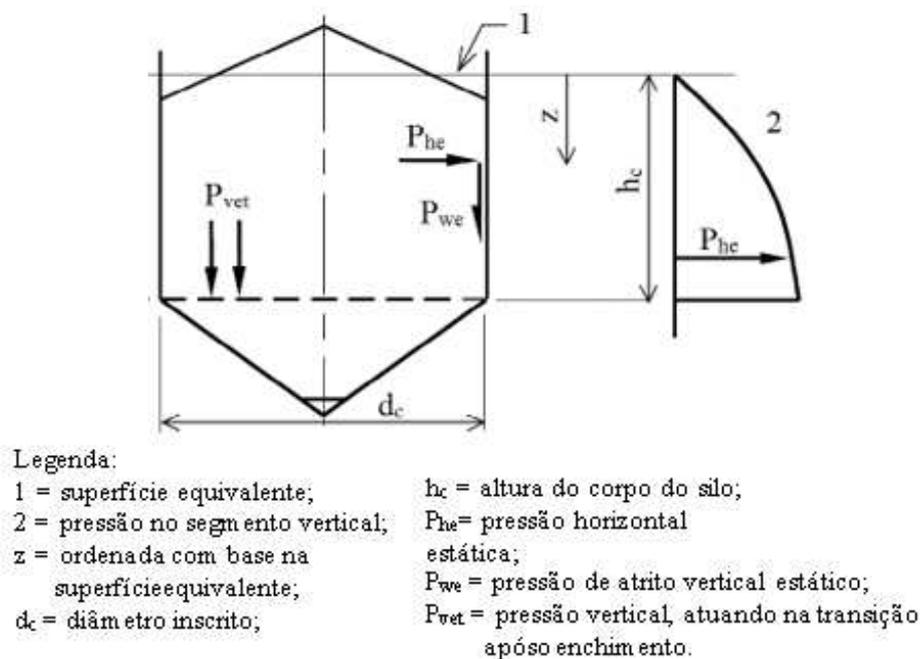


Figura 22. Pressão estática simétrica no corpo do silo. Fonte: EN 1991-4 (2006).

Deste modo, Além da distribuição de pressão calculada por Janssen, deve ser adotada uma pressão adicional (p_{pf}) com o objetivo de considerar incertezas provenientes de excentricidades acidentais durante o processo de enchimento do silo e imperfeições geométricas da parede. Porém, nos silos com classe 1 de confiabilidade a pressão estática adicional pode ser desconsiderada.

As pressões estáticas simétricas são obtidas pela teoria de Janssen (Equações 43, 44 e 45), utilizando os valores apropriados de μ_w , γ e K . Para os silos que se enquadram de Classe 1 de confiabilidade, o código recomenda adoção dos valores médios de μ e K , entretanto para silos de Classes 2 e 3 de confiabilidade, utilizam-se os valores inferiores e superiores de μ_w , γ e K , de acordo com a Tabela 3.

$$p_{hf}(z) = \frac{\gamma}{\mu_w} \cdot \frac{A}{U} \cdot (1 - e^{-z \cdot K \cdot \mu_w \cdot \frac{U}{A}}) \quad (\text{Eq. 43})$$

$$p_{vf}(z) = \frac{\gamma}{K \cdot \mu_w} \cdot \frac{A}{U} \cdot (1 - e^{-z \cdot K \cdot \mu_w \cdot \frac{U}{A}}) \quad (\text{Eq. 44})$$

$$p_{wf}(z) = \gamma \cdot \frac{A}{U} \cdot (1 - e^{-z \cdot K \cdot \mu_w \cdot \frac{U}{A}}) \quad (\text{Eq. 45})$$

A magnitude da pressão adicional estática ou de carregamento para silos esbeltos (p_{pf}) é dada pela Equação 46:

$$p_{pf} = C_{pf} \cdot P_{hf} \quad (\text{Eq. 46})$$

Em que:

p_{hf} - Pressão inicial de Janssen calculada na altura (z) igual à altura de aplicação da pressão adicional; e

C_{pf} - o coeficiente de pressão adicional estática ($C_{pf} \geq 0$), obtido pela Equação 47.

$$C_{pf} = 0,24 \cdot C_{op} \cdot [1 + 2 \left(\frac{\gamma z e f}{D} \right)^2] (1 - e^{-1,5 \left\{ \frac{h_c}{D} \right\} - 1}) \quad (\text{Eq. 47})$$

Em que:

C_{op} - Coeficiente do produto armazenado, variando em função do tipo de produto.

Para o milho C_{op} é igual a 0,9.

Em silos cilíndricos de paredes rígidas, a pressão adicional é constante e atua em áreas posicionadas em lados opostos do silo, ao passo que, em silos cilíndricos de paredes finas, sua intensidade varia de um valor máximo (p_{pf}) até um valor mínimo ($-p_{pf}$), (Figura 23). Esta variação de intensidade é expressa em termos de uma distribuição de pressões assimétrica (p_{pfs}), obtida pela Equação 48.

$$p_{pfs} = p_{pf} \cdot \cos \theta \quad (\text{Eq. 48})$$

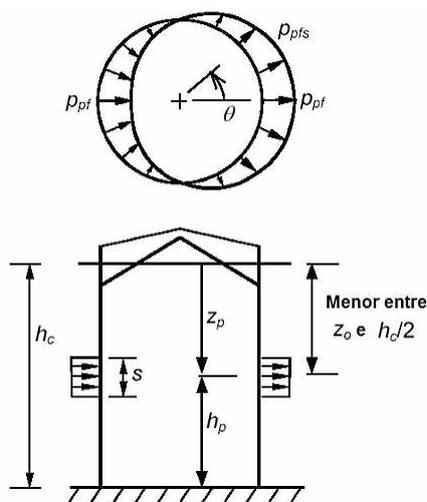


Figura 23. Distribuição da pressão adicional em silos cilíndricos de paredes finas. Fonte: EN 1991-4 (2006).

O menor valor entre z_0 e $0,5h_c$ corresponde a localização vertical da pressão adicional (z_p). A altura deve ser considerada a partir da superfície equivalente, de acordo com a Figura 23. Sendo z_0 dada pela Equação 49:

$$Z_0 = \frac{1}{K \cdot \mu} \cdot \frac{A}{U} \quad (\text{Eq. 49})$$

Pressões de descarregamento para silos esbeltos

Assim como ocorre na situação estática, o descarregamento em silos esbeltos é composto por pressões simétricas de descarga e pressões adicionais de descarga.

As pressões simétricas de descarga são estimadas a partir das pressões estáticas multiplicadas por coeficientes de sobrepressão, representados pela letra C, com o sub índice apropriado. Deste modo, a pressão horizontal dinâmica (p_{he}) e a pressão de atrito dinâmica (p_{we}), são obtidas pelas seguintes Equações (Eq. 50 e 51):

$$p_{he} = C_h \cdot p_{hf} \quad (\text{Eq. 50})$$

$$p_{we} = C_w \cdot p_{wf} \quad (\text{Eq. 51})$$

Para silos das classes 2 e 3 de confiabilidade os coeficientes são:

- $C_h = 1,15$; e

- $C_w = 1,10$.

Nos silos da classe 1 de confiabilidade, cujos valores médios de μ e K são utilizados no cálculo das pressões, os coeficientes de descarga devem ser calculados conforme as Equações 52 e 53:

$$C_h = 1,15 + 1,5 \left(1 + 0,4 \frac{e}{d_c} \right) \cdot C_{op} \quad (\text{Eq. 52})$$

$$C_w = 1,4 \left(1 + 0,4 \frac{e}{d_c} \right) \quad (\text{Eq. 53})$$

Em que:

C_h - Coeficiente de sobrepressão para pressões horizontais (adimensional);

C_w - Coeficiente de sobrepressão para pressões de atrito (adimensional);

C_{op} - Coeficiente do produto armazenado (adimensional);

d_c - Diâmetro inscrito (m);

e - Maior valor entre e_f e e_o (m);

e_f - Excentricidade máxima de enchimento no topo da tremonha (m);

e_o - Excentricidade da boca de descarga (m).

A pressão adicional dinâmica (p_{pe}) tem a finalidade de representar pressões assimétricas acidentais, assim como possíveis excentricidades de descarregamento. Ela pode ser desconsiderada para silos da classe 1 de confiabilidade. Sua magnitude é obtida por meio da Equação 54:

$$p_{pe} = C_{pe} \cdot p_{he} \quad (\text{Eq. 54})$$

Em que:

p_{he} - Pressão dinâmica na altura (z) igual à altura de aplicação da pressão adicional;

e

C_{pe} - Coeficiente de pressão adicional dinâmica ($C_{pe} \geq 0$). A magnitude do coeficiente é dada pela Equação 55.

$$C_{pe} = 0,42 C_{op} [1 + 2E^2] \left(1 - e^{\{-1,5[(\frac{h}{d_c})-1]\}} \right) \quad (\text{Eq. 55})$$

As pressões adicionais (p_{pes}) tem valores com sinais opostos e diminuem até a metade da seção com a expressão $p_{pes} = p_{pe} \cdot \cos\theta$. Os valores de pressão são constantes,

para uma única linha meridional da faixa, mas há uma variação contínua com a coordenada circunferencial (θ), os máximos ocorrem em $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 180^\circ$, contudo com sinais inversos (Figura 23).

Aplica-se a pressão adicional (p_{pe}) em um comprimento do perímetro de lado “s” (Eq. 56) e sua intensidade varia, para o caso de silos circulares esbeltos de paredes finas, conforme a seguinte distribuição de pressões (Eq. 57), devendo ser aplicada na mesma altura z_p a partir da superfície equivalente (Figura 23) sendo z_p o menor valor entre z_0 e $0,5h_c$.

$$S = \frac{\pi \cdot D}{16} \quad (\text{Eq. 56})$$

$$p_{pes} = p_{pe} \cos \theta \quad (\text{Eq. 57})$$

Pressões no fundo dos silos

A pressão vertical média na área de transição entre a parede e a tremonha ou fundo plano é determinada pelo valor da pressão vertical ponderada pelo valor do coeficiente C_b (Eq. 58). Os valores de C_b variam de acordo com as classes de risco distintas, apresentados na Tabela 4.

$$p_{vft} = C_b p_{vf} \quad (\text{Eq. 58})$$

Tabela 4. Valores do coeficiente C_b para cada classe de confiabilidade dos silos.

Classe 1	Classes 2 e 3
$C_b = 1,6$	$C_b = 1,2$

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

As pressões que atuam no fundo do silo são distintas para cada configuração, conforme os seguintes tipos abordados pelo código normativo:

- Fundo plano: fundo do silo com paredes inclinadas inferior a 5° com a horizontal;
- Tremonha íngreme: satisfaz o critério $\tan \beta < 1 - K_l / 2\mu_{hl}$; e
- Tremonha rasa: classifica-se em nenhum dos dois casos.

Pressões fundo plano

A pressão vertical no fundo plano para silos esbeltos é considerada como uniforme ($p_v = p_{vfft}$), e durante a fase de descarregamento é adotada como idêntica à pressão vertical no final do carregamento.

Para silos baixos ou de esbelteza intermediária, a pressão vertical (p_{vsq}) é determinada pela Equação 59:

$$p_{vsq} = p_{vb} + \Delta p_{sq} \left(\frac{2,0 - \frac{h_c}{d_c}}{2,0 - \frac{h_{tp}}{d_c}} \right) \quad (\text{Eq. 59})$$

Sendo:

$$\Delta p_{sq} = p_{vtp} - p_{vho} \quad (\text{Eq. 60})$$

$$p_{vtp} = \gamma h_{tp} \quad (\text{Eq. 61})$$

O valor de p_{vb} corresponde a componente uniforme da pressão vertical, obtida adotando-se $z = h_c$, e com emprego dos valores característicos mais desfavoráveis para as propriedades dos produtos armazenado. O valor de p_{vho} consiste na pressão vertical de Janssen na base da parte superior da pilha de produto obtida pela expressão (y) com $z = h_0$.

Pressões nas tremonhas – íngremes e rasas

As pressões nas paredes de tremonhas concêntricas são calculadas pela teoria de Walker (1966). Para ambas as condições, carregamento e descarregamento, nas tremonhas íngremes adota-se o coeficiente de atrito efetivo da parede da tremonha (μ_{hef}) como o valor característico inferior (μ_{hl}) e as tremonhas rasas, calcula-se de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5. Valores do coeficiente de atrito efetivo na tremonha.

	Tremonha íngreme	Tremonha rasa
Coeficiente de atrito efetivo	$\mu_{hef} = \mu_{hl}$	$\mu_{hef} = \frac{(1 - Kl)}{2 \tan \beta}$

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

A pressão vertical média do produto armazenado a qualquer nível em uma tremonha acima do vértice, tanto na fase estática quanto dinâmica, pode ser determinada pelas Equações 62 e 63.

$$p_v = \left(\frac{\gamma_u \cdot h_h}{n-1}\right) \left\{ \left(\frac{x}{h_h}\right) - \left(\frac{x}{h_h}\right)^n \right\} + p_{vft} \left(\frac{x}{h_h}\right)^n \quad (\text{Eq. 62})$$

$$n = S \cdot 0,8 \cdot \mu_{heff} \cdot \cot \beta \quad (\text{Eq. 63})$$

Em que:

S - Coeficiente de forma da tremonha, sendo S = 2 para tremonhas cônicas e piramidais quadradas (adimensional), S = 1 para tremonhas em cunha (adimensional), S = (1 + b/a) para tremonhas com formato retangular, onde se define “a” como o comprimento da tremonha retangular e “b” como sua largura, sendo ambos dados em metros e o parâmetro S é adimensional;

X - Valor característico superior do peso específico do material ensilado, (kN m⁻³);

h_h - Altura vertical entre o ápice da tremonha e a região de transição, em metros; x = coordenada acima do vértice da tremonha, (m);

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

β - Inclinação da parede da tremonha com a vertical, (°);

p_{vft} = p_v - Pressão vertical média no produto na região de transição, após o preenchimento do silo, (kN m⁻³).

Na fase estática o parâmetro F para tremonhas íngremes e rasas é obtido por F_{ff} (Eq. 64).

$$F = F_f - \frac{0,2}{\left(1 + \frac{\tan \beta}{\mu_{heff}}\right)} \quad (\text{Eq. 64})$$

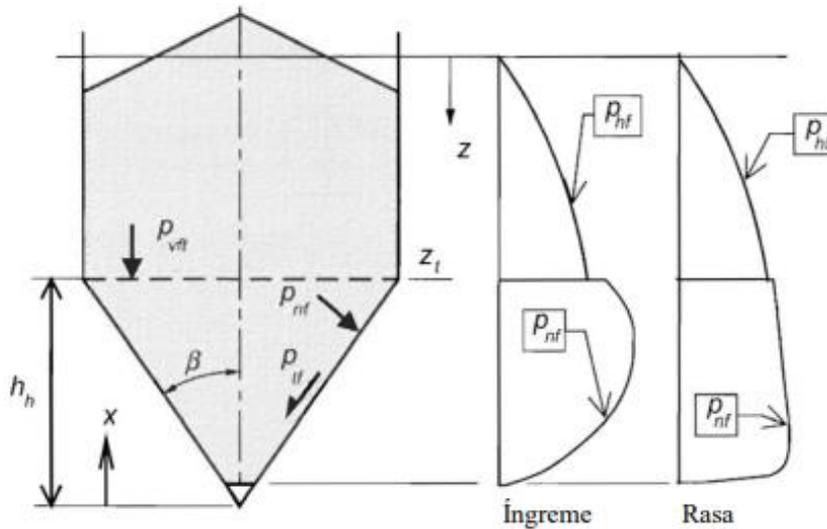
Em que:

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

As pressões normais (p_{nf}) e de atrito (p_{tf}) na fase estática na tremonha são apresentadas na Figura 24, e dadas pelas Equações 65 e 66.

$$p_{nf} = F_f p_v \quad (\text{Eq. 65})$$

$$p_{tf} = \mu_{heff} F_f p_v \quad (\text{Eq.66})$$



Sendo:

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

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

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

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

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

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

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

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

Figura 24. Pressões na tremonha durante o carregamento do produto. Fonte: EN 1991-4 (2006).

Para tremonhas rasas, as pressões dinâmicas normais (p_{ne}) e de atrito (p_{te}) são adotadas como idênticas aos valores das pressões estáticas. Em tremonhas íngremes, a pressão vertical média dinâmica do produto armazenado em qualquer nível pode ser obtida pelo emprego da mesma expressão de carregamento, porém, o parâmetro F (Eq. 67) deve ser dado por F_e , baseado na teoria de Walker (1966).

$$F = F_e = \frac{1 + \text{sen } \phi_i \cos \varepsilon}{1 - \text{sen } \phi_i \cos(2\beta + \varepsilon)} \quad (\text{Eq.67})$$

Sendo:

$$\phi_{wh} = \tan^{-1} \mu_{heff} \quad (\text{Eq. 68})$$

$$\varepsilon = \phi_{wh} + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen } \phi_{wh}}{\text{sen } \phi_i} \right) \quad (\text{Eq. 69})$$

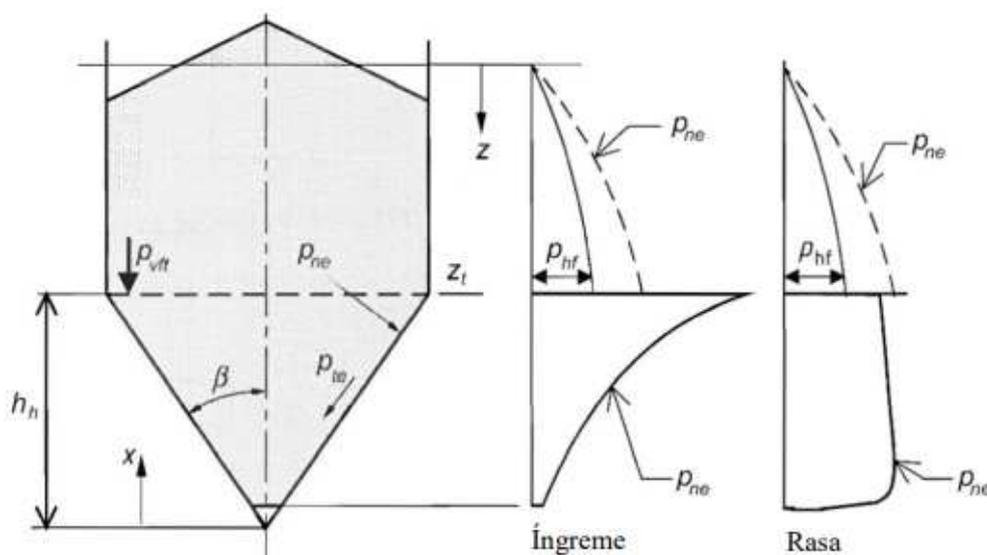
Em que:

β - Ângulo de inclinação da tremonha com a vertical, (°);

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

ϕ_i - Ângulo de atrito interno do material armazenado, (°).

As pressões normais (p_{ne}) e de atrito (p_{te}) na fase dinâmica na tremonha são apresentadas na Figura 25, e equacionadas a seguir.



Em que:

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

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

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

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

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

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

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

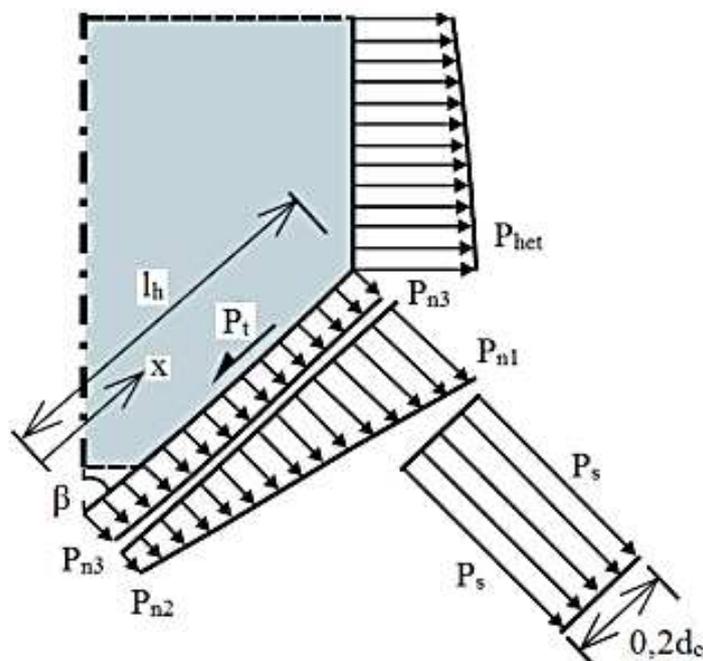
h_n é a altura da tremonha, medida do seu vértice à zona de transição, em metros.

Figura 25. Pressões na tremonha durante o descarregamento do produto. Fonte: EN 1991-4 (2006).

Observa-se pelas Figuras 24 e 25, que o maior pico de pressões ocorrerá no nível da transição efetiva e sua magnitude dependerá da localização da transição efetiva no

cilindro, ocorrendo quando a pressão vertical da parede do silo é máxima para o campo de pressões de Janssen. Esse pico deve ser obtido para vários valores de z , de tal modo que obtenha-se a envoltória dos picos de pressão.

Além dessa recomendação, a norma apresenta um método alternativo de cálculo para prever as pressões em tremonhas concêntricas. Esse método consiste em admitir que a pressão na tremonha seja a soma das componentes apresentadas na Figura 26.



Legenda:

β = ângulo da tremonha com a vertical;

x = comprimento entre 0 e l_h ;

l_h = comprimento da parede da tremonha;

d_c = diâmetro inscrito;

P_t = pressão de atrito vertical, por unidade de perímetro da tremonha;

P_s = pressão aplicada na transição em silos com fluxo de massa;

P_{n1} = pressão na tremonha em virtude da pressão vertical causada pelo armazenamento do produto na região da transição;

P_{n2} = pressão na tremonha em virtude da pressão vertical causada pelo armazenamento do produto na saída da tremonha;

P_{n3} = pressão na tremonha em razão do peso do produto na mesma;

P_{het} = pressão horizontal, atuando na transição após o enchimento.

Figura 26. Distribuição de pressões nas tremonhas pelo método alternativo da Eurocode. Fonte: EN 1991-4 (2006).

Deste modo, a pressão normal de carregamento (p_{nf}) na tremonha é dada pela Equação 70.

$$p_{nf} = p_{n3} + p_{n2} + p_{n1} + (p_{n1} + p_{n2}) \cdot \frac{x}{l_h} \quad (\text{Eq. 70})$$

Com:

$$p_{n1} = p_{vft} \cdot (C_b \cdot \sin^2 \beta + \cos^2 \beta) \quad (\text{Eq. 71})$$

$$p_{n2} = p_{vft} \cdot C_b \cdot \sin^2 \beta \quad (\text{Eq. 72})$$

$$p_{n3} = 3 \cdot \frac{A}{U} \cdot \frac{\gamma \cdot K_s}{\sqrt{\mu_h}} \cdot \cos^2 \beta \quad (\text{Eq. 73})$$

Em que:

p_n - Pressão normal à parede da tremonha (kN m^{-2});

p_{n1} - Pressão na tremonha em virtude da pressão vertical causada pelo armazenamento do produto na região da transição (kN m^{-2});

p_{n2} - Pressão na tremonha em virtude da pressão vertical causada pelo armazenamento do produto na saída da tremonha (kN m^{-2});

p_{n3} - Pressão na tremonha em razão do peso do produto na mesma (kN m^{-2});

x = comprimento entre 0 e l_h (m);

l_h - Comprimento da parede da tremonha (m);

p_{vet} - Pressão vertical, atuando na transição após o enchimento (Equação 1 de Janssen) (kN m^{-2});

C_b = Coeficiente de sobrepressão para tremonha (adimensional), em que: $C_b = 1,3$ (produto livre) e $C_b = 1,6$ (produto coesivo);

β - Ângulo da tremonha com a vertical ($^\circ$);

R = raio hidráulico da célula (m);

γ - Peso específico do produto armazenado (kN m^{-3});

K - Relação entre pressão horizontal e vertical (adimensional);

μ_h - Coeficiente de atrito com a parede da tremonha (adimensional).

A pressão estática de atrito na tremonha é obtida pela Equação 74:

$$p_{tf} = p_{nf} \cdot \mu_h \quad (\text{Eq. 74})$$

Em que:

p_{nF} - Pressão normal à parede da tremonha (kN m^{-2});

μ_h - Coeficiente de atrito com a parede da tremonha (adimensional).

A pressão dinâmica da tremonha:

(1) Para silos de fluxo de funil, as pressões de descarga em tremonhas podem ser calculadas utilizando a orientação para a pressão estática da tremonha;

(2) Para silos de fluxo de massa, aplica-se uma pressão na transição (p_s), ao longo de uma distância de $0,2.d_c$ na tremonha e ao redor do seu perímetro (Eq. 75)

$$p_s = 2 \cdot K \cdot p_{vet} \quad (\text{Eq. 75})$$

Em que:

p_s - Pressão aplicada na transição em silos com fluxo de massa (kN m^{-2});

K - Relação entre pressão horizontal e vertical (adimensional);

p_{vet} - Pressão vertical, atuando na transição após o enchimento (Equação de Janssen) (kN m^{-2}).

Além das ações devidas ao carregamento e ao descarregamento, junto com todas as particularidades constantes, a norma europeia faz um apanhado sobre as ações em silos com sistema de aeração no fundo, ações devidas às diferenças de temperatura entre o sólido armazenado e a estrutura e ações em silos retangulares.

3.9.2 American National Standards Institute - ANSI/ASAE S433.1 (2019)

A norma americana apresenta recomendações para a obtenção das pressões estáticas e dinâmicas exercidas por produtos de fluxo livre em silos carregados e descarregados concentricamente. As terminologias empregadas no código normativo são definidas a seguir:

- Silo (“bin”): Depósito com relação altura/diâmetro maior ou igual a 0,5 (para silo de seção retangular, no lugar do diâmetro, toma-se o menor lado);

- Tubo antidinâmico: É um duto vertical, geralmente no centro do silo, com o fundo do tubo ligado diretamente ao orifício onde os grãos serão descarregados, cujo objetivo é limitar as pressões durante o descarregamento, de modo que não sejam superiores as pressões que ocorrem durante o carregamento do silo;

- Conduto antidinâmico (“flume”): Conduto vertical preso à parede do silo por onde os grãos podem fluir. As saídas de descarga podem ser colocadas na parede do silo em qualquer local ao longo da elevação vertical do conduíte;

- Fluxo de funil: Fluxo no interior de um silo, o movimento dos grãos ocorre nas proximidades do centro e não existe movimento dos grãos ao longo das paredes do silo (Figura 27);

- Fluxo de funil em fundo cônico: Fundo cônico onde um canal de fluxo de grãos é formado no sentido da descarga, porém os grãos junto à parede do cone não se movem (Figura 27);

- Tremonha: parte inclinada do silo usada para auxiliar a descarga por gravidade através de um orifício;

- Fluxo de Massa em Tremonha: Tremonha onde todos os grãos movimentam-se em sentido a saída, sempre que ocorre abertura do orifício de descarga; (Figura 27);

- Pressões induzidas pela alteração de umidade: Pressões induzidas pela expansão dos grãos, quando aumento da umidade destes no interior do silo;

- Fluxo-Plug: fluxo em um silo no qual os grãos movimentam-se em toda ou em parte da parede do silo, (Figura 27);

- Pressões induzidas termicamente: Pressões induzidas em um silo carregado quando submetido a temperaturas ambientes em declínio; e

- Pressões induzidas por vibrações: Pressões induzidas por vibrações no solo ou máquinas.

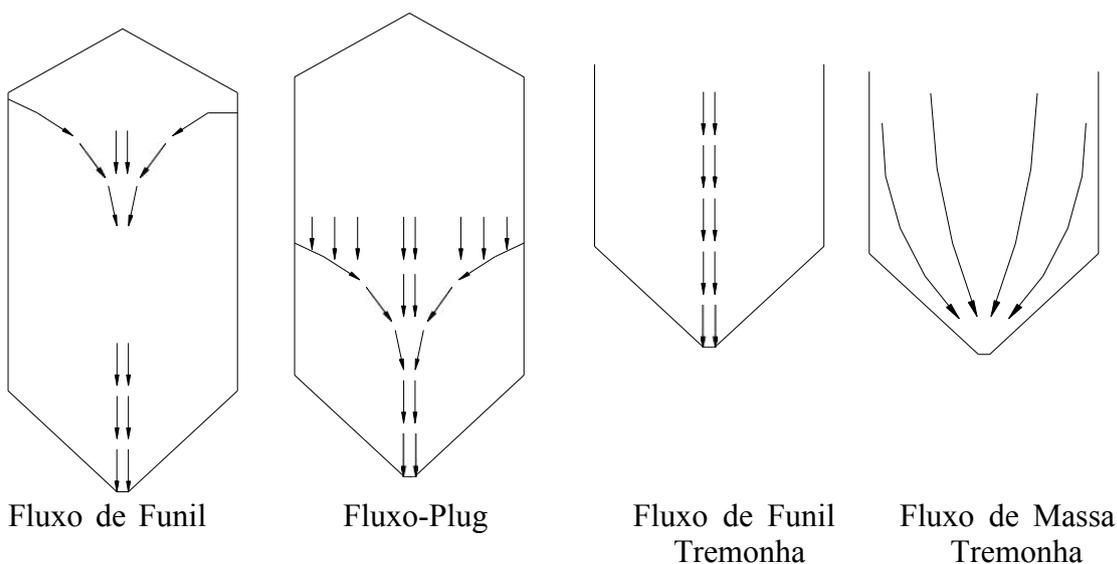


Figura 27. Tipos de fluxo no interior de um silo. Fonte: ANSI/ASAE S433.1:2019.

Esta norma utiliza o método proposto por Janssen (1895) para prever as cargas estáticas em paredes e fundo de silos. Na teoria de Janssen considera-se que o peso específico (γ), a razão entre pressão lateral e vertical (K), e coeficiente de atrito entre grão e parede do silo (μ) são constantes para qualquer configuração adotada. A técnica de Janssen assume que a pressão causada pelo grão não varia sobre uma determinada seção transversal.

Nestas recomendações, além do peso específico, ela apresenta os valores para o coeficiente de atrito para alguns produtos em função da rugosidade da parede e fixa o valor de $K = 0,5$ para todos os produtos de fluxo livre, conforme Tabela 6.

Para qualquer grão com fluxo-livre, o peso específico máximo recomendado por esta norma é de 834 kg/m^3 . Para pressões impostas por um grão específico que não seja trigo, esta norma recomenda que a densidade seja determinada pela *Winchester Bushel Test* (USDA, 2004). Pode-se, ainda, usar o peso específico listado na *ASAE D241, Density, Specify Gravity and Weight-Moisture Relationships of Grain for Storage*, multiplicada por um fator de compactação de 1,08.

Tabela 6. Fatores de sobrepressão e propriedades do material armazenado.

Material da Parede do Silo	μ	K	F
Aço	0.30	0.50	1.40
Concreto	*	*	*
Aço Corrugado	0.37	0.50	1.40

* Consultar ACI 313-16 Seção 6.3 Cargas

Fonte: ANSI/ASAE S433.1 (2019).

Pressões estáticas

A estimativa da pressão estática em função da profundidade (y) é efetuada de acordo com a Equação de Janssen (Equações 76 e 77).

$$p_v(z) = \frac{\gamma \cdot R}{\mu \cdot K_s} \cdot [1 - e^{-\left(\frac{\mu \cdot K_s \cdot z}{R}\right)}] \quad (\text{Eq. 76})$$

$$p_h(z) = K_s \cdot p_v(z) \quad (\text{Eq.77})$$

Em que:

$p_v(z)$ - Pressão vertical do grão em profundidade, (kPa);

z - A variável de integração com relação à profundidade (m);

γ - Massa específico dos grãos armazenados (kg m^{-3}).

R - Raio hidráulico do silo (área da seção transversal dividida pelo perímetro), (m);

K_s - Razão de pressão lateral para vertical, (adimensional);

μ - coeficiente de atrito do grão com a superfície da estrutura (adimensional); e

$p_h(z)$ - Pressão lateral do grão em profundidade, Y , (kPa).

A estimativa das pressões de atrito entre parede vertical e grão é dado pela Equação 78.

$$p_w(z) = \mu \cdot p_h(z) \quad (\text{Eq. 78})$$

Em que:

$p_w(z)$ - Pressão de atrito entre a parede vertical e os grãos (kPa).

Em silos retangulares, para estimar as pressões próximas à parede de menor comprimento, deve-se usar: $R = a/4$. Para as pressões próximas à parede de maior comprimento, usar $R = c/4$ onde c é obtido pela Equação 79.

$$c = \frac{2ab}{a+b} \quad (\text{Eq. 79})$$

Em que:

a - Largura ou o menor lado de um silo retangular (m);

b - Comprimento ou maior lado de um silo retangular (m); e

c - Comprimento equivalente da parede calculado em função de a e b (m).

Pressões dinâmicas

Como supracitado no tópico 3.5, as equações de Janssen são originadas de condições estáticas. Quando ocorrem efeitos dinâmicos, forças maiores que as previstas por Janssen surgirão.

Em silos com escoamento do tipo fluxo de funil a Equação 77 deve ser usada para previsão das pressões dinâmicas. O fluxo de funil normalmente ocorre em silos que possuem relações H/D menores que 2,0. Sendo o H medido do ponto mais baixo de

descarga até o topo da superfície dos grãos, ou se houver sobrecarga, até 1/3 da altura da sobrecarga (Figura 28).

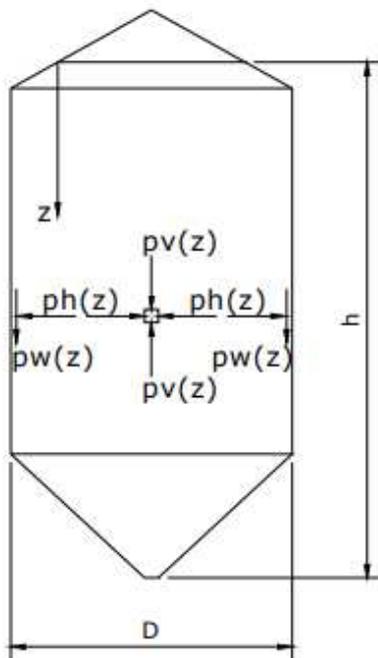


Figura 28. Dimensões do silo. Fonte: ANSI/ASAE S433.1:2019.

O movimento do produto em fluxo tipo funil ocorre em um núcleo central da massa e não são geradas sobrepressões. Estudos de padrões de fluxo em silos com menos de 3 m de diâmetro indicam que a transição entre o fluxo de funil e mássico pode ser em um ponto tão baixo quanto H/D igual a 1,3 para silos baixos (Nguyen, 1980). No entanto, observações de campo em silos com mais de 3 m de diâmetro indicam que o ponto de transição em silos esbeltos ocorre em um ponto próximo a H/D igual a 2,0 (Usry & Thompson, 1986). Para qualquer situação específica em que possa ser demonstrado ou haja suspeita que ocorrerá Fluxo-Plug em um silo, as pressões nas paredes laterais devem ser previstas pelo método descrito na Equação 77.

Em silos com escoamento do tipo Fluxo-Plug, ocorrem pressões dinâmicas maiores do que as previstas pela Equação 77. Silos com relação H/D superior a 2,0 podem descarregar por Fluxo-Plug. Neste caso, deve-se multiplicar o valor encontrado para P_h por um fator de sobrepressão (F), apresentado na Tabela 6. Para silos de fundo plano, o fator de sobrepressão deverá ser aplicado a uma altura correspondente a $D/4$, no sentido do fundo do silo para cima.

A redução do fator de sobrepressão em silos com descarga tipo Fluxo-Plug é baseada na constatação de que, em silos de fundo plano, certa quantia de produto ficará

estática durante a descarga, não sendo removida por gravidade. A redução no fator de sobrepressão é permitida da altura de $D/4$ até a base dos silos com fundo plano, interpolando linearmente o fator de sobrepressão apresentado na Tabela 6 para a altura de $D/4$, e empregando fator de sobrepressão no fundo do silo igual a 1,00.

Os fatores de sobrepressão apresentados pela norma são baseados em uma análise dos resultados relatados por Platanov & Kovtun (1959) em silos de escala real, carregados com grãos de trigo. De acordo com a norma, considera-se que o trigo é o produto granular que exerce as maiores pressões sobre os silos. Os resultados de Platanov & Kovtun (1959) servem de base para as recomendações das normas Russa (Código Soviético, 1965), Alemã (DIN, 1964) e American Concrete Institute (ACI, 1983) para o cálculo das cargas exercidas por materiais granulares

Força de atrito acumulada

Para o cálculo da carga vertical nas paredes, a uma profundidade z , a norma recomenda a expressão abaixo:

$$p_w(z) = [\gamma \cdot G \cdot z - p_v(z)] \cdot R \quad (\text{Eq. 80})$$

Pressões nos pisos de fundo plano

A norma recomenda que as cargas verticais no piso de fundos planos sejam estimadas usando a Equação que fornece os valores de $p_v(z)$ (Eq. 76).

A norma apresenta que Janssen assumiu as pressões verticais no piso do silo como constantes. Contudo, é evidenciado no código normativo que estudos das pressões em fundos de silos modelo e em escala real, começando com Saul (1953) e Dale & Robinson (1954), demonstraram que existem variações nas pressões do fundo. Alguns estudos observaram pressões maiores do que as previstas pela teoria de Janssen, próximo aos orifícios de descarga do centro, e a maioria dos estudos observou pressões verticais reduzidas perto das paredes dos silos. No entanto, esse padrão não foi relatado por todos os estudos.

Segundo a norma americana, as pressões verticais no fundo do silo variam dependendo do método de carregamento, tamanho, localização e número de orifícios de descarga, tipo e localização dos suportes do piso, taxa de descarregamento, altura da massa de grãos e propriedades elásticas dos grãos armazenados.

Pressões nas tremonhas

As tremonhas são comumente classificadas como fluxo de funil ou fluxo de massa. Para grãos agrícolas de fluxo livre, as tremonhas de fluxo de funil são os casos mais comuns. Quando o grão flui pelo orifício da tremonha, um canal de expansão é formado dentro do material estagnado até que o canal intercepte a parede do silo ou a superfície superior do material. O fluxo ao longo das paredes da tremonha é inexistente até que a maior parte da caixa tenha sido esvaziada.

Esta Norma apresenta apenas métodos para prever pressões dentro de tremonhas com fluxo de funil. Para pressão em tremonhas com fluxo de massa, recomenda as teorias de Jenike (1980), Walker (1966), Walters (1973) e Wilms (1985).

Diante disso, para o caso de fundos cônicos (Figura 29) onde não ocorra fluxo de massa, determina-se a pressão (p_n) em qualquer ponto da tremonha calculando-se primeiramente $p_v(z)$ e $p_h(z)$ usando as equações correspondentes com a profundidade z de interesse.

Deve-se usar a geometria do silo na interseção do fundo cônico com a parede vertical do silo para calcular o raio hidráulico. Após, aplicar o fator de sobrepressão nesta interseção. Os fatores de sobrepressão podem ser linearmente reduzidos de F , no topo, até 1,0 no ponto de descarga da tremonha.

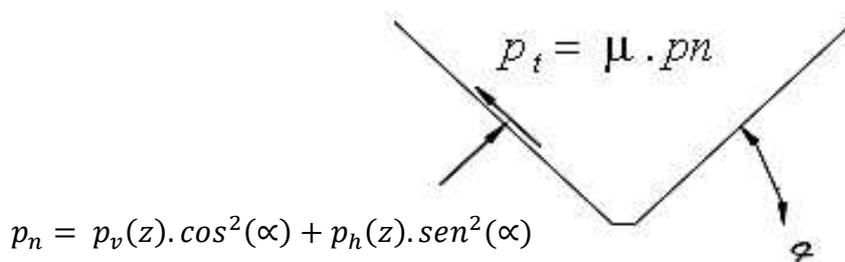


Figura 29. Pressões sobre tremonha. Fonte: ANSI/ASAE S433.1:2019.

Para pressões de atrito tangenciais nas paredes das tremonhas, tem-se a Equação 81.

$$p_t = \mu \cdot p_n \quad (\text{Eq. 81})$$

Em que:

p_t - Pressão de atrito com a parede inclinada da tremonha (kPa);

p_n - Pressão normal de uma superfície inclinada (α) com a horizontal (kPa).

Pressões em dutos antidinâmicos central ou nas paredes

Um duto antidinâmico central manterá o carregamento simétrico, ao contrário dos dutos antidinâmicos colocados junto às paredes dos silos. O cálculo da pressão externa em qualquer nível destes dutos antidinâmicos é estimado como sendo igual à pressão lateral nas paredes do silo no mesmo nível. A pressão lateral interna poderá ser desconsiderada, ou prevista tomando o diâmetro interno equivalente do duto antidinâmico. A tensão vertical externa será estimada multiplicando a pressão lateral nas paredes do silo no mesmo nível pelo coeficiente de atrito do material usado para fabricar o duto. Já a tensão vertical interna será estimada pela multiplicação da pressão lateral interna pelo coeficiente de atrito do material do duto.

Considerações de cargas especiais

Considerações de cargas especiais são efeitos impostos às paredes do silo por eventos que não estão relacionados à operação adequada do silo sob condições ambientais normais. Eles podem ser contabilizados pela seleção do fator de segurança apropriado.

Pressões induzidas termicamente

As quedas bruscas da temperatura ambiente podem aumentar as tensões da parede pois a estrutura não sofre contração livre. Estudos de laboratório com protótipos de silos cilíndricos indicam que as pressões laterais estáticas estimadas em projeto podem variar com taxas de declínio da temperatura do ar (Manbeck & Muzzelo, 1985; Britton, 1973; Zhang et al., 1987). As recomendações dadas na norma americana baseiam-se nesses estudos de laboratório. Os resultados qualitativos coletados de silos em tamanho normal (Blight, 1985) indicam que esse efeito ocorre, mas os resultados quantitativos necessários para fins de projeto não estão disponíveis em silos reais.

Estimam-se as pressões térmicas em silos circulares de aço incrementando as cargas estáticas em 8% para reduções de temperatura de 10°C/hora e em 15% para reduções de temperatura de 20°C/hora.

Pressões induzidas por diferença de umidade dos grãos

Diferenças de umidade de 4% ou mais podem causar acréscimo de pressões laterais muitas vezes maiores que aquelas consideradas em carregamentos estáticos. Desse modo, o código normativo indica que precauções deverão ser tomadas no projeto, localização e

gerenciamento dos silos a fim de evitar a ocorrência de aumentos de 1 ou 2% nos teores de umidade dos grãos durante o armazenamento.

A norma menciona os estudos de Dale & Robinson (1954), pesquisadores que constataram que a pressão lateral aumentou seis vezes em relação ao acréscimo de 4% no teor de umidade do grão, além do registro de aumentou por um fator de 10 para um aumento de 10% no teor de umidade do grão.

3.10 Método dos Elementos Finitos em silos

A dificuldade de obtenção de teorias clássicas satisfatórias para prever com precisão as pressões exercidas pelo produto armazenado nas paredes do silo, somada aos avanços significativos da computação nos últimos anos, estimularam o emprego dos métodos numéricos como uma nova forma de abordagem do estudo das pressões em silos.

Embora os ensaios experimentais sejam o método mais confiável, envolvem enormes despesas no estabelecimento de modelos/silos em escala real, configuração de instrumentação e imperfeições geométricas associadas devido à instalação de sensores (Jayachandran et al., 2019), além de consumirem tempo considerável para obtenção de resultados quando comparados a simulação numérica.

O advento de técnicas numéricas como o Método dos Elementos Finitos (MEF) e Método dos Elementos Discretos (MED) abriu novos caminhos para a compreensão das interações complexas entre os grãos armazenados e as paredes do silo (Jayachandran et al., 2019). Estudos estabeleceram o MEF como mais assertivo para previsão das pressões no silo, enquanto o MED foi mais preciso na representação dos fluxos granulares (Jayachandran et al., 2019).

O MED consiste em simular individualmente as partículas que integram o meio a partir do emprego de modelos de choque e da segunda lei de Newton. Estas considerações permitem a obtenção do movimento e velocidade individual de cada grão, incluindo a influência de choques e atritos existentes entre as próprias partículas e entre estas e a parede. Apesar do potencial, a aplicação do DEM é limitada devido as necessidades computacionais consideravelmente elevadas (Jayachandran et al., 2019).

Dentro desse contexto, nos últimos anos os estudos utilizando MEF em silos aumentaram significativamente (Zhao & Jofriet, 1992; Holst et al., 1999; Ayuga et al., 2006; Gallego et al., 2010; Gallego et al., 2015; Pardikar et al., 2020), constituindo uma abordagem numérica empregada para resolver um conjunto de equações diferenciais parciais que descrevem um fenômeno físico (García-Macías et al., 2019).

A confecção do modelo matemático baseia-se na hipótese fundamental da continuidade do meio, pois este método é baseado na Mecânica do Contínuo, tratando a matéria como um meio contínuo, sem vazios interiores, de forma que qualquer porção de volume (por menor que seja) é totalmente preenchida por determinada quantidade de massa. Além disso, ao considerar o meio inicialmente contínuo o mesmo deve permanecer contínuo após aplicação do carregamento externo.

O conceito “*continuum*” permite a definição do ponto geométrico (de volume igual a zero), por um limite matemático tal como na definição de derivadas no cálculo infinitesimal. O meio contínuo é discretizado em pequenos elementos, denominados elementos finitos. A definição desses elementos ocorre pelo emprego de barras, nós e funções de interpolação. A malha do modelo é definida pelo conjunto de barras e nós. As equações que governam o comportamento estrutural de cada elemento são escritas em matrizes individuais e posteriormente transferidas para uma matriz global. Os carregamentos na estrutura e restrições de deslocamento são aplicados e determina-se a solução a partir do equilíbrio entre forças aplicadas e esforços internos, compatibilização dos deslocamentos e condições de contorno da estrutura.

Por meio do MEF é possível adotar comportamentos estruturais distintos para cada elemento do modelo que, em conjunto, forma a matriz de rigidez global da estrutura, analogamente ao método utilizado na análise matricial de estruturas. Nos pontos de união entre os elementos, ou seja, nos nós, se determinam as condições para calcular o equilíbrio da estrutura

Deve-se sempre lembrar que a confiabilidade dos resultados teóricos obtidos por meio de simulações depende do conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais analisado (Moya et al., 2022). As propriedades mecânicas são de fundamental importância para modelar com acurácia as cargas atuantes nas paredes e fundo dos silos. Contudo, 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, 2013 e 2022; Costa et al., 2014).

Os produtos granulares podem ser bem representados pelo critério elastoplástico, sendo a parte elástica definida pelos parâmetros módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do produto. Por sua vez, a plastificação é definida adotando-se o critério de Drucker-Prager, sendo necessário neste caso o conhecimento do ângulo de dilatância (Ayuga et al., 2006; Madrona, 2008; Gallego et al., 2010; González-Montellano et al., 2011; Moya et al., 2022).

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 Equação 82.

$$\nu = \frac{K_0}{1+K_0} \quad (\text{Eq. 82})$$

O emprego dessa relação (Eq. 82) é feito para determinação de forma indireta do coeficiente de Poisson, na impossibilidade da determinação experimental deste. Este coeficiente configura um dos parâmetros mais importantes para a determinação das pressões nos silos. Segundo Ayuga et al., (2001), uma variação no coeficiente de Poisson entre 0,2 e 0,4 produz até 90% de mudança nas pressões estáticas.

O aumento das pressões com o aumento do coeficiente de Poisson acontece devido ao efeito do confinamento do produto. Quanto maior o coeficiente de Poisson do produto, maior será a dilatação volumétrica do mesmo quando submetido à compressão. A presença de paredes rígidas no modelo numérico impede que o produto se deforme, o que gera maiores pressões. Este fenômeno também está relacionado com o ângulo de atrito do produto e conseqüentemente, relacionado com o coeficiente K. Quanto maior o atrito interno do produto (portanto, menor o coeficiente K) menores as pressões horizontais.

Já o módulo de elasticidade (E) é a razão entre um incremento da tensão aplicada e um incremento da deformação resultante (Eq. 83), 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.

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (\text{Eq. 83})$$

Em que:

E – Módulo de elasticidade (Pa);

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

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

Por sua vez, o ângulo de dilatância (ψ) 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 representado na Figura 30 (Costa et al., 2014; Madrona & Calil Junior, 2009), podendo

ser obtido em ensaios de cisalhamento direto ou triaxiais. Essa propriedade determina a direção da deformação plástica do produto (Guaita et al., 2003).

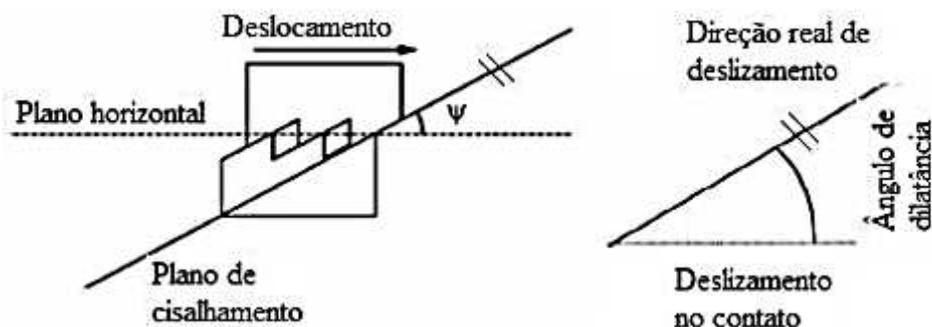


Figura 30. Representação da dilatação nas linhas de deslizamento. Fonte: Madrona & Calil Junior (2009).

Guaita et al. (2003) afirmam que o ângulo de dilatação pode ser relacionado com o ângulo de atrito interno da seguinte forma:

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

Pesquisadores afirmam que a dilatação é uma das prováveis causas do aumento das pressões nas etapas dinâmicas nos processos de armazenamento dos grãos em silos (Ramirez et al., 2009 e 2010). A robustez dos resultados do MEF depende das propriedades do material utilizado no modelo constitutivo empregado para descrever o comportamento não linear dos grãos (Jayachandran et al., 2019).

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. (2022) determinaram experimentalmente as propriedades mecânicas de trigo, milho e pellets de madeira, sugerindo os valores constantes na Tabela 7, os quais podem ser usados em cálculos de carga de silo envolvendo métodos numéricos.

Tabela 7. Valores das propriedades mecânicas recomendado para diferentes produtos.

Produto	Propriedade		
	Dilatância [°]	Módulo de Elasticidade [kPa]	Coefficiente de Poisson
Trigo	19.7	37.350	0.39
Milho	33.6	34.800	0.18
Pellets Madeira	36.4	21.330	0.13

Fonte: Moya et al. (2022).

Simulando o descarregamento de farelo de milho e grãos de soja, Madrona & Calil Jr. (2009) encontraram valores experimentais inferiores aos valores teóricos obtidos por meio das normas Australiana e Europeia (AS 3774 e BS EN 1991/4, respectivamente). Os autores constataram que a simulação com elementos finitos é aplicável e segura para determinação das pressões atuantes no interior do silo, sendo semelhantes aos valores experimentais.

Wang et al. (2015) ao compararem valores experimentais, simulados e normatizados (BS EN 1991/4) de pressões durante o descarregamento, encontram valores similares entre os experimentais e simulados, sendo os valores normatizados majorados pelo coeficiente de segurança imposto pela norma.

Gallego et al. (2015) confrontaram resultados experimentais com dados obtidos utilizando um Modelo de Elementos Finitos (MEF) desenvolvido no ANSYS. Foram analisadas pressões normais de parede e as forças de atrito. No modelo foi empregado material elastoplástico para simular a comportamento do produto granular armazenado. A definição do comportamento elástico foi dada a partir dos parâmetros: coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade. Para definição da parte plástica três parâmetros foram necessários: ângulo de atrito, coesão e ângulo de dilatação. Os resultados das pressões normais utilizado o MEF em comparação com as experimentais e a Eurocode 1, parte 4 são apresentados na Figura 31.

Os resultados (Figura 31) mostraram que as pressões numéricas previstas pelo MEF se aproximam das obtidas experimentalmente, tanto para fase estática quanto dinâmica. As previsões feitas pela Eurocode combinam muito bem com os resultados experimentais e numéricos para o carregamento, entretanto, a norma superestima as pressões normais ao longo da parede do silo para o processo de descarga, mas o pico de pressão previsto é próximo ao medido experimentalmente e ligeiramente inferior ao valor obtido com o modelo dos elementos finitos.

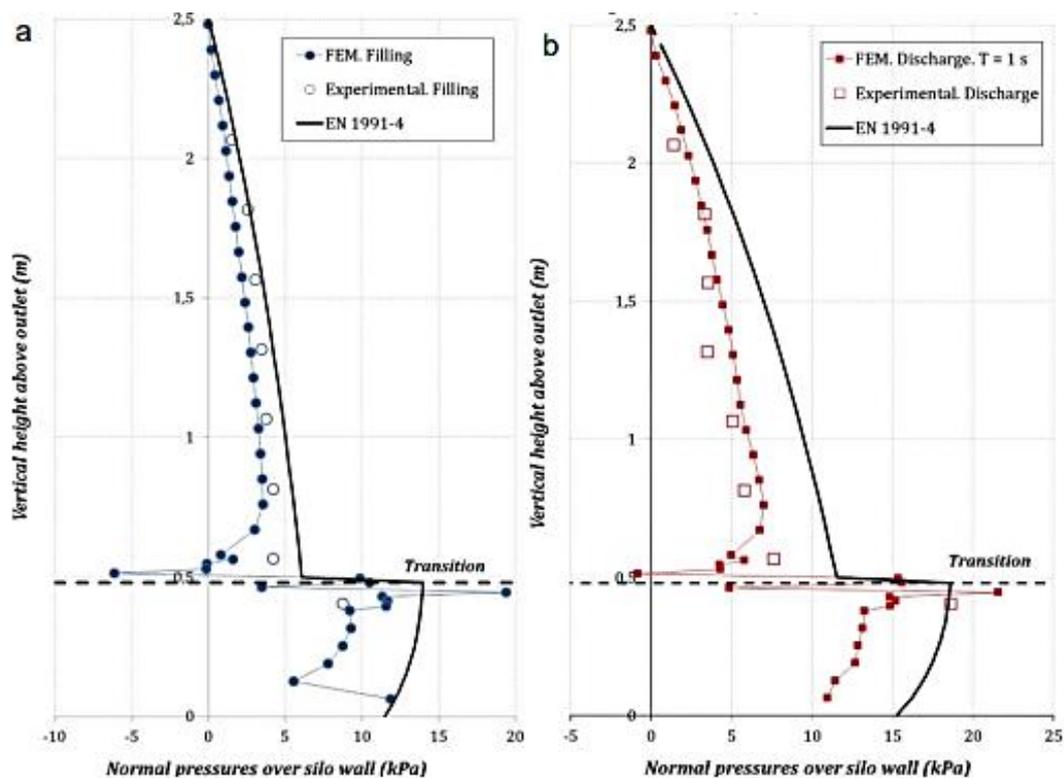


Figura 31. Comparação das pressões normais sobre a parede do silo na condição estática (a) e dinâmica (b). Fonte: Gallego et al. (2015).

Anjos (2018) realizou estudo numérico para a determinação das pressões e deformações em silos cilíndricos metálicos, verificando a influência da espessura da parede e esbeltez da estrutura. No estudo empregou-se análise elástica e linear, sendo constatado pela autora a necessidade de uma análise do efeito de segunda ordem, contemplando os efeitos da não-linearidade física e geométrica do material.

Na Figura 32 observa-se um dos resultados das simulações realizadas por Anjos (2018), confrontando os valores das pressões horizontais experimentais com as obtidas calculadas segundo as diretrizes da norma europeia. Verifica-se que o modelo numérico apresentou boa aproximação em relação as pressões dinâmicas experimentais, sendo ambas inferiores, embora as curvas seguindo a mesma tendência, às pressões teóricas obtidas pela Eurocode (mais conservativos).

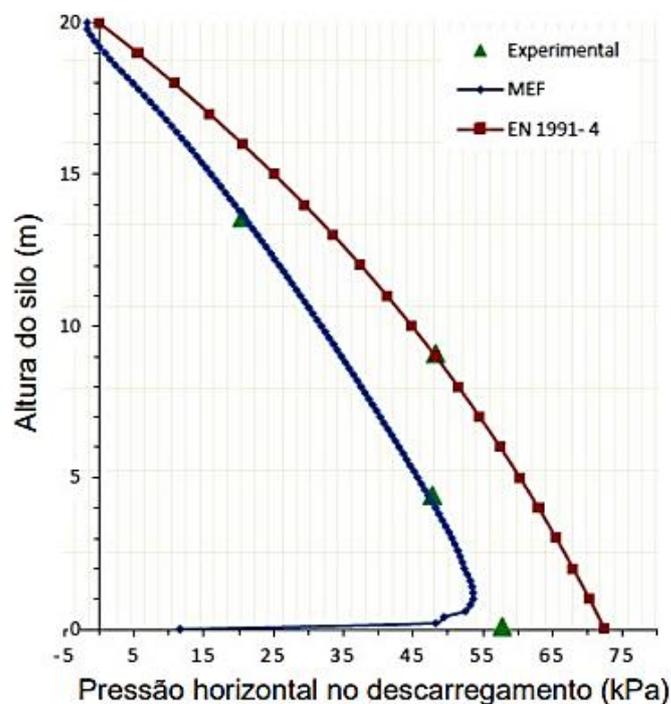


Figura 32. Pressões horizontais ao longo da altura do silo. Fonte: Anjos (2018).

Gandia et al. (2021) desenvolveram modelos utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) para avaliar as pressões máximas normais na condição estática em silos variando o peso específico (6; 7,5 e 9 kN m⁻³) e o coeficiente de atrito do produto armazenado (0,2; 0,4 e 0,6) e posterior comparação com a Eurocode 1, parte 4 (2006). As geometrias dos modelos dos silos usadas no método numérico foram baseadas nas dimensões de uma estação experimental. Os autores verificaram que os modelos correspondem ao que esperava-se diante das teorias: pressões normais aumentam em decorrência do aumento do peso específico e diminuem pelo aumento do coeficiente de atrito. Foi constatado no estudo que a pressão normal máxima ocorre na transição do corpo do silo com tremonha. A comparação entre as pressões obtidas pela Eurocode 1, parte 4 e MEF são apresentadas nas Figura 33 e 34.

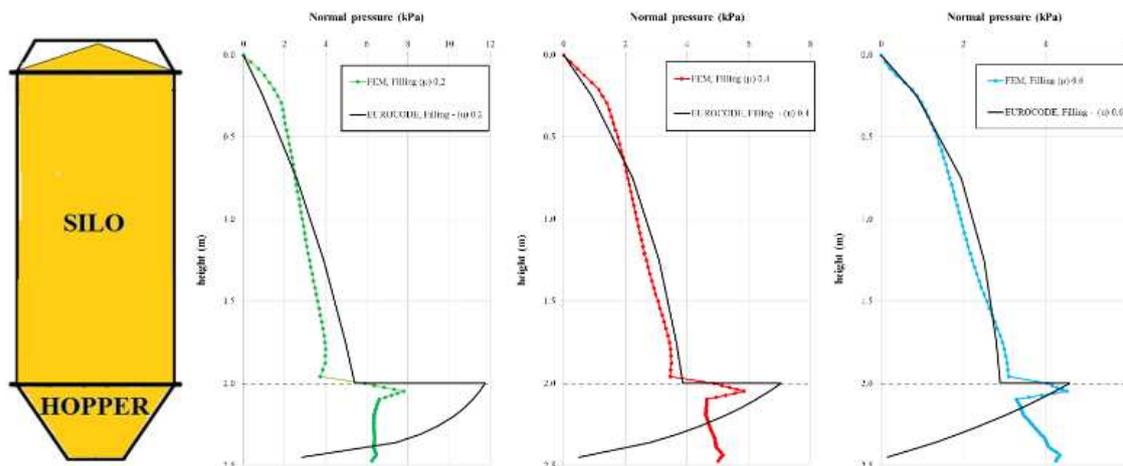


Figura 33. Pressões estáticas normais variando o coeficiente de atrito da parede e comparadas com Eurocode 1, part 4. Fonte: Gandia et al. (2021).

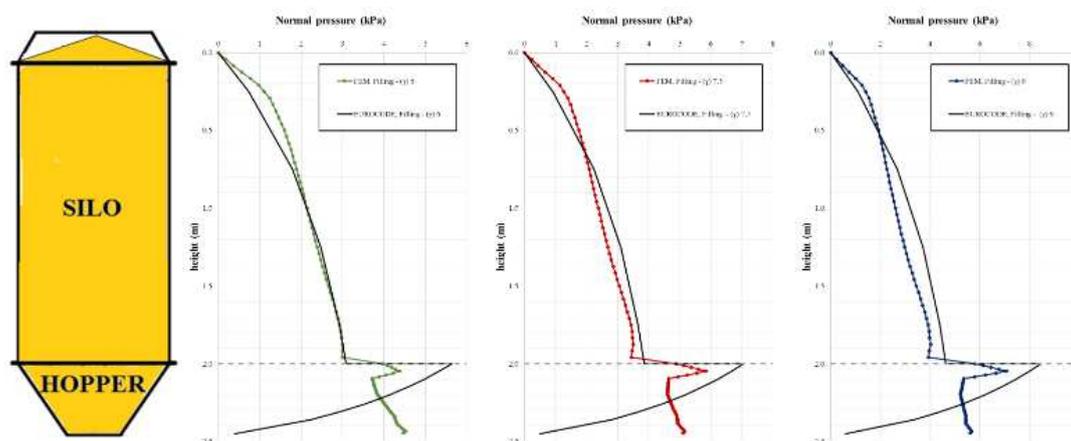


Figura 34. Pressões estáticas normais variando o peso específico do produto armazenado e comparadas com Eurocode 1, part 4. Fonte: Gandia et al. (2021).

Os autores relatam (Fig. 33 e 34) que dois problemas foram observados no estudo: embora as pressões normais no topo do silo sejam as mais baixas, o modelo criado pelo MEF apresentou divergência da norma. A segunda questão está relacionada ao maior coeficiente utilizado nas normas para produtos que tendem a gerar maiores pressões e menores coeficientes para produtos que tendem a proporcionar menores pressões, ou seja, para produtos armazenados com menor peso específico e maior coeficiente de atrito de parede, a norma apresenta coeficientes de segurança mais baixos que podem ser observados nas comparações com o MEF.

4. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Na conjuntura econômica mundial, o crescimento vertiginoso da produção e exportação dos setores de agroindústria e de alimentos do Brasil, consolida o país como player fundamental do setor, entretanto, o déficit de armazenagem configura um dos desafios da cadeia produtiva e, a implantação de unidades de armazenamento em propriedades agrícolas e plantas industriais, constitui premissa necessária para manter a competitividade do país no cenário mundial. O milho é o segundo grão mais produzido no Brasil, dada a sua importância para o agronegócio e para a balança comercial brasileira, justifica-se o estudo de estruturas de armazenamento para este produto.

Os silos verticais metálicos apresentam-se como soluções alternativas tanto para indústrias quanto para produtores agropecuários. A configuração predominante dos silos empregados em fazendas é de baixa relação entre a altura e o seu diâmetro, e fundo plano, pelo fato de permitirem aumento da capacidade de armazenamento com o aumento do diâmetro e apresentarem menor custo de construção, com predominância de silos metálicos. Em contrapartida, em cooperativas e agroindústrias é comum a utilização de silos metálicos com elevadas relações altura/diâmetro (silos esbeltos).

Contudo, apesar dos avanços da pesquisa realizados na temática, muitos dos problemas observados na prática persistem em razão da diversidade de variáveis que afetam o comportamento estrutural (comportamento do produto, pressões exercidas sobre as paredes do silo etc.), ocorrendo grande número de falhas estruturais e de fluxo.

A análise das principais normas e teorias existentes indica a existência de divergências entre elas, principalmente quando se referem à determinação das pressões exercidas pelo produto armazenado sobre a estrutura, e, além disso, não retratam as propriedades físicas e de fluxo características aos grãos brasileiros. Deste modo, as lacunas existentes sobre o comportamento das pressões que ocorrem com o carregamento e descarregamento do produto no interior da estrutura, justificam a importância de estudos que contribuam para projetos de silos metálicos, possibilitando a elaboração de projetos seguros, robustos e confiáveis.

Em função deste cenário, o estudo experimental e numérico das pressões nas configurações de silos mais empregadas no setor agropecuário brasileiro podem fornecer subsídios à futura norma brasileira, avaliando a relação da geometria do silo (relações altura/diâmetro predominantes no setor) quanto influência do produto granular nas pressões horizontais, verticais e de atrito.

5. REFERÊNCIAS

A.W. Jenike AW, Johanson JR, Carson JW (1973) Bin loads—Part 4: funnel-flow bins, J. Eng. Ind. 95 13–16, <https://doi.org/10.1115/1.3438089>.

ABIEC - Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes (2022) BEEF REPORT 2022: Relatório Anual. São Paulo, Brasil. 72 p. Disponível em: <<https://www.abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2022/>>. Acesso em: 02 outubro 2022.

ABPA - Associação Brasileira de Proteína Animal (2022) Relatório Anual ABPA (2022). São Paulo, Brasil. 144 p. Disponível em: <<https://abpa-br.org/mercados/#relatorios>>. Acesso em: 03 outubro 2022.

ACI - American Concrete Institute (1991). Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials. Revised. ACI 313.EUA, Detroit, p.313-377.

Alonso-Miravalles L, Zannini E, Bez J, Arendt EK, O'Mahony JÁ (2020) Physical and flow properties of pseudocereal-based protein-rich ingredient powders. Journal of Food Engineering 281:109973, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109973>.

Anjos CM (2018) Simulação numérica das pressões exercidas pelos grãos nas paredes dos silos verticais pelo método dos elementos finitos. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

Argenta ALDP (2010) Análise do comportamento estático e dinâmico de silos. Monografia de curso. Universidade Federal de Goiás. Departamento de Engenharia Civil.

AS- Australian Standart. (1996) AS 3774: Loads on bulks containers. Sydney, 1996.

ASAE - American Society of Agricultural Engineers (1988). “Loads exerted by freeflowing grain on bins.” ANSI/ASAE EP433 DEC 1988 (R2001), St. Joseph, MI.

Ayuga F, Aguado P, Gallego E, Ramírez A (2006) Experimental tests to validate numerical models in silos design. ASABE Annual International Meeting 0300(06): 064002, <https://doi.org/10.13031/2013.2089>.

Baroni GD, Benedeti PH, Seidel DJ (2017) Cenários prospectivos da produção e armazenagem de grãos no Brasil. Revista Thema 14(4): 55-64. DOI: <http://dx.doi.org/10.15536/thema.14.2017.55-64.452>.

Blight GE (1985) Temperature changes affect pressures in steel bins. International Journal of Bulk Solids Storage in Silos 1(3):1-7.

BMHB - British Materials Handling Board. (1985) Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers. Berkshire: BMHB.

Britton MG, Moysey EB (1986) Grain properties in the proposed new engineering practice on bin loads. ASAE Paper No. 86-4502. ASAE, St. Joseph, MI 49085.

Calderón CA, Olivares MCV, Uñac RO, Vidales AM (2017) Correlations between flow rate parameters and the shape of the grains in a silo discharge. *Powder Technology* 320: 43-50, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.07.004>.

CALIL Júnior C (1987) Estudo teórico e experimental das pressões em silos verticais cilíndricos de pequena relação altura/diâmetro. In: COLLOQUIA, 1987, Porto Alegre. Anais... Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1987, v.3, p.229-243.

Calil Júnior C (1990) Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Calil Júnior C, Cheung AB (2007) Silos: Pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. São Carlos: EESC. 232p.

Cheung, AB (2007) Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. doi:10.11606/T.18.2007.tde-30102007-213438.

Código Soviético. 1965. Ukanzia po proectirovaniu silosov dlia siputshich materialov. (Instructions for design of silos for granular materials). Soviet Code CH-302-65 Gosstroy, Moscow, USSR.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento (2022) Perspectivas para a Agropecuária - Volume 10 - Safra 2022/2023. Perspec. agropec., Brasília, v.10 – Safra 2022/23, p. 1-12, ago. 2020. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>.

Costa CA, Lopes Neto JP, Nascimento JWB do, Diniz MJ, Silva VR da (2014) Propriedades mecânicas e de fluxo de produtos agroindustriais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 18(7): 774-780, <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000700016>.

Couto A, Ruiz A, Aguado PJ (2012) 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* 85(1): 164-173, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.04.009>.

Couto A, Ruiz A, Aguado PJ (2013a) 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 Technology* 237: 450–467, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.030>.

Couto A, Ruiz A, Herraes L, Moran J, Aguado PJ (2013b) Measuring pressures in a slender cylindrical silo for storing maize. Filling, static state and discharge with diferente material flow rates and comparison with Eurocode 1 part 4. *Computers and Electronics in Agriculture* 96: 40–56, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.04.011>.

Dale AC, Robinson RN (1954) Pressures in deep storage structures. *Agricultural Engineering* 35(8):570-573.

Deckers HPF (2014) Estudo teórico de pressões em silos esbeltos prismáticos com descarga excêntrica. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Lavras – Lavras, Minas Gerais.

DIN - Deutsche Norm. DIN 1055-6: Basis of design and actions on structures- Part 6: Design loads for buildings and loads in silos bins. Berlin, Verlag, 2005.

DIN. 1964. Design loads for buildings — loads in silos. DIN 1055, Blatt 6, Deutsche Normen, Berlin; also Beton and Stahlbetonbau. 1965, 5:126-128.

Diniz MJ, Nascimento JWB (2006) Análise de pressões em silo vertical de alvenaria de tijolos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 10(1): 212–219.

EN 1991-4: EUROCODE 1. Actions on structures - Part 4: Silos and tanks. European Committee for Normalisation. Bruxelas, 2006,108 p.

Fank MZ, Christ D, C DL, Willrich FL, Lorenzi V (2015) Coeficiente de transferência de carga nas fundações de silos verticais cilíndricos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 19(9): 887-891. <https://doi.org/10.1590/18071929/agriambi.v19n9p887-891>.

Fank MZ, Nascimento JWB do, Cardoso DL, Meira AS, Willrich FL (2018) Pressões verticais e força de fricção compressiva em um grande silo. Engenharia Agrícola 38 (4): 498-503. https://dx.doi.org/10.1590/1809-4430_eng.agric.v38n4p498-503/2018.

Freitas EG A, Calil Júnior C (2005) Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano. Cadernos de Engenharia de Estruturas 7(24):1-34.

Freitas, EGA (2001) Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano. Tese Doutorado. São Carlos: USP/EESC.

Fullard LA, Godfrey AJR, Manaf Mf, Davies C, Cliff A, Fukuoka M (2020) Mixing experiments in 3D-printed silos; the role of wall friction and flow correcting inserts. Advanced Powder Technology 31: 1915–1923. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.02.024>.

Fürll C, Hoffmann T (2015) Assessment of the flow properties of crushed grain products depending on the granulometric condition. Agricultural Engineering International 17(4): 377–386.

Gallego E, Ruiz A, Aguado PJ (2015) Simulation of silo filling and discharge using ANSYS and comparison with experimental data. Computers and Electronics in Agriculture 118: 281-289, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.014>.

Gallego E, Rombach GA, Neumann F, Ayuga F (2010) Simulations of granular flow in silos with different finite element programs: Ansys vs. Silo. Transactions of the ASABE 53(3): 819–829.

Gandia RM, Gomes FC, Paula WCde, Aguado PJR (2021) Influence of specific weight and wall friction coefficient on normal pressures in silos using the Finite Element Method. *Revista Engenharia Na Agricultura - REVENG* 29: 192–203, <https://doi.org/10.13083/reveng.v29i1.12336>.

García-Macías E, Castro-Triguero R, Flores EIS, Yanez SJ, Hinrichsen K (2019) An interactive computational strategy for teaching the analysis of silo structures in civil engineering. *Computer Applications in Engineering Education* 27(4): 821-835, <https://doi.org/10.1002/cae.22112>.

García-Triñanes P, Luding S, Shi H (2019) Tensile strength of cohesive powders. *Advanced Powder Technology* 30(12): 2868-2880. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.08.017>.

González-Montellano C, Ramírez Á, Gallego E, Ayuga F (2011). Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silos. *Chemical Engineering Science* 66(21): 5116–5126, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.07.009>.

Goodey RJ, Brown CJ, Rotter JM (2017) Rectangular steel silos: Finite element predictions of filling wall pressures. *Engineering Structures* 132: 61-69, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.023>.

Guaita M, Couto A, Ayuga F (2003) Numerical simulation of wall pressure during discharge of granular material from cylindrical silos with eccentric hoppers. *Biosystems Engineering* 85: 101–109, [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00037-0](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00037-0).

Guo Z, Shan Z, Du D, Zhao M, Zhang M (2018) Experimental investigation on the flow properties of sand granules in the process of sand mold printing. *Rapid Prototyping Journal* 24(9): 1599-1608, <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-04-2017-0065>.

Hammadeh H, Askifi F, Ubysz A, Maj M, Zeno A (2019) Effect of using insert on the flow pressure in cylindrical silo. *Studia Geotechnica et Mechanica* 41: 177-183, <https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0022>.

Han Y, Jia F, Li G, Liu H, Li J, Chen P (2019) Numerical analysis of flow pattern transition in a conical silo with ellipsoid particles. *Advanced Powder Technology* 30(9): 1870-1881, <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.06.004>.

Hilal A, Sanad AM, Abdelbarr MH, Ramadan OMO, Abdalla HÁ (2022) Three Dimensional Finite Element Analysis for Pressure on Flexible Wall Silos. *Appl. Sci.* 12: 9251, <https://doi.org/10.3390/app12189251>.

Holst JMFG, Ooi JY, Rotter JM, Rong GH (1999) Numerical Modeling of Silo Filling. I: Continuum Analyses. *Journal of Engineering Mechanics* 125(1): 94–103, 1999, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1999\)125:1\(94\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1999)125:1(94)).

Horabik J, Parafiniuk P, Molenda M (2016) Experiments and discrete element method simulations of distribution of static load of grain bedding at bottom of shallow model silo,

Biosystems Engineering 149: 60-71,
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.012>.

Horabik J, Molenda M (2017) Distribution of static pressure of seeds in a shallow model silo. *Intitute of Agrophysics* 31: 167-174, <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0038>.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2020) Levantamento Sistemático da Produção Agrícola - Estatística da Produção Agrícola. 144 p. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2415/epag_2020_dez.pdf. Acesso em: 07 de dezembro de 2020.

International Organization for Standart. ISO 11697. Bases for design of structures: Loads due to bulk materials. Switzerland: International Standard. London, 2012.

ITO JE Colapso de Janssen - Princípios matemáticos do cálculo de silos cilíndricos para grãos. *Construmetal 2016 – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.* p 1 - 23.

Jager PD, Bramante T, Luner PE (2015) Assessment of pharmaceutical powder flowability using shear cell-based methods and application of Jenike's methodology. *Journal of Pharmaceutical Sciences* 104(11): 3804-3813, <https://doi.org/10.1002/jps.24600>.

Janssen HA (1895) Experiments on grain pressures in silos. *Verein Deutscher Ingenieure, Zeitschrift* 39: 1045-1049.

Jayachandran LE, Nitin B, Rao OS (2019) Simulation of the stress regime during grain filling in bamboo reinforced concrete silo, *Journal of Stored Products Research* 83: 123-129, <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.06.011>.

Jenike AW (1980) Effect of solids flow properties and hopper configuration on silo loads. *Unit and Bulk Materials Handling*. F. J. Loeffle and C. R. Procter (ed) pp. 97-106. American Society of Mechanical Engineers, New York, NY.

JinY, Lu HF, Guo XL, Gong X (2018) The effect of water addition on the surface energy, bulk and flow properties of lignite. *Fuel Processing Technology* 176: 91-100, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.024>.

Kobylka R, Horabik J, Molenda M (2017) Numerical simulation of the dynamic response due to discharge initiation of the grain silo. *International Journal of Solids and Structures* 106: 27-37, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.12.001>.

Kobylka R, Molenda M, Horabik J (2020) DEM simulation of the pressure distribution and flow pattern in a model grain silo with an annular segment attached to the wall. *Biosystems Engineering* 193: 75-89, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.013>.

Koynov S, Glasser B, Muzzio F (2015) Comparison of three rotational shear cell testers: Powder flowability and bulk density. *Powder Technology* 283: 103-112, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.04.027>.

Lei Y, Ma O, Shi Q (2019) Side-wall pressure distribution of cylindrical granular containers with flat bottom, *Powder Technology* 353(1): 57-63, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.003>.

Lopes Neto JO, Nascimento JWBdo, Fank MZ (2014) Forças verticais e de atrito em silos cilíndricos com fundo plano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 18(6): 652–657, <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000600013>.

Lopes Neto JP, Nascimento JWB do, Calil Junior C (2008) Análise estrutural de silos metálicos prismáticos. *Ciência e Agrotecnologia* 32(4): 1252-1258, <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000400033>.

Macri D, Chirone R, Salehi H, Sofia D, Materazzi M, Barletta D, Lettieri P, Poletto M (2020) Characterization of the bulk flow properties of industrial powders from shear tests. *Processes* 8(5): 540, <https://doi.org/10.3390/pr8050540>.

Madrona FS (2008) Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica. Dissertação Mestrado. São Carlos: EESC/USP.

Madrona FS, Calil Junior C (2009) Análise das pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica. *Cadernos de Engenharia de Estruturas* 11(49): 37-56.

Malagalage A, Ratnayake C, Saasen A, Thomassen T, von-Hafenbrädl FO (2018) Flow properties of drill cuttings with varying drilling fluid content using Jenike shear testing. *Chemical Engineering & Technology* 41(8): 1544-1550, <http://dx.doi.org/10.1002/ceat.201700554>.

Mallick SS, Rohilla L, Garg V, Setia G (2018) Modeling flow properties of fine dry powders using particle morphological properties and its effects on geometry of fly ash evacuation hoppers. *Particulate Science & Technology* 36(4): 464–472, <https://doi.org.ez52.periodicos.capes.gov.br/10.1080/02726351.2017.1367746>.

Manbeck HB, Muzzelo LM (1985) Thermally induced pressure in a model grain bin. *Transactions of the ASAE* 28(4):1253-1258.

Maraveas C (2020) Concrete Silos: Failures, Design Issues and Repair/Strengthening Methods. *Applied Sciences*. 10(11): 3938, <https://doi.org/10.3390/app10113938>.

Mathews JC, Wu W (2016) Model tests of silo discharge in a geotechnical centrifuge, *Powder Technology* 293: 3-14, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.11.025>.

Mehretehran AM, Maleki S (2018) 3D buckling assessment of cylindrical steel silos of uniform thickness under seismic action. *Thin-Walled Structures* 131: 654-667, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.040>.

Meira AS, Mota EL, Bandeira DJA, Silva VR, Silva LA (2019) Propriedades de fluxo e pressões para projeto de silo vertical armazenador de açúcares. *Revista Engenharia na Agricultura – Reveng* 27(2): 104-110, <https://doi.org/10.13083/reveng.v27i2.813>.

Moya M, Aguado PJ, Ayuga F (2013) Mechanical properties of some granular agricultural materials used in silo design. Intitute of Agrophysics 27:181-193, <https://doi.org/10.2478/v10247-012-0084-9>.

Moya M, Guaita M, Aguado PJ, Ayuga F (2006) Mechanical properties of granular agricultural materials. Part 2. Trans. ASABE 49: 479-489, <https://doi.org/10.13031/2013.20403>.

Moya, M, Ayuga F, Guaita M, Aguado PJ (2002) Mechanical properties of granular agricultural materials. Trans. ASAE 45:1569-1577, <https://doi.org/10.13031/2013.11062>.

Moya M, Sánchez D, Villar-García JR (2022) Values for the Mechanical Properties of Wheat, Maize and Wood Pellets for Use in Silo Load Calculations Involving Numerical Methods. Agronomy 12: 1261, <https://doi.org/10.3390/agronomy12061261>.

Nascimento WBdo, Lopes Neto JP, Montross MD (2013) Horizontal pressures in cylindrical metal silos and comparison with diferente international standarts. Engenharia Agrícola 33(4): 601-611, <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000400002>.

Nguye TV, Brennen CE, Sabersky RH (1980) Funnel flow in hoppers. Transactions of the ASME Series E, 102:729-735.

Oginni O, Fasina O (2018) Theoretical estimation of silo design parameters for fractionated loblolly pine grinds – Moisture content and particle size effects. Industrial Crops and Products 123: 379-385, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.005>.

Olivares MCV, Benito JG, Uñac RO, Vidales AM (2018) Towards a one parameter equation for a silo discharging model with inclined outlets. Powder Technology 336:265-272, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.010>.

Palma G (2005) Pressões e fluxos em silos esbeltos ($h/d \geq 1,5$) Dissertação Mestrado em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

Palma G, Calil Júnior C (2008) Pressões e fluxo em silos esbeltos ($H/D \geq 1,5$). Caderno de Engenharia de Estruturas 10:129-150.

Pardikar K, Zahid S, Wassgren C (2020) Quantitative comparison of experimental and Mohr-Coulomb finite element method simulation flow characteristics from quase two-dimensional flat-bottomed bins. Powder Technology 367:689– 702, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.036>.

Paula WC (2020) Influência da geometria de tremonhas concêntricas e excêntricas nos esforços de silos esbeltos metálicos. Tese de doutorado - Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Lavras.

Platanov PN, Kovtun AP (1959) Davlenic zerna na stenki silosov elevatorov (The pressure of grain on silo walls). Mukomolno Elevatornaia Promyshlennost 25(12):22-24.

Ramírez A, Nielsen J, Ayuga F (2010) Pressure measurements in steel silos with eccentric hoppers. *Powder Technology* 201(1): 7-20, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.02.027>.

Ramírez A, Moya M, Ayuga F (2010b) Determination of the mechanical properties of powdered agricultural products and sugar. *Inter Science* 26:220-230, <https://doi.org/10.1002/ppsc.200800016>.

Ramírez A, Ansourian P, Nielsen J, Rasmussen K, Ayuga F (2009) Analysis of Measurements Obtained by Plate-type Pressure Cells Having a Recess - DEM Simulation. *Bulk Solids & Powder – Science & Technology*, 4(1):34-38.

Ramírez-Gómez A (2020) O método dos elementos discretos na pesquisa de silo / caixa. *Avanços recentes e tendências futuras. Particulate Science and Technology* 38(2): 210-227, [10.1080 / 02726351.2018.1536093](https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1536093).

Reimbert MA (1943) Recherches nouvelles sur les efforts exercés par les matières pulvérulentes ensilées sur les parois des silos. *Annales Institute Technique du Batiment et des Travaux Publics. Series I. N° 11*, pags. 49-60.

Rodrigues MHBS, Sousa VFO, Santos GL, Nobrega EP, Andrade FE (2018) Armazenamento de grãos em pequenas propriedades de São Francisco, Paraíba, Brasil. *Colloquium Agrariae* 14(2):35-47.

Rotter JM (2001) Pressures, stresses and buckling in metal silos containing eccentrically discharging solids. 60th Birthday celebration for Univ-Prof Dipl-Ing Dr.techn. Richard Greiner, Oct. 12, Institute for Steel, Timber and Shell Structures, Technical University Graz, Austria. 2001.

Ruiz A, Couto A, Aguado PJ (2012) 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* 85: 174-187, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.04.009>.

Sadowski AJ, Rotter JM (2011) Steel silos with different aspect ratios: I - behavior under concentric discharge. *Journal of Constructional Steel Research* 67(10): 1537-1544, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.03.028>.

Sadowski AJ, Rotter JM, Nielsen J (2020) A theory for pressures in cylindrical silos under concentric mixed flow. *Chemical Engineering Science* 223: 115748, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115748>.

Saleh K, Golshan S, Zarghami R (2018) A review on gravity flow of free-flowing granular solids in silos – Basics and practical aspects, *Chemical Engineering Science* 192: 1011-1035, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.08.028>.

Salehi H, Barletta D, Poletto M (2017) A comparison between powder flow property tests. *Particuology* 32:10-20, <https://doi.org/10.1016/j.partic.2016.08.003>.

Saul RA (1953) Measurement of grain pressures on bin walls and floors. *Agricultural Engineering*. 34(4): 321-324.

Schulze D (1996) Flowability Of Bulk Solids - Definition And Measuring Techniques, Part I And II, *Powder and Bulk Engineering* 10(4): 45-61.

Silva Neto, WA, Santos TL (2019) O déficit na capacidade estática de armazenamento nas regiões centro-oeste e sul do Brasil. *Revista de Economia e Agronegócio* 17(3):507-530.

Stasiak M, Molenda M, Bańda M, Gondek E (2015) Mechanical properties of sawdust and woodchips. *Fuel* 159: 900-908, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.07.044>.

Sun S, Zhao J, Zhang C (2018) Calculation of Silo Wall Pressure considering the Intermediate Stress Effect. *Advances in Civil Engineering* 2018(1): 1–10, <https://doi.org.ez52.periodicos.capes.gov.br/10.1155/2018/3673515>.

Tascón A (2017) Design of silos for dust explosions: Determination of vent area sizes and explosion pressures. *Engineering Structures* 134: 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.016>.

Usry JL, Thompson SA (1986) Loads on vertical stiffeners on corrugated grain bins. *Transactions of the ASAE* 29(5):1355-1363.

Walker DM (1966) An approximate theory for pressures and arching in hoppers. *Chemical Engineering Science* 21:975-997.

Walters JK (1973) A theoretical analysis of stresses in axially-symmetric hoppers and bunkers. *Chemical Engineering Science* 28:779-789.

Wang Y, Lu Y, Ooi JY (2015) A numerical study of wall pressure and granular flow in a flat-bottomed silo. *Powder Technology* 282: 43-54, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.01.078>.

Westover TL, Phanphanich M, Ryan JC (2015) Comprehensive rheological characterization of chopped and ground switchgrass. *Biofuels* 6(5-6): 249-260, <http://dx.doi.org/10.1080/17597269.2015.1091189>.

Wilms H (1985) Calculation of stresses in silos by the method of characteristics. *Bulk Solids Handling* 5(2):425-429.

Wójcik M, Sondej M, Rejowski K, Tejchman J (2017) Full-scale experiments on wheat flow in steel silo composed of corrugated walls and columns. *Powder Technology* 311: 537-555, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.066>.

Wójcika M, Tejchman J, Enstad GG (2012) Confined granular flow in silos with inserts - Full-scale experiments. *Powder Technology* 222:15-36, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.01.031>.

Xu Z, Liang P (2022) Modified lateral pressure formula of shallow and circular silo considering the elasticities of silo wall and storage materials. *Sci. Rep* 12: 7069, <https://doi-org.ez292.periodicos.capes.gov.br/10.1038/s41598-022-11305-6>.

Xue J, Schiano S, Zhong W, Chen L, Wu CY (2019) Determination of the flow/no-flow transition from a flat bottom hopper. *Powder Technology* 358: 55-61, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.063>.

Yu X, Raeesi A, Ghaednia H, Heydariha J, Das S, Xie S (2017) Behavior of a Large Steel Field Silo Structure Subject to Grain Loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 31(5): 04017038, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943.5509.0001037](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943.5509.0001037).

Zhang Y, Jia F, Zeng Y, Han Y, Xiao Y (2018) DEM study in the critical height of flow mechanism transition in a conical silo. *Powder Technology* 331:98-106, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.024>.

Zhang Q, Puri VM, Manbeck HB, Wang MC (1987) Finite element model for predicting static and thermally induced bin wall pressures. *Transactions of the ASAE* 30(6):1797-1806.

Zhao Q, Jofriet JC (1992) Structural loads on bunker silo walls: Numerical study. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 51:1–13.

CAPÍTULO II

**PRESSÕES EM SILO METÁLICO BAIXO COM FUNDO PLANO
ARMAZENANDO GRÃOS DE MILHO****PRESSURES IN SQUAT STEEL SILO WITH FLAT BOTTOM
STORING MAIZE GRAIN**

Artigo submetido na Revista Biosystems Engineering (ISSN 1537-5110).

Nomenclatura

Símbolos

d_i - Diâmetro interno do cilindro, m.

$F_{h(1,12)u}$ - Força na célula de carga de tração posicionada na parte superior do conjunto de molas - anéis 1 a 12, kN.

$F_{h(1,12)d}$ - Força na célula de carga de tração posicionada na parte inferior do conjunto de molas - anéis 1 a 12, kN.

$F_{w(1,12)r}$ - Força na célula de carga de tração posicionada no lado direito do suporte do anel - anéis 1 a 12, kN.

$F_{w(1,12)l}$ - Força na célula de carga de tração posicionada no lado esquerdo do suporte do anel - anéis 1 a 12, kN.

F_{vbr} - Força na célula de carga tipo viga posicionada na base do pilar direito, kN.

F_{vbl} - Força na célula de carga tipo viga posicionada na base do pilar esquerdo, kN

h_r - Altura do anel, m.

$C_{r(1,12)}$ - Valor constante dos momentos, anéis 1 a 12.

$p_{h(1,12)}$ - Pressão normal na parede do cilindro das células de carga posicionadas no conjunto de molas - anéis 1 a 12, kPa.

$p_{w(1,12)}$ - Pressão de atrito na parede do cilindro a partir das células de carga posicionadas nos suportes dos anéis - anéis 1 a 12, kPa.

C_d - Coeficiente de sobrepressão.

$p_{h(1,12)d}$ - Pressão normal dinâmica na parede do cilindro das células de carga posicionadas no conjunto de molas - anéis 1 a 12, kPa.

$p_{h(1,12)f}$ - Pressão normal estática na parede do cilindro a partir das células de carga de tensão posicionadas no conjunto de molas - anéis 1 a 12, kPa

W - Peso do produto armazenado, kN.

H/D - Relação altura/diâmetro.

PRESSÕES EM SILO METÁLICO BAIXO COM FUNDO PLANO ARMAZENANDO GRÃOS DE MILHO

RESUMO

Silos metálicos baixos (relação H/D inferior a 1,5) de fundo plano são utilizados mundialmente em fazendas para armazenar produtos granulares de alto valor comercial, com destaque para soja e milho. No entanto, muitas questões permanecem sem resposta em relação ao armazenamento e estimativa de pressões em silos baixos. Além disso, existem poucas estações experimentais em escala real no mundo para facilitar o estudo das pressões dos silos, dificultando o progresso nessa área. O objetivo deste artigo consiste em analisar as pressões em um silo em escala real obtidos a partir de testes realizados utilizando produto de fluxo livre (milho). Os resultados obtidos foram comparados com o Eurocode1, parte 4, ANSI/ASAE S433.1 e o modelo de Rankine-Calil. A altura de enchimento do produto utilizada foi aproximadamente 0,75 m (relação H/D igual a 1), considerando configuração de fundo plano com descarga concêntrica. As pressões foram avaliadas nas fases de carregamento e descarga. Pressões normais e de atrito no silo, coeficiente de sobrepressão e peso do produto foram registrados. Os resultados obtidos evidenciam que os avanços da pesquisa no campo são urgentemente necessários para silos baixos. As pressões horizontais apresentaram picos que ultrapassaram os códigos normativos Eurocode1, parte 4 e ANSI/ASAE S433.1, somente o modelo de Rankine-Calil apresentou-se adequado comparativamente aos valores obtidos experimentalmente. As pressões de atrito não foram consistentes com os valores obtidos teoricamente pelos códigos normativos Eurocode1, parte 4 e ANSI/ASAE S433.1. Uma sobrepressão na parte inferior do silo piloto foi observada. Sugere-se que o coeficiente de sobrepressão seja considerado no cálculo das pressões na fase dinâmica.

Palavras-chave: Silos cilíndricos; Silo de fundo plano; Parede lisa; Estação experimental em escala real; Atrito e pressões normais; Coeficiente de sobrepressão.

ABSTRACT

Squat steel silos (H/D ratio less than 1.5) with a flat bottom are used worldwide on farms to store granular products with high commercial value, especially soybeans and maize. However, many questions remain unanswered regarding storage and estimation of pressures in squat silos. In addition, there are few full-scale experimental stations in the world to facilitate the study of silo pressures, hindering progress in this area. The objective of this article is to analyze the pressures in a pilot silo test station obtained from tests performed using free-flowing product (maize). The results obtained were compared with Eurocode 1, part 4, ANSI/ASAE S433.1 and the Rankine-Calil model. The filling height of the product used was approximately 0.75 m (H/D ratio equal to 1), considering a flat bottom configuration with concentric discharge. Pressures were evaluated in the filling and discharge stages. Normal and friction pressures in the silo, overpressure coefficient and stored product weight were recorded. The results obtained show that research advances in the area are urgently needed for squat silos. The horizontal pressures showed peaks that exceeded the standards: Eurocode1, part 4 and ANSI/ASAE S433.1. Only the Rankine-Calil model was adequate compared to the values obtained experimentally. Friction pressures were not consistent with values theoretically obtained by Eurocode 1, part 4 and ANSI/ASAE S433.1. An overpressure at the bottom of the pilot silo was observed. It is suggested that the overpressure coefficient be considered in the calculation of pressures in the dynamic stage.

Keywords: Cylindrical silos; Flat-bottom silo; Flat wall; Full-scale experimental station; Friction and normal pressures; Overpressure coefficient.

1. Introdução

Na conjuntura econômica mundial, o setor agrícola brasileiro constitui um importante papel nos mercados de cereais e oleaginosas, com crescimento vertiginoso da produção e exportação (Carauta, Parussis, Hampf, Libera, Berger, 2021; FAO, 2020; Rotundo et al., 2022), cuja estimativa para safra 2021/2022 é de 272,5 milhões de toneladas, com destaque para as commodities de soja e milho, que correspondem a 90% da produção (CONAB, 2022). O fato de o país configurar importante posição como produtor e exportador de grãos, salienta as preocupações quanto ao armazenamento, onde além da excelência em termos de produção, se faz necessário investimento em silos (Baroni, Benedeti, Seidel, 2017; Dornelas et al., 2021).

No armazenamento em fazendas, predomina-se o emprego de silos cilíndricos metálicos de fundo plano com relação entre altura e diâmetro (H/D) inferior a 1,5. Essas estruturas além de permitirem maior capacidade de estocagem, apresentam menor custo de construção (Ayres, Nascimento, Mascarenhas, 2020; Diniz & Nascimento, 2006; Freitas & Calil Júnior, 2005; Khalil, Ruggieri, Uva, 2022; Saleh, Golshan, Zarghami, 2018; Vidal, Guaita, Ayuga, 2005). No Brasil, embora não se disponha de números exatos, sabe-se que a armazenagem a nível fazenda é mínima, com capacidade estática inferior a 14% (CONAB, 2022b).

Aliada a necessidade de expansão, o setor enfrenta problemas de acidentes (deformações e colapsos estruturais), cujos registros têm-se intensificado nos últimos anos (Dornelas et al., 2021; Livaoglu & Durmus, 2016; Silvestri et al., 2022; Zaccari & Cudemo, 2016), destacando-se que a predominância dos casos de colapsos ocorridos no Brasil foram de silos metálicos de fundo plano com baixa relação altura-diâmetro ($H/D \leq 1,5$), os quais armazenavam grãos, majoritariamente, milho, soja e trigo.

No projeto de silos a determinação das propriedades do produto a se armazenar são fundamentais para definição do fluxo e cálculo das pressões que irão ocorrer durante as operações de carregamento, armazenamento e descarregamento, de tal modo que se obtenha uma estrutura econômica, segura e com durabilidade (Alonso-Miravalles, Zannini, Bez, Arendt, O'Mahony, 2020; Ambrose, Jan, Siliveru, 2016; Lopes Neto, Nascimento, Silva, Costa, 2013; Mansour et al., 2022; Oliveira, Corrêa, Oliveira, Vargas-

Elías, Calil Júnior, 2022; Purushotham, Rao, Rao, 2022; Stasiak et al, 2020; Wiącek et al., 2021).

Os tipos de padrões de fluxo produzidos no interior dos silos têm um efeito significativo na distribuição da pressão dinâmica exercida nas paredes e fundo (Hammadeh, Askifi, Ubysz, Maj, Zeno, 2019; Saleh et al., 2018; Wiącek et al., 2021; Xue, Schiano, Zhong, Chen, Wu, 2019), sendo preponderante sua determinação em projeto. Existem dois padrões de fluxo principais, fluxo de massa e fluxo de funil. O primeiro caracteriza-se pelo movimento de todas as partículas no interior da estrutura, imediatamente após abertura do orifício de descarga, seguindo o padrão de primeiro a entrar, primeiro a sair, gerando altas pressões dinâmicas nas paredes (Gandia et al., 2022; Oginni & Fasina, 2018; Olivares, Benito, Uñac, Vidales, 2018; Saleh et al., 2018). Em contrapartida, o segundo é definido pela formação de um canal preferencial de fluxo e porções de produtos estagnadas no entorno das paredes e a sequência primeiro a entrar, último a sair (Fullard et al., 2020; Gandia et al., 2022; Khalil et al., 2022), configurando padrão típico de silos de fundo plano (Han et al., 2019).

Os estudos sobre a interação entre a estrutura do silo e o material armazenado datam de 1882, sendo Roberts o primeiro a demonstrar que a pressão total no fundo de um silo era menor do que o esperado devido ao atrito do material contido no silo (Roberts, 1882; Roberts, 1884). Em 1895, Janssen, a partir do equilíbrio estático das forças em uma parte elementar do produto armazenado, elaborou a primeira formulação para o cálculo das pressões em silos. Desde então, muitos modelos foram desenvolvidos para calcular tensões dentro de silos (Airy, 1897; Freitas & Calil Júnior (Rankine-Calil), 2005; Jenike, Johanson, Carson 1973; Koenen, 1896; Matchett, 2020; Reimbert & Reimbert-Auclair, 1982; Theimer, 1958; Walker, 1966; Walters, 1973). A formulação básica para a previsão das pressões durante o carregamento nos códigos normativos estrangeiros vigentes (AS 3774; EN 1991-4; ANSI/ASAE S433.1; DIN 1055 e ISO 11697) é obtida da teoria de Janssen (Freitas & Calil Júnior, 2005; Goodey, Brown, Rotter, 2017; Khalil et al., 2022; Matchett, 2020). Todavia, esse ponto em comum não implica que as normas apresentem as mesmas pressões estáticas para um determinado produto a armazenar, pois a equação de Janssen é função de quatro variáveis, sendo três dependentes das propriedades intrínsecas ao produto: densidade, coeficiente de atrito com a parede e a relação entre pressões horizontais e verticais (fator K); e a quarta variável dependente da geometria do silo (raio hidráulico).

A determinação das pressões dinâmicas é obtida aplicando-se coeficientes de majoração as pressões estáticas, sendo as recomendações nos códigos normativos indicadas de acordo com a esbeltez (relação H/D) da estrutura. Por essa razão, existem várias divergências entre códigos normativos, as quais são evidenciadas em trabalhos de pesquisas, bem como em falhas de projetos e grande ocorrência de colapsos estruturais (Khalil et al., 2022; Mansour et al., 2022; Nascimento, Lopes Neto, Montross, 2013; Purushotham et al., 2022; Sadowski, Rotter, Nielsen, 2020; Vidal et al., 2005; Wójcik, Sondej, Rejowski, Tejchman, 2017). Para silos de baixa relação altura/diâmetro, muitos pesquisadores questionam a validade da solução de Janssen e propõem outras soluções, tais como o modelo de Rankine (1857) ou Coulomb (1776). Isto é também reconhecido pela norma alemã DIN 1055-6 (DIN, 2005), que indica que as pressões nas paredes sejam obtidas pela teoria das pressões de terra para $H/D < 0,8$ e pela norma europeia EN 1991-4:2006 que sugere a aplicação do modelo de Reimbert modificado para silos baixos ($0,4 < H/D \leq 1,0$).

Os modelos de Airy, Janssen, M & R Reimbert, Bischara e Rankine-Calil foram avaliados em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano por Freitas e Calil Júnior (2005). Os autores constataram que o modelo linear de Rankine-Calil mostrou-se mais adequado para a previsão das pressões para silos com relações $H/D \leq 1$ (Freitas & Calil Júnior, 2005). O modelo de Rankine-Calil é uma modificação do método original de Rankine (1857), pois este não é muito preciso para silos de baixa relação altura/diâmetro, tendo em vista que ignora as condições de contorno deste tipo de unidade armazenadora e a força de atrito nas paredes é considerada nula (Freitas & Calil Júnior, 2005; Safarian & Harris, 1985), e o atrito apresenta influência significativa nas pressões laterais das paredes (Sun et al., 2020).

Nesse contexto, as estações experimentais são consideradas abordagens interessantes para entender o que acontece dentro de silos reais (Gandia et al., 2022), mensurando as pressões de forma fidedigna e possibilitando a compreensão do comportamento do produto e seus respectivos padrões de fluxo (Chen, Rotter, Ooi, Zhong, 2007). Em particular, poucas observações experimentais são avaliáveis para silos de baixa relação altura/diâmetro, sendo o tipo de unidade armazenadora que necessita de mais estudos, tendo em vista sua tendência mundial de armazenagem em fazendas e registros de ocorrências de colapsos (Mansour et al., 2022; Ruiz, Couto, Aguado, 2012; Vidal et al., 2005).

Portanto, o presente trabalho oferece novas informações de testes experimentais realizados em um silo piloto baseado no projeto proposto por Pieper e Schütz (Pieper & Schütz, 1980), analisando as pressões estáticas e dinâmicas das paredes de silo cilíndrico baixo ($H/D = 1$) de fundo plano, comparando os resultados obtidos com os códigos normativos EN 1991-4 (CEN, 2006), ANSI/ASAE S433.1 (ANSI, 2019) e o modelo de Rankine-Calil (Freitas & Calil Júnior, 2005).

2. Material e Métodos

2.1. Descrição geral da instalação

A estação de testes em escala piloto estava localizada na Universidade Federal de Lavras (Brasil) (Fig. 1) e foi previamente configurada, calibrada e validada pelos pesquisadores do grupo de pesquisa sobre pressão e fluxo em silos e produtos armazenados (Gandia, Gomes, de Paula, Oliveira Junior, Rodríguez, 2021). A estação experimental consiste em um silo pulmão (armazenamento do material durante os testes), elevador de canecas (facilitando carregamento e descarga do silo piloto) e silo piloto, contendo a instrumentação necessária para medir o comportamento do material armazenado. (Fig.1).

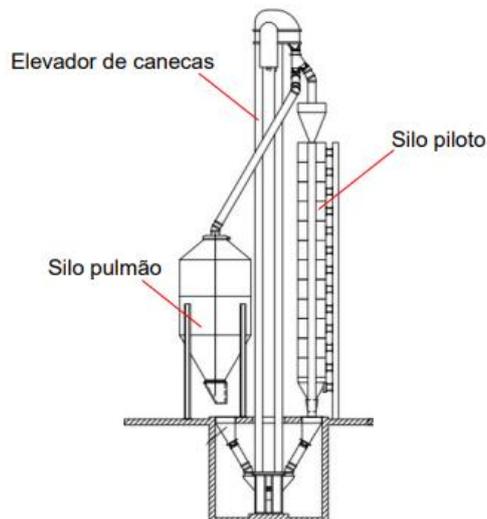


Figura 1 - Estação de teste em escala piloto.

2.1.1. Geometria do silo experimental

O silo piloto é constituído por doze anéis de parede lisa, cada anel medindo 495 mm de altura e separados por uma folga de precisamente 5 mm (restringindo a influência vertical entre os anéis) e diâmetro interno de 70 cm, resultando uma altura total de 6 metros, com capacidade total de armazenagem de 2,35 m³ (Fig. 2).

A espessura da parede é de 10 mm, tornando-a rígida para os valores das pressões atuantes, para não influenciar as medidas nos sensores atuantes. O orifício de descarga apresenta um diâmetro de 20 cm, sendo empregada uma chapa metálica tipo gaveta para controle da abertura que ocorreu manualmente.

A configuração permite estudos com esbelto, medianamente esbelto ou silo baixo dependendo da profundidade do material armazenado. O presente estudo foi realizado com relação H/D igual a 1, considerado um silo baixo. Foram utilizados dois anéis do silo, conforme apresentado na Figura 2.

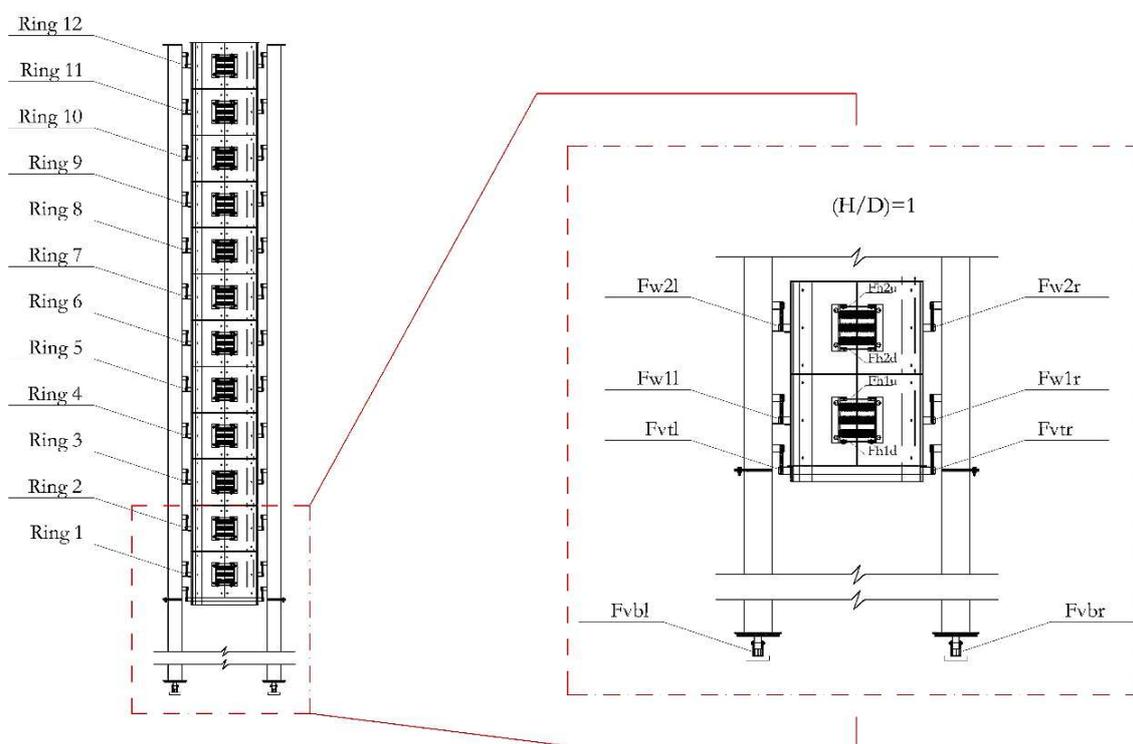


Figura 2 - Geometria do silo piloto e visão detalhada dos anéis.

2.1.2. Instrumentação e sistema de aquisição de dados

As células de medição consistem duas células de carga tipo viga, localizadas na base de cada pilar, com capacidade de 50 kN para medição da força total mobilizada pelo atrito, (Fig. 3); quatro células de pressão tipo diafragma com capacidade nominal de 70 kPa posicionadas no fundo plano, distribuídas e fixadas em suas paredes (Fig. 4) e cinquenta células de carga de tração (extensômetros), com capacidade nominal de 8 kN, sendo vinte e seis instaladas na posição vertical, apoiando ambas as extremidades de cada anel e o fundo do silo e mensuram qualquer força de atuação vertical (Fig. 5) e vinte e quatro situadas na posição horizontal, determinando a pressão horizontal na parede. Os

pares de células de carga são pré-tracionados por três molas helicoidais, para que permaneçam sujeitas a esforço de tração inicial (Fig. 5).

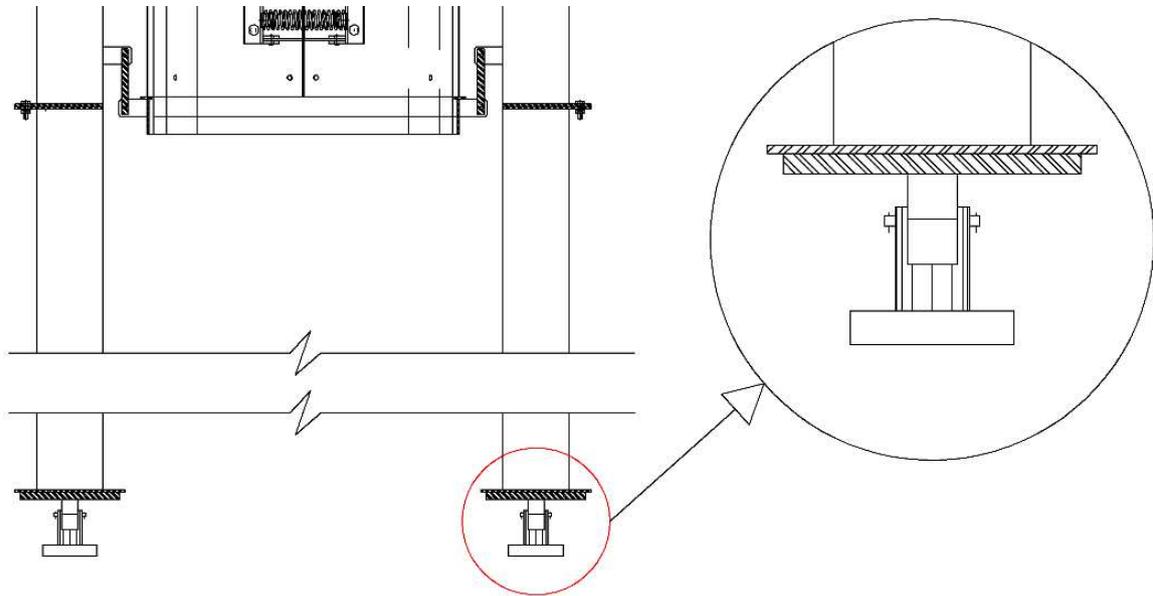


Figura 3 - Localização das células de medição no silo piloto: célula de carga do tipo viga na base do pilar.

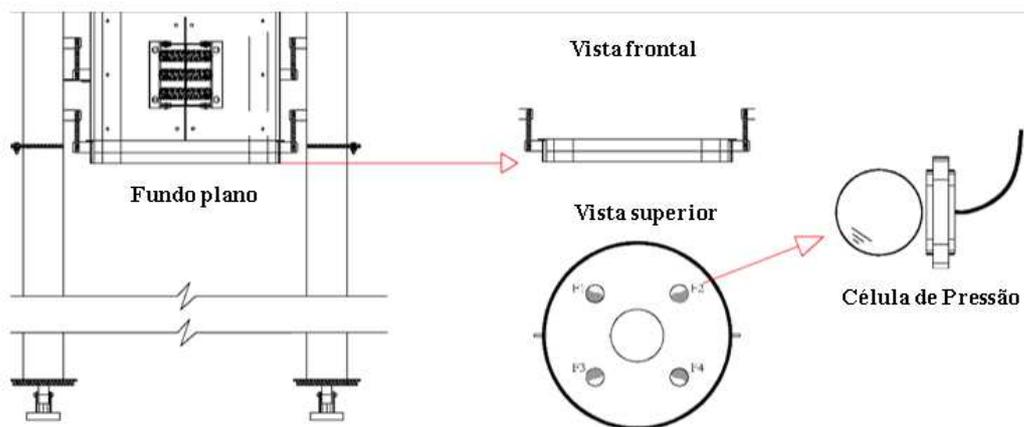


Figura 4 - Localização dos sensores no silo piloto: fundo plano e posicionamento das células de pressão tipo diafragma.

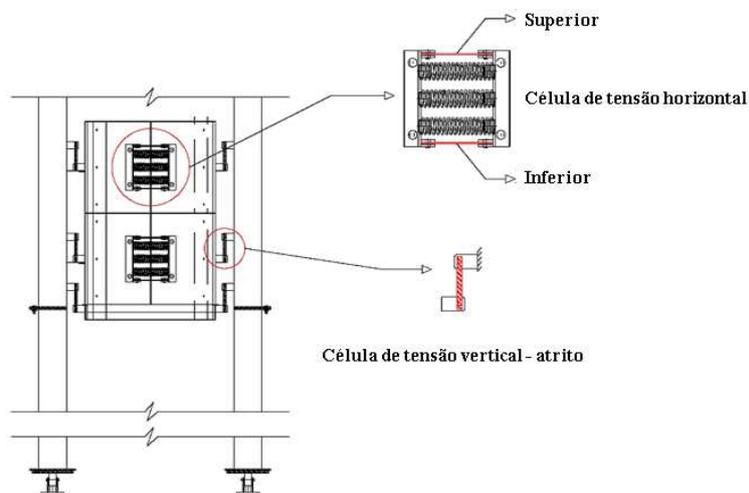


Figura 5 - Localização dos sensores no silo piloto: células de carga de tração posicionadas nos anéis (vertical - atrito, horizontal - normal).

Todas as células de medição do silo piloto foram conectadas ao sistema de aquisição de dados controlado por um computador portátil. A aquisição dos sinais foi realizada utilizando um sistema de aquisição de dados LYNX, modelo DS2000, com 4 placas de aquisição (2 x AI2160 e 2 x AI2161), totalizando 64 canais. Este modelo permite uma frequência máxima de amostragem de 65,5 kHz.

Foi utilizada uma frequência de amostragem de 2 Hz, tendo como base testes preliminares realizados (Gandia, Gomes, de Paula, Oliveira Junior, Rodriguez, 2021; Gandia, Gomes, de Paula, Rodriguez, 2021). Nessa frequência não houve vazamento de dados e houve um tempo de processamento de dados relativamente bom. Velocidades de

amostragem semelhantes foram utilizadas por Couto, Ruiz e Aguado (2012) e Ruiz et al. (2012).

3. Processamento de dados

3.1. Cálculos

3.1.1. Pressão horizontal na parede

A pressão normal ($p_{h(1,12)}$) em cada anel foi obtida pela somatória das forças em cada célula de carga de tração ($F_{h(1,12)u}$ e $F_{h(1,12)d}$), pela altura do anel ($h_r = 0.495$ m) e o valor da constante dos anéis ($C_{r(1,12)}$) (Eq. 1).

$$p_{h(1,12)} = \frac{F_{h(1,12)u} + F_{h(1,12)d}}{h_r \cdot C_{r(1,12)}} \quad (1)$$

As constantes ($C_{r(1,2)}$) para as pressões horizontais foram obtidas experimentalmente por meio da calibração do silo piloto. No presente trabalho foram utilizados os valores experimentais das constantes de calibração para os anéis 1 e 2 (Tabela 1).

Tabela 1 - Valores das constantes obtidas em cada anel do silo piloto.

Constante por anel	Valores das constantes obtidos experimentalmente
C_{r1}	0,275
C_{r2}	0,288

3.1.2. Pressão de atrito na parede

A pressão de atrito na parede do silo ($p_{w(1,12)}$) foi medida indiretamente pelos pares de células de carga de tração localizadas no suporte vertical (posicionado a 180° de distância) de cada anel ($F_{w(1,12)r}$ and $F_{w(1,12)l}$), Eq. (2).

$$p_{w(1,12)} = \frac{F_{w(1,12)r} + F_{w(1,12)l}}{h_r \cdot d_i \cdot \pi} \quad (2)$$

3.1.3. *Peso do produto armazenado*

O peso do produto armazenado (W) é obtido a partir da soma das forças obtidas das células de carga da viga posicionadas na base dos pilares direito (F_{vbr}) e esquerdo (F_{vbl}), utilizando a Eq. (3).

$$W_{(1,12)} = F_{vbr} + F_{vbl} \quad (3)$$

3.1.4. *Definição dos coeficientes de sobrepressão*

Os coeficientes de sobrepressão foram determinados experimentalmente, pela relação expressa pela Eq. (4).

$$C_d = \frac{P_{h(1,12)d}}{P_{h(1,12)f}} \quad (4)$$

3.2. *Propriedades do produto armazenado*

O produto utilizado para a realização dos testes no silo piloto foi o milho (*Zea mays*) com pureza aproximada de 97%. As propriedades físicas, mecânicas e de fluxo do milho foram obtidas na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) com a utilização de um dispositivo de cisalhamento modelo (TSG 70/140) baseado no aparelho de cisalhamento de Jenike. Para a execução do teste, foram utilizadas as recomendações da norma britânica (British Materials Handling Board, 1985; Jenike, 1964), incluindo o Operation Manual for the TSG 70-140, que está em conformidade com a Eurocode 1, part 4 (CEN, 2006). e ANSI/ASAE S433.1 (ANSI, 2019). Os valores obtidos foram (limites inferior e superior):

- peso específico (kN m^{-3}): 7,52–7,97;
- ângulo de atrito da parede: $8,12^\circ - 11,78^\circ$;
- coeficiente de atrito da parede: 0,14–0,21;
- ângulo de atrito interno: $24^\circ - 40^\circ$;
- ângulo efetivo de atrito interno: $34^\circ - 42^\circ$;
- umidade (b.u.): 10,78%.

3.3. Configuração dos testes

Utilizando o material granular descrito acima e preenchimento concêntrico, foram realizados um total de 5 ciclos completos de carregamento e descarregamento. A altura de enchimento do produto utilizada foi aproximadamente 0,75 m (relação H/D igual a 1) (Fig. 6), considerando configuração de fundo plano com descarga concêntrica. Embora a relação altura/diâmetro não fosse exatamente 1, esse termo tem sido usado para facilitar a escrita. A altura de interesse foi verificada pela célula de carga de tração que mostrou a medição para o anel acima da altura de interesse, conforme metodologia adotada por Gandia, Gomes, de Paula, Oliveira Junior e Rodriguez (2021).

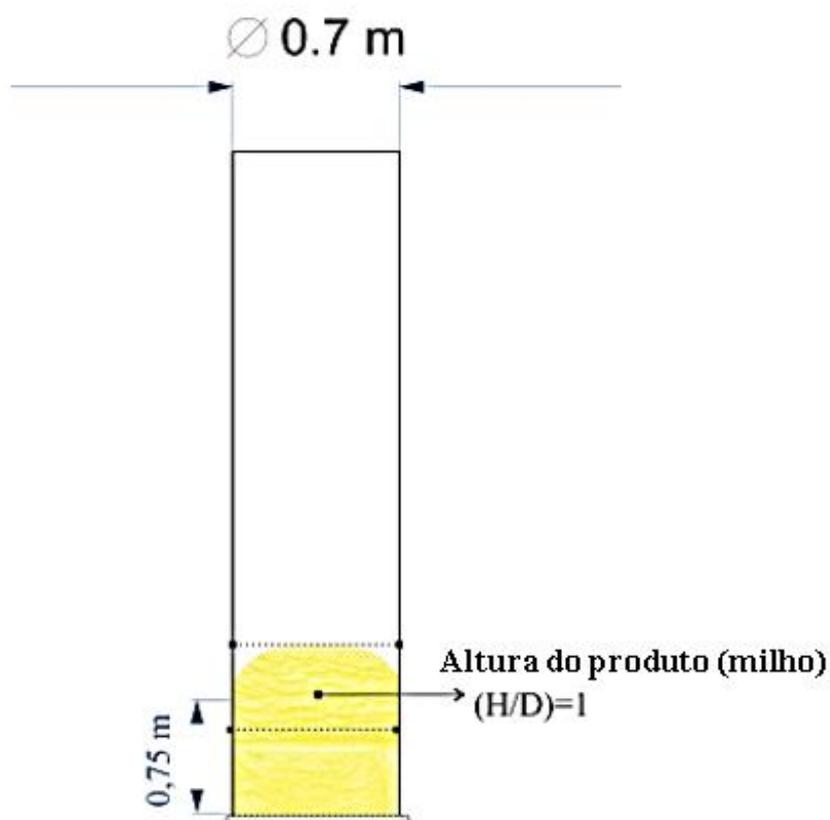


Figura 6 – Configuração do silo com relação $(H/D) = 1$.

As pressões foram analisadas durante as fases de carregamento e descarregamento. O milho foi transferido para o silo piloto por meio de um elevador de canecas que proporcionou vazão constante e carregamento centralizado até que a massa de grãos atingisse uma altura de aproximadamente 0,75 m. Após o carregamento, o milho

permaneceu em repouso por 10 min (condição estática) para estabilizar o sistema e acomodar o produto armazenado, seguido da descarga do produto com o orifício de descarga 100% aberto (Fig. 7).

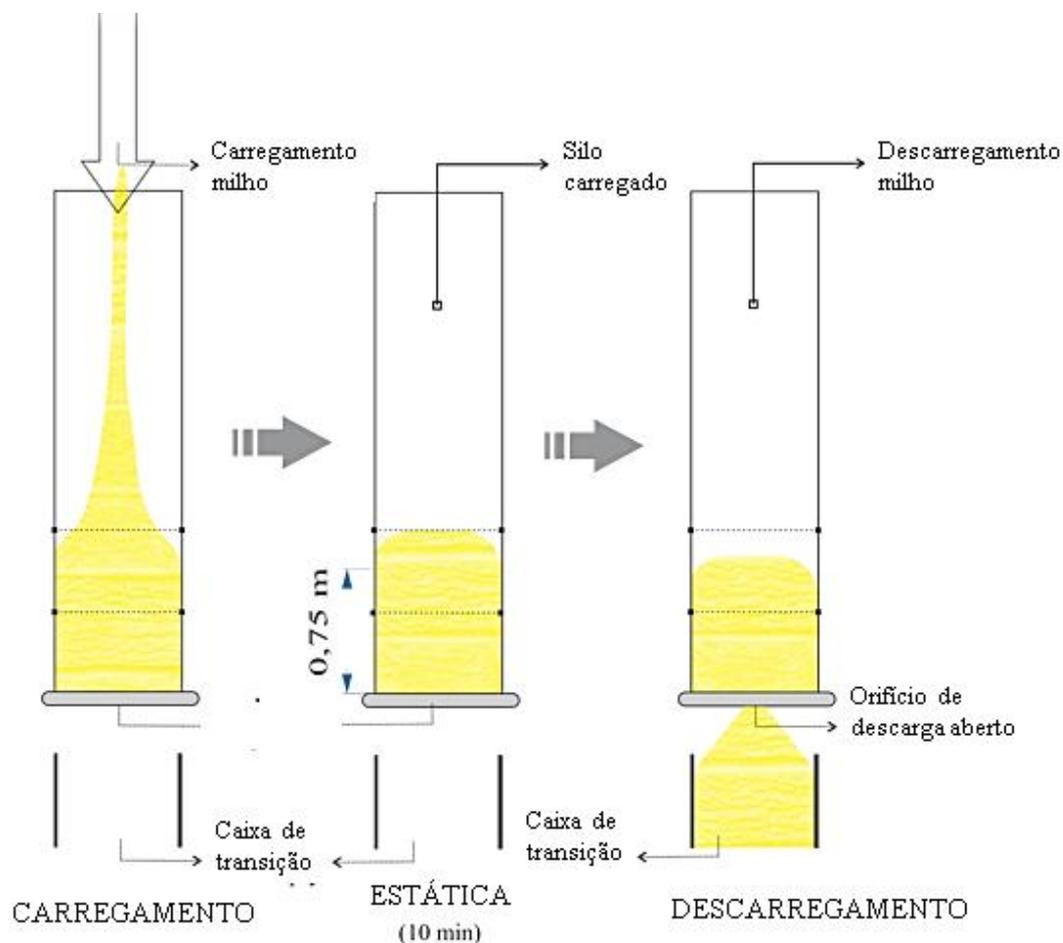


Figura 7 – Descrição dos ensaios.

Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com o Eurocódigo 1, parte 4 (CEN, 2006), ANSI/ASAE S433.1 (ANSI, 2019) e o modelo de Rankine-Calil (Freitas & Calil Júnior, 2005). As pressões teóricas foram determinadas conforme as prescrições das normas e modelo mencionados, contudo, utilizando os valores das propriedades determinados experimentalmente. As curvas das pressões teóricas são apresentadas juntamente com as experimentais, numa análise comparativa entre elas.

4. Resultados e discussão

Para avaliar a uniformidade das repetições dos testes, são apresentados na Tabela 2, os valores médios do peso do produto durante o carregamento e descarregamento e seus respectivos desvios padrões.

Tabela 2 – Peso do produto.

H/D 1 –	Valor médio (kN)		Desvio Padrão (%)	
	Carregamento	Descarregamento	Carregamento	Descarregamento.
Fundo Plano	2.814	2.816	0.086	0.192

A partir dessas informações, é possível verificar que as repetições entre cada configuração apresentaram baixa variabilidade (estatisticamente iguais), evidenciando a precisão dos testes realizados.

4.1. Pressões horizontais na parede do silo

As pressões máximas durante o carregamento e descarregamento obtidas para o milho, com seus respectivos desvios padrões, são apresentadas nas Figuras 8 e 9, respectivamente. Observa-se que as pressões horizontais experimentais tanto na fase de carregamento (Fig. 8) quanto descarregamento (Fig. 9) apresentam uma tendência linear ao longo da altura do silo.

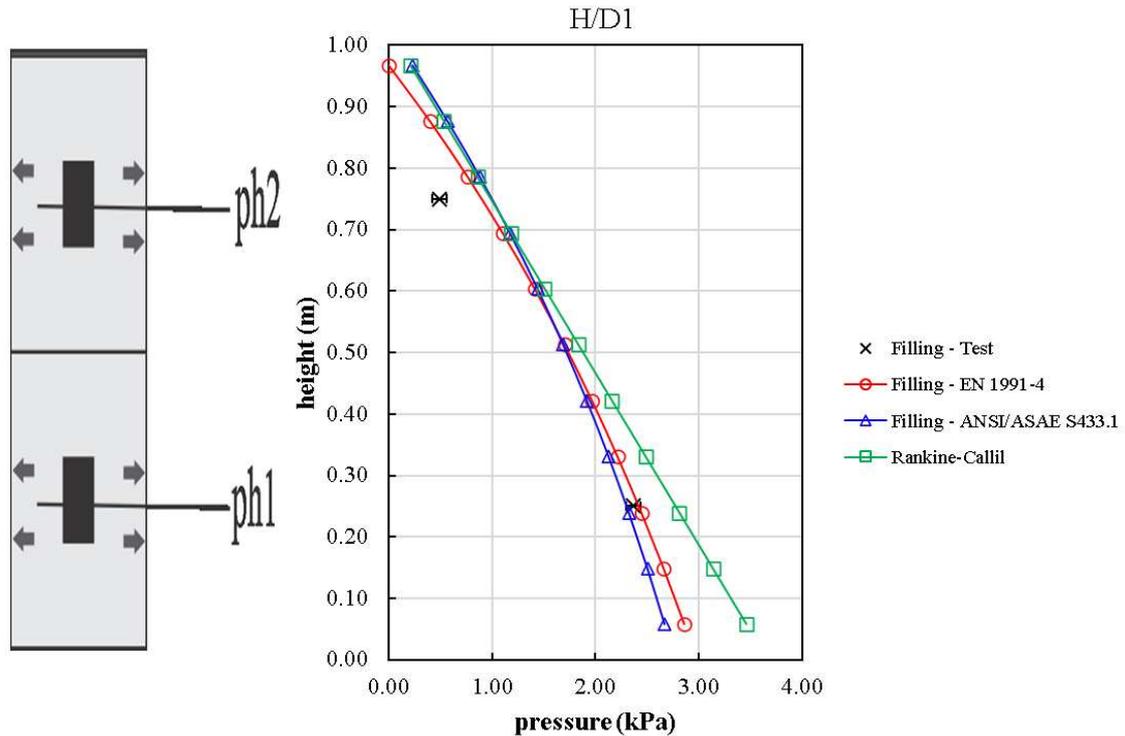


Figura 8 - Pressões horizontais teóricas e experimentais de carregamento para o silo com relação H/D igual a 1 (produto: milho).

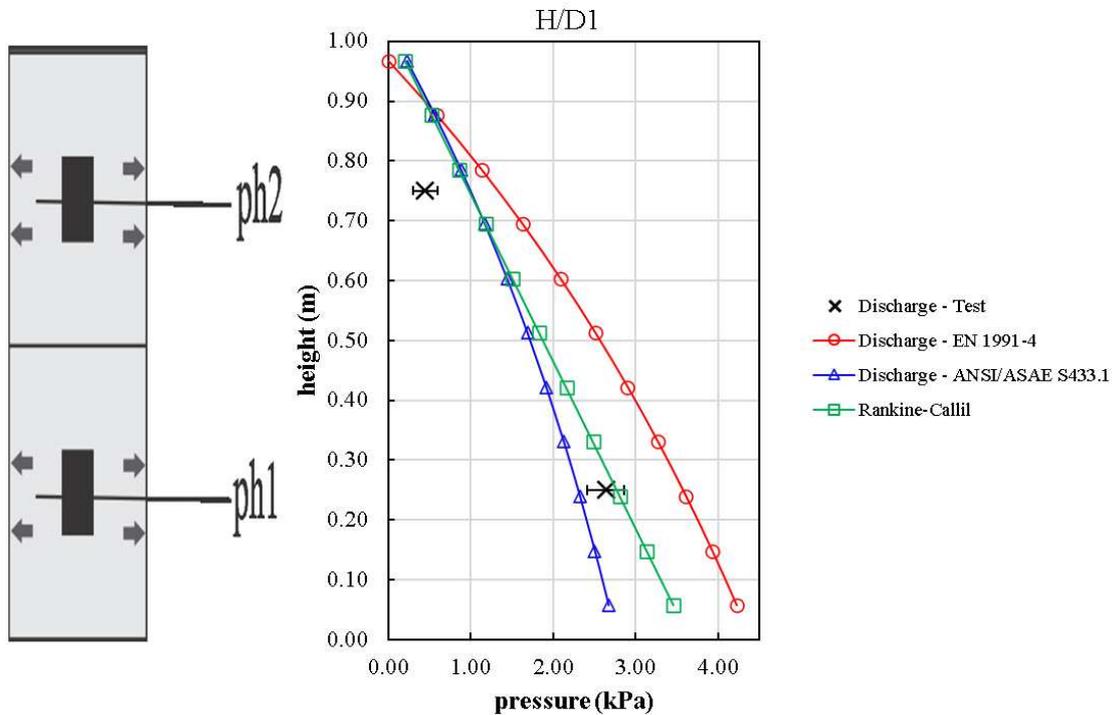


Figura 9 - Pressões horizontais teóricas e experimentais de descarregamento para o silo com relação H/D igual a 1 (produto: milho).

Comparando as Figuras 8 e 9, os dados evidenciam que configurações de silos de baixa relação altura/diâmetro descarregados centralmente não estão sujeitos a grande redistribuição de pressões durante o descarregamento. O segundo anel (P_{h2}), com menor volume de produto armazenado e ausência de canal de escoamento, não sofreu sobrepressão, em contrapartida, o primeiro anel (p_{h1}), apresentou um acréscimo de 11% na pressão durante o descarregamento ($C_d = 1.11$). Valor próximo ao coeficiente de sobrepressão (1.15) recomendado por Freitas e Calil Júnior (2005) para as pressões horizontais na parede na condição de descarregamento, considerando a configuração de silo com baixa relação altura/diâmetro e fundo plano.

Em relação ao modelo e normas avaliadas, observa-se que para a fase de carregamento (Fig. 8) o modelo de Rankine-Calil foi capaz de prever as pressões normais nas paredes do silo com margem de segurança (15.7% superiores aos valores experimentais obtidos na parte inferior do silo – p_{h1}). Verifica-se também que os valores das pressões horizontais experimentais de carregamento (Fig. 8) registradas na parte superior do silo (p_{h2} - anel 2) foram inferiores aos calculados pelas normas EN 1991-4:2006 e ANSI/ASAE S433.1, contudo, na parte inferior do silo (p_{h1} - anel 1) os valores coincidem com o previsto por ambas as normas (considerando o desvio padrão de 0.7 obtido). O valor médio experimental na parte inferior do silo é superior (2,15%) ao obtido pela norma ANSI/ASAE S433.1 e inferior (3%) quando comparado com EN 1991-4:2006. Considerando que as propriedades dos grãos agrícolas variam no tempo e no espaço dentro do silo, esse percentual pode ser considerado normal, uma vez que está dentro do desvio padrão, corroborando com o encontrado por Nascimento et al. (2013).

Durante a descarga (Fig. 9) observa-se que os valores das pressões horizontais experimentais não ultrapassaram os valores calculados pela norma EN 1991-4:2006, sendo superestimados na parte inferior do silo (p_{h1} - anel 1) em 27%, demonstrando segurança na previsão desses esforços. Em contrapartida, a norma ANSI/ASAE S433.1 subestimou o valor máximo experimental (2,64 kPa) em 14%, no descarregamento (Fig. 9), salientando-se que em sua formulação não há recomendação de uso do coeficiente de sobrepressão. Para fluxo do tipo funil, a ANSI/ASAE S433.1 não emprega coeficientes de sobrecarga das pressões durante a situação de descarregamento, fazendo-o apenas para o fluxo do tipo misto (*plug-flow*), sendo que a ANSI/ASAE S433.1 preconiza que este tipo de fluxo ocorre predominantemente em silos cuja relação altura diâmetro, $H/D \geq 2,0$. Como o silo em análise possui relação H/D igual a 1, portanto, o fluxo é do tipo funil, não sendo abordado aqui o fluxo misto (*plug-flow*).

Outro aspecto importante que afastam os valores obtidos com a norma ANSI/ASAE S433.1 dos valores experimentais é o coeficiente de atrito interno. As pressões de um produto no silo são dependentes do coeficiente de atrito entre o produto e a parede do silo (Moya, Sánchez, Villar-García, 2022; Wójcik et al., 2017). A referida norma recomenda o emprego do valor médio desse parâmetro para o cálculo teórico das pressões, destacando-se que os valores das propriedades físicas e de fluxo disponibilizadas pelo código normativo são referentes a grãos de trigo, sendo estes utilizados como referência para qualquer produto com fluxo livre. Dado a variabilidade dos coeficientes de atrito durante o processo de carregamento e descarga (Mansour et al., 2022), atribuir um valor médio para o coeficiente de atrito impossibilita a obtenção dos máximos valores de pressões horizontais. Diferentes coeficientes de atrito podem levar a sobrepressões consideravelmente diferentes (Mansour et al., 2022).

Estudos sobre a variabilidade do coeficiente de atrito para grãos de trigo foram realizados, sendo constatado que a mudança dos coeficientes de atrito de 0,333 para 0,218 provocou um acréscimo de 19 % nas pressões horizontais (Bucklin, Thompson, Ross, Biggs, 1989). Para que uma estrutura seja segura e econômica, é importante que as cargas não sejam subestimadas nem superestimadas. A diferença percentual acima obtida entre o valor teórico (ANSI/ASAE S433.1) e experimental configura-se como uma das razões do elevado número de acidentes com silos de baixa relação altura/diâmetro que ocorrem no Brasil.

A distribuição local dos componentes dinâmicos de sobrepressão ao longo da altura do silo deve ser melhor avaliada, permitindo uma fórmula de projeto mais robusta, uma vez que a maioria dos estudos analíticos assume distribuição uniforme de sobrepressões e a maioria dos códigos normativos não abordam este problema (Mansour et al., 2022).

Apesar de existirem estudos na área de silos que estudam vários fenômenos que afetam as pressões (Gandia et al., 2022; Goodey et al., 2017; Marchelli & Di Felice, 2021; Nascimento et al. 2013; Sadowski et al., 2020; Vidal et al., 2005), poucos dão ênfase à variabilidade encontradas nas propriedades físicas e de fluxo e à sua magnitude (Couto et al., 2012; Gao, Cheng & Du, 2018; Mansour et al., 2022; Moya et al., 2022; Oliveira et al., 2022).

Em termos de projeto, deverão ser determinados dois limites para cada parâmetro do produto a ser armazenado, de modo a delimitar a sua faixa de variação e, com isso, obtém-se as combinações mais desfavoráveis para cada caso. Esses limites são o menor

valor possível (limite inferior) e o maior valor possível (limite superior) para o parâmetro considerando durante a vida útil do silo.

As pressões são fortemente afetadas pelas propriedades dos produtos, alterando a forma das curvas das pressões laterais, conforme pode ser constatado nas curvas obtidas durante o descarregamento para as normas EN 1991-4:2006 e ANSI/ASAE S433.1 (Fig. 9). Observa-se (Fig. 9) que na profundidade máxima do silo (p_{hl} - anel 1) as maiores pressões são apresentadas pela EN 1991-4:2006 (obtida com a combinação mais desfavorável das propriedades físicas do milho), sendo 55% superior aos valores da ANSI/ASAE S433.1 e 28% superior ao modelo de Rankine-Calil. Observa-se também que a pressão obtida com o modelo de Rankine-Calil é 21% superior que a pressão obtida pela ANSI/ASAE S433.1 (Fig. 9). Dessa forma, constata-se que a determinação das propriedades torna-se essencial para previsão das pressões.

Observa-se pela Figura 9 que o modelo de Rankine-Calil apresentou-se adequado comparativamente aos valores obtidos experimentalmente, mostrando-se ajustado aos valores experimentais. A diferença percentual entre os valores obtidos experimentalmente e o modelo de Rankine-Calil na altura de 0.25 m (p_{hl} - anel 1) foi de apenas 6%.

Sendo assim, pode-se dizer que a norma EN 1991-4:2006 pode ser adotada para a configuração de silo analisada, contudo, seria um modelo um tanto conservativo em relação às pressões horizontais correspondentes ao último terço da altura do silo. O modelo de Rankine-Calil apresentou uma boa correlação com os dados experimentais, cobrindo os valores obtidos, sendo o que mais aproximou-se das pressões obtidas experimentalmente, ao passo que, a norma ANSI/ASAE S433.1 não mostrou-se adequada para previsão das pressões horizontais na parede do silo, na região correspondente, aproximadamente, a metade da altura do silo (p_{hl} - anel 1).

4.2. Pressões de atrito na parede do silo

As pressões de atrito (p_w) ao longo das paredes durante o carregamento (Fig. 10) e descarregamento concêntrico (Fig. 11) foram calculadas de acordo com a EN 1991-4:2006 e ANSI/ASAE S433.1 e comparadas com os valores obtidos experimentalmente.

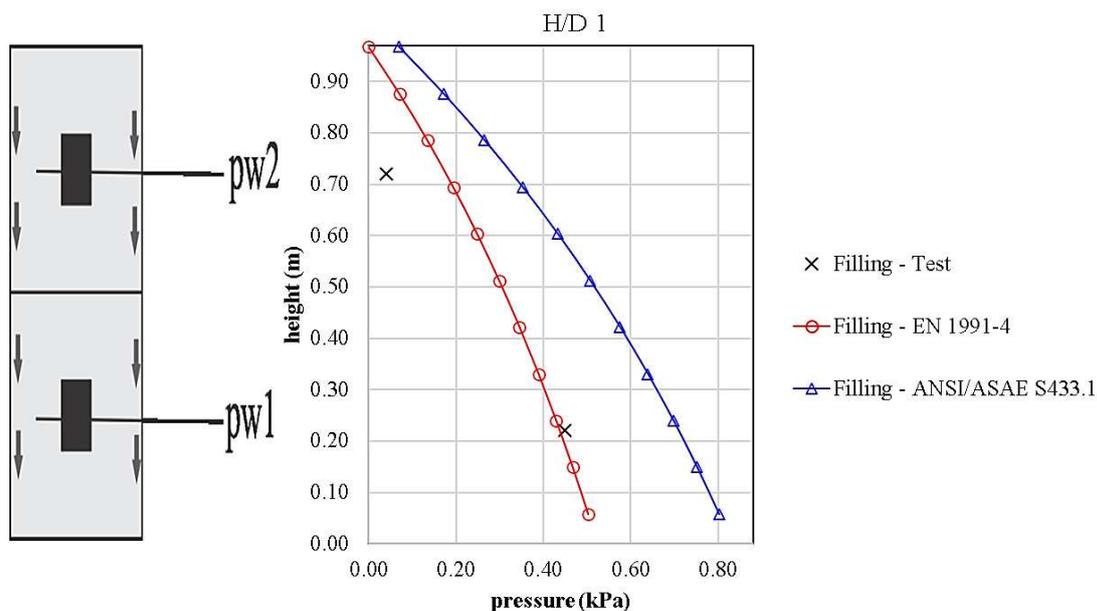


Figura 10 - Pressões de atrito teóricas e experimentais durante o carregamento para silo com relação H/D igual a 1 (produto: milho).

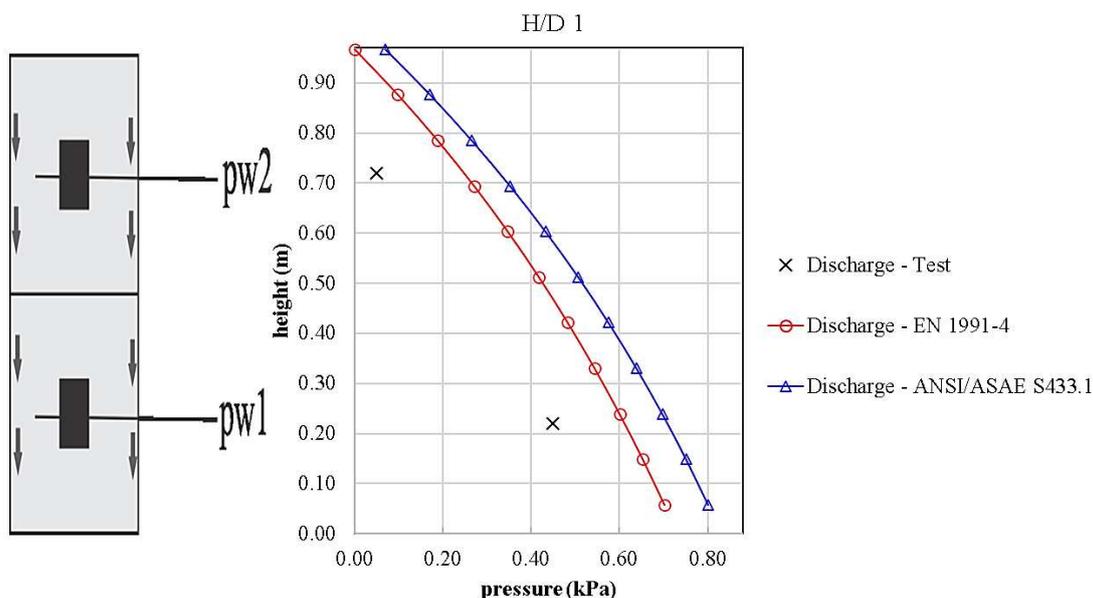


Figura 11 - Pressões de atrito teóricas e experimentais durante o descarregamento para o silo com relação H/D igual a 1 (produto: milho).

Na Figura 10 nota-se que os valores preditos pela EN 1991-4:2006 cobrem os experimentais para a parte superior do silo (p_{w2} - anel 2), contudo, sua predição passa a ser insatisfatória quando comparada com a maior profundidade do silo (p_{w1} - anel 1). Silos de baixa relação altura/diâmetro normalmente são fabricados sem montantes pelas

empresas nacionais, porém, nestes casos, as chapas laterais deverão suportar as cargas de atrito do grão, calculando-se para que não ocorra flambagem. Como já mencionado, o Brasil ainda não possui uma norma específica para armazenamento de silos, e várias falhas que têm ocorrido são relacionadas à flambagem devido à força vertical de atrito exercida na parede do silo (Dornelas et al., 2021; Gandia, Gomes, de Paula, Rodriguez 2021), predominantemente na fase estática, com identificação de patologias de atrito em paredes. Deste modo, é recomendável analisar, com mais critério, o emprego de montantes em silos baixos ($H/D \leq 1,5$) para absorção das cargas verticais devido ao atrito dos grãos com as paredes, a fim de evitar problemas estruturais, como medida preventiva de acidentes.

Em contrapartida, a ANSI/ASAE S433.1 resultou em valores superestimados, sobremaneira para a maior profundidade do silo (p_{w1} - anel 1), sendo 55% superior ao experimental nessa faixa (Fig. 10). Para a maior profundidade do silo, os valores recomendados pela ANSI/ASAE S433.1 foram 63% superiores em relação aos valores preconizados pela EN 1991-4:2006. O código normativo americano resultou em valores consideravelmente superiores aos demais por adotar em suas formulações de determinação das pressões de atrito, o coeficiente de atrito grão-parede determinado por Moore, White e Ross (1984), para grãos de trigo. É importante destacar que essa majoração de esforços conduz a dimensionamentos antieconômicos das paredes.

A norma europeia recomenda que o cálculo do coeficiente de atrito seja realizado em função do ângulo de atrito grão-parede do produto utilizado, considerando as combinações com as propriedades físicas para obter os carregamentos máximos, conduzindo, portanto, às divergências observadas.

Na fase descarregamento (Fig. 11) ocorreu incremento de 40% na força de atrito calculada pela norma europeia e conforme já discutido, a norma americana não aplica coeficiente de sobrepressão para o tipo de fluxo desta análise. Pode-se observar (Fig. 11) que todas as normas superestimaram consideravelmente os valores experimentais na maior profundidade do silo (p_{w1} - anel 1) com uma majoração de 55% para ANSI/ASAE S433.1, 33% para EN 1991-4:2006 e 16% entre as referidas normas, indicando uma ampla margem de segurança para projetos de silos baixos.

Para relação estudada no presente trabalho ($H/D = 1$) não houve incremento na pressão de atrito, observando-se a manutenção da magnitude (0,45 kPa) tanto no carregamento, quanto no descarregamento. Comportamento característico de silos com

fluxo de funil, pela existência de zonas estagnadas que geram menor desgaste das paredes, uma vez que o atrito ocorre entre grãos.

5. Conclusões

O silo piloto pode ser usado para analisar várias condições de contorno e fornecer dados amplos para uma análise de pressões em silos em escala real. Essas condições de contorno facilitarão uma maior compreensão dos estudos numéricos, que permanecem necessários, pois existem poucas estações experimentais no mundo e poucos trabalhos com silos baixos ($H/D \leq 1,5$).

Durante os testes com grãos de milho foram observados os seguintes resultados:

- No que diz respeito às pressões máximas normais na parede do silo durante o carregamento o modelo de Rankine-Calil foi capaz de prever as pressões normais nas paredes do silo com margem de segurança. Os valores experimentais foram inferiores aos calculados pelas normas EN 1991-4:2006 e ANSI/ASAE S433.1;

- Em relação a fase de descarregamento, os valores das pressões horizontais experimentais não ultrapassaram os valores calculados pela norma EN 1991-4:2006, sendo superestimados na parte inferior do silo (p_{h1} - anel 1) em 27%. A norma ANSI/ASAE S433.1 subestima em 14% as pressões horizontais na base do silo de fundo plano com relação H/D igual a 1. O modelo de Rankine-Calil apresentou-se bastante ajustado aos valores experimentais;

- Tendo em vista os resultados obtidos experimentalmente, recomenda-se o coeficiente de sobrepressão de 1,15 para as pressões horizontais na parede na condição de descarregamento;

- Para as forças de atrito nas paredes, a norma EN 1991-4:2006 não mostrou-se adequada ao prever os valores de carregamento nas profundidades de 0,25 m (p_{h1} - anel1). Em contrapartida, a ANSI/ASAE S433.1 resultou em valores superestimados, sendo 55% superior ao experimental;

- Em comparação à pressão de atrito no descarregamento, todas as normas superestimaram consideravelmente os valores experimentais na maior profundidade do silo (p_{h1} - anel 1) com uma majoração de 55% para ANSI/ASAE S433.1 e 33% para EN 1991-4:2006;

- Para relação estudada no presente trabalho ($H/D = 1$) não houve incremento na pressão de atrito, observando-se a manutenção da magnitude (0,45 kPa) tanto no carregamento, quanto no descarregamento.

Declaração de conflito de interesses

Os autores declaram que não há conflitos de interesses de qualquer ordem.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento da bolsa associada a este projeto. Agradecem também a parceria com a Universidade Federal de Lavras, em especial ao Dr. Francisco Carlos Gomes e Dr. Romulo Marçal Gandia pelo apoio durante o experimento.

Referências

- Airy, W. (1897). *The Pressure of Grain*. Minutes of Proceedings, Institute of CivilEngineers, London, V 131, pp. 458-465.
- Alonso-Miravalles, L., Zannini, E., Bez, J., Arendt, E. K., & O'Mahony, J. Á. (2020). Physical and flow properties of pseudocereal-based protein-rich ingredient powders. *Journal of Food Engineering*, 281:109973. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109973>
- Ambrose, R. K., Jan, S., & Siliveru, K. (2016). A review on flow characterization methods for cereal grain-based powders. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(2), 359-364. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7305>
- ANSI. (2019) - ANSI/ASAE: S433.1. *Loads Exerted by Free-Flowing Grain on Bins*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. St Joseph: [s.n.].
- AUSTRALIAN STANDARD. (1997). *AS 3774: Loads on bulk containers*. Supplement 1. Sydney: [s.n.].

- Ayres, G. D. J., Nascimento, J. W. B., & Mascarenhas, N. M. H. (2020). Rompimento de arcos coesivos em silos verticais com emprego de pneumáticos: Uma revisão bibliográfica. *Revista de Ciências Agrárias*, 43(4), 390-395. <https://doi.org/10.19084/rca.18390>
- Baroni, G. D., Benedeti, P. H., & Seidel, D. J. (2017). Cenários prospectivos da produção e armazenagem de grãos no Brasil. *Revista Thema*, 14(4), 55–64. <https://doi.org/10.15536/thema.14.2017.55-64.452>
- British Materials Handling Board – BMHB. (1985). Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers Ascot: BMHB.
- Bucklin, R. A., Thompson, S. A., Ross, I. J., & Biggs, R. H. (1989). Apparent Coefficient of Friction of Wheat on Bin Wall Material. *Transactions of the ASAE*, 32(5), 1769–1773. <https://doi.org/10.13031/2013.31221>
- Carauta, M., Parussis, J., Hampf, A., Libera, A., & Berger, T. (2021). No more double cropping in Mato Grosso, Brazil? Evaluating the potential impact of climate change on the profitability of farm systems. *Agricultural Systems*, 190, 103104. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103104>
- CEN. (2006). *EN 1991-4:2006. Eurocode 1: Actions on Structures. Part 4: Silos and Tanks*, Brussels.
- Chen, J. F., Rotter, J. M., Ooi, J. Y., & Zhong, Z. (2007). Correlation between the flow pattern and wall pressures in a full scale experimental silo. *Engineering Structures*, 29(9), 2308-2320. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.11.011>
- CONAB, C. N. de A. (2022). Acompanhamento da safra brasileira 2021/2022. *In, Vol. 9. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2021/2022*. <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>
- Coulomb, C.A. (1773). Essai sur une application des règles de maximis & minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture. Mémoires de mathématique & de physique présentés à l'Académie Royale des Sciences par divers savans & lûs dans ses assemblées, 7, 343–382, Paris (printed in 1776).
- Couto, A., Ruiz, A., & Aguado, P. J. (2012). 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*, 85, 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.04.009>
- DIN. (2005). *DIN 1055-6: Basis of design and actions on structures – Part 6: design 623 loads for buildings and loads in silo bins*. Berlin, Verlaz.
- Diniz, M., & Nascimento, J. W. B. (2006). Análise de pressões em silo vertical de alvenaria de tijolos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10(1), 212-219. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000100031>
- Dornelas, K. C., Ayres, G. D. J., Rodrigues, H. C. S., Nascimento, R. T. do., Lopes Neto, J. P., & Nascimento, J. W. B. do. (2021). The throat of Brazilian Agricole production: The breakdown of vertical silos. *Research, Society and Development*, 10(8), e14510817253. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17253>
- FAO (2020). Food and Agriculture Organization of the United Nations *FAOSTAT Statistical Database*, Rome, Italy. <http://www.fao.org/faostat/en/>
- Freitas, E. G. A., & Calil Júnior, C. (2005) Estudo teórico e experimental das pressões em silos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, 7(24), 1 - 34.
- Fullard, L. A., Godfrey, A. J. R., Manaf, M. F., Davies, C., Cliff, A., & Fukuoka, M. (2020). Mixing experiments in 3D-printed silos; the role of wall friction and flow correcting inserts. *Advanced Powder Technology*, 31, 1915–1923. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.02.024>
- Gandia, R. M., de Paula, W.C., de Oliveira Junior, E. A., Rodrigo, G. H., Padín, Á. R., Vegas, A. T., Gomes, F. C., Rodríguez, P. J.A. (2022). Effect of the Hopper Angle of a Silo on the Vertical Stress at the Cylinder-to-Hopper Transition. *Agronomy*, 12(4):830. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040830>.
- Gandia, R. M., Gomes, F. C., de Paula, W. C., & Rodriguez, P. J. A. (2021). Evaluation of pressures in slender silos varying hopper angle and silo slenderness. *Powder Technology*, 394, 478-495. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.087>
- Gandia, R. M., Gomes, F. C., de Paula, W. C., Oliveira Junior, E. A., & Rodriguez, P. J. Q. (2021). Static and dynamic pressure measurements of maize grain in silos under different conditions. *Biosystems Engineering*, 209, 180-199. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.07.001>

- Gao, M., Cheng, X., & Du, X. (2018). Simulation of bulk density distribution of wheat in silos by finite element analysis, *Journal of Stored Products Research*, 77, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2018.02.003>
- Goodey, R. J., Brown, C. J., & Rotter, J. M. (2017). Rectangular steel silos: Finite element predictions of filling wall pressures. *Engineering Structures*, 132, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.023>
- Hammadeh, H., Askifi, F., Ubysz, A., Maj, M., & Zeno, A. (2019). Effect of using insert on the flow pressure in cylindrical silo. *Studia Geotechnica et Mechanica* 41: 177-183. DOI: <https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0022>
- Han, Y., Jia, F., Li, G., Liu, H., Li, J., & Chen, P. (2019). Numerical analysis of flow pattern transition in a conical silo with ellipsoid particles. *Advanced Powder Technology*, 30(9). 1870-1881. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.06.004>
- ISO. (2012). *ISO 11697:2012: Bases for design of structures - Loads due to bulk materials*. International Organization For Standardization. [s.l: s.n.].
- Janssen, H. A. (1895). Versuche uber getreidedruck in silozellen. *VDI-Z (Verein Deutscher Ingenieure-Z)*, 39(35),1045-1049.
- Jenike, A. W. (1964). *Storage and flow of solids*. Bulletin of the University of Utah, 53(123), 209. [University of Utah].
- Jenike, A. W., Johanson, J. R., & Carson, J. W. (1973). Bin loads. *Trans. ASME J. Eng. Ind.*, 95, 1-16.
- Khalil, M., Ruggieri, S., & Uva, G. (2022). Assessment of Structural Behavior, Vulnerability, and Risk of Industrial Silos: State-of-the-Art and Recent Research Trends. *Applied Sciences*, 12(6), 3006. <https://doi.org/10.3390/app12063006>
- Koenen, M. (1896). Berechnung des Seiten und Bodendrucks in Silozellen. *Centralblatt der Bauverwaltung*, 16, 446-449.
- Livaoglu, R. R., & Durmus, A. (2016). A simplified approximation for seismic analysis of silo–bulk material system. *Bull Earthquake Eng*, 14, 863–887. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9851-x>
- Lopes Neto, J. P., Nascimento, J. W. B., Silva, R. C., & Costa, C. A. (2013). Powder flow criteria for design of vertical silo walls. *Engenharia Agricola*, 33(3), 453-462. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162013000300003>

- Mansour, S., Pieraccini, L., Palermo, M., Foti, D., Gasparini, G., Trombetti, T., & Silvestri, S. (2022). Comprehensive Review on the Dynamic and Seismic Behavior of Flat-Bottom Cylindrical Silos Filled With Granular Material. *Frontiers in Built Environment*, 7, 2297-3362. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.805014>
- Marchelli, F., & Di Felice, R. A. (2021). Discrete Element Method Study of Solids Stress in Cylindrical Columns Using MFiX. *Processes*, 9(1), 60. <https://doi.org/10.3390/pr9010060>
- Matchett, A. J. (2020). Exponential stress in silos — An example from literature. *Chemical Engineering Research and Design*, 161, 125-129. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.06.030>
- Moya, M., Sánchez, D., & Villar-García, J.R. (2022). Values for the Mechanical Properties of Wheat, Maize and Wood Pellets for Use in Silo Load Calculations Involving Numerical Methods. *Agronomy*, 12, 1261. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061261>
- Nascimento, J. W. B., Lopes Neto, J. P., & Montross, M. D. (2013). Horizontal pressures in cylindrical metal silos and comparison with different international standards. *Engenharia Agrícola*, 33(4), 601-611. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000400002>
- Oginni, O., & Fasina, O. (2018). Theoretical estimation of silo design parameters for fractionated loblolly pine grinds – Moisture content and particle size effects. *Industrial Crops and Products*, 123, 379-385. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.005>
- Olivares, M. C. V., Benito, J. G., Uñac, R. O., Vidales, & A. M. (2018), Towards a one parameter equation for a silo discharging model with inclined outlets. *Powder Technology*, 336, 265272. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.010>
- Oliveira, G. H. H. de, Corrêa, P. C., Oliveira, A. P. L. R., Vargas-Elías, G. A., & Calil Júnior, C. (2022). Arabica coffee flow properties assessed using different roasts and particle sizes during storage. *Brazilian Journal of Food Technology*, 25, e2021026. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.02621>
- Pieper, K., & Schütz, M. (1980). Bericht Über das Forschungsvorhaben - Norm-Mess Silo für Schüttguteigenschaften. [s.l.] Technische Universität Braunschweig.

- Purushotham, V., Rao, B. D. V. C. M., & Rao, P. S. (2022). Parametric study of silo analysis. *Materials Today: Proceedings*, 51(8), 2450-2456. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.614>
- Rankine, W. J. M. (1857). II. On the stability of loose earth. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, (147), 9-27.
- Reimbert, M., & Reimbert-Auclair, A. M. (1982). *Silos, théorie et pratique*. Eyrolles.
- Roberts, I. (1884). Determination of vertical and lateral pressures of granular substances. *Proc. R. Soc. Lond.*, 36, 225-240.
- Roberts, I. (1882). On the pressure of wheat stored in elongated cells or bins *Engineering*, 34, 399.
- Rotundo, J. L., Rech, R., Cardoso, M. M., Fang, Y., Tang, T., Olson, N., Pyrik, B., Conrad, G., Borrás, L., Mihura, E., & Messina, C. D. (2022). Development of a decision-making application for optimum soybean and maize fertilization strategies in Mato Grosso. *Computers and Electronics in Agriculture*, 193, 106659, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106659>
- Sadowski, A. J., Rotter, J. M., & Nielsen, J. (2020). A theory for pressures in cylindrical silos under concentric mixed flow. *Chemical Engineering Science*, 223, 115748. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115748>
- Safarian, S. S., & Harris, E. C. (1985). *Design and construction of silos and bunkers*. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc. 468p.
- Saleh, K., Golshan, S., & Zarghami, R. (2018). A review on gravity flow of free-flowing granular solids in silos – Basics and practical aspects. *Chemical Engineering Science*, 192, 1011-1035. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.08.028>
- Silvestri, S., Mansour, S., Marra, M., Distl, J., Furinghetti, M., Lanese, I., Hernández-Montes, E., Neri, C., Palermo, M., Pavese, A., Parisi, E. R., Sadowski, A. J., Selva, F., Taniguchi, T., Vadrucci, L., & Weber, F. (2022). Shaking table tests of a full-scale flat bottom manufactured steel silo filled with wheat: Main results on the fixed-base configuration. *Earthquake Engng Struct Dyn*, 51, 169–190. <https://doi.org/10.1002/eqe.356>
- Stasiak, M., Molenda, M., Bańda, M., Horabik, J., Wiącek, J., Parafiniuk, P., Wajs, J., Gancarz, M., Gondek, E., Lisowski, A., & Oniszczyk, T. (2020). Friction and Shear

- Properties of Pine Biomass and Pellets. *Materials*. 13(16), 3567.
<https://doi.org/10.3390/ma13163567>
- Sun, W., Zhu, J., Zhang, X., Wang, C., Wang, L., & Feng, J. (2020). Multi-scale experimental study on filling and discharge of squat silos with aboveground conveying channels. *Journal of Stored Products Research*, 88, 101679.
<https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101679>
- Theimer, O. F. (1958). *On the Storage of Raw Cocoa Beans in Silo Compartments*. International Chocolate Review V Jahr, XIII.
- Vidal, P., Guaita, M., & Ayuga, F. (2005). Analysis of Dynamic Discharge Pressures in Cylindrical Slender Silos with a Flat Bottom or with a Hopper: Comparison with Eurocode 1. *Biosystems Engineering*, 91(3), 335-348.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.03.012>
- Walker, D. M. (1966). An approximate theory for pressures and arching in hoppers. *Chem. Eng. Sci.*, 21, 975-997.
- Walters, J. K. (1973). A theoretical analysis of stresses in silos with vertical walls. *Chem. Eng. Sci.*, 21, 13-21.
- Wiącek, J., Gallego, E., Parafiniuk, P., Kobyłka, R., Bańda, M., Horabik, J., & Molenda, M. (2021). Experimental analysis of wheat-wall friction and grain flow in a steel silo with corrugated walls. *Biosystems Engineering*, 209, 216-231.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.07.003>
- Wójcik, M., Sondej, M., Rejowski, K., & Tejchman, J. (2017). Full-scale experiments on wheat flow in steel silo composed of corrugated walls and columns. *Powder Technology*, 311, 537-555. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.066>
- Xue, J., Schiano, S., Zhong, W., Chen, L., & Wu, C. Y. (2019). Determination of the flow/no flow transition from a flat bottom hopper. *Powder Technology*, 358, 55-61.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.063>
- Zaccari, N., & Cudemo, M. (2016). Steel silo failure and reinforcement proposal, *Engineering Failure Analysis*, 63, 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.02.009>
- Moore, D. M., White, G. M., & Ross, I. J. (1842). Friction of wheat on corrugated metal surfaces. *Trans. ASAEM*, 27(6), 1842–1847.
-

CAPÍTULO III

**ANÁLISE DE PRESSÕES DE GRÃOS DE MILHO EM SILOS
CILÍNDRICOS METÁLICOS E COMPARAÇÃO COM
DIFERENTES NORMAS INTERNACIONAIS****PRESSURES MEASUREMENTS OF CORN GRAIN IN
CYLINDRICAL STEEL SILOS AND COMPARISON WITH
DIFFERENT INTERNATIONAL STANDARDS**

Artigo submetido na Revista Powder Technology (ISSN 0032-5910).

Nomenclatura

Símbolos

d_i - Diâmetro interno do silo piloto, m.

$F_{h(1,12)u}$ - Força na célula de carga de tração posicionada na parte superior do conjunto de molas - anéis 1 a 12, kN.

$F_{h(1,12)d}$ - Força na célula de carga de tração posicionada na parte inferior do conjunto de molas - anéis 1 a 12, kN.

$F_{w(1,12)r}$ - Força na célula de carga de tração posicionada no lado direito do suporte do anel - anéis 1 a 12, kN.

$F_{w(1,12)l}$ - Força na célula de carga de tração posicionada no lado esquerdo do suporte do anel - anéis 1 a 12, kN.

F_{vbr} - Força na célula de carga tipo viga posicionada na base do pilar direito, kN.

F_{vbl} - Força na célula de carga tipo viga posicionada na base do pilar esquerdo, kN.

h_r - Altura do anel, m.

$C_{r(1,12)}$ - Valor constante dos momentos, anéis 1 a 12, adimensional.

$p_{h(1,12)}$ - Pressão normal na parede do cilindro das células de carga posicionadas no conjunto de molas - anéis 1 a 12, kPa.

$p_{w(1,12)}$ - Pressão de atrito para a parede do cilindro a partir das células de carga de tensão posicionadas nos suportes dos anéis - anéis 1 a 12, kPa.

C_d - Coeficiente de sobrepressão, adimensional.

$p_{h(1,12)d}$ - Pressão normal dinâmica na parede do cilindro das células de carga posicionadas no conjunto de molas - anéis 1 a 12, kPa.

$p_{h(1,12)f}$ - Pressão normal estática na parede do cilindro das células de carga posicionadas no conjunto de molas - anéis 1 a 12, kPa.

W - Peso do produto armazenado, kN.

H/D - Relação altura/diâmetro, adimensional.

ANÁLISE DE PRESSÕES DE GRÃOS DE MILHO EM SILOS CILÍNDRICOS METÁLICOS E COMPARAÇÃO COM DIFERENTES NORMAS INTERNACIONAIS

RESUMO

Os silos cilíndricos de fundo plano são empregados mundialmente para armazenar produtos granulares de alto valor comercial. Entretanto, muitas lacunas ainda permanecem em relação a estimativa de pressões e falhas estruturais ainda ocorrem. Além disso, existem poucas estações experimentais em escala real no mundo para facilitar os avanços nessa linha de pesquisa. Portanto, neste trabalho, pressões foram avaliadas em um silo piloto cilíndrico metálico que permite adaptações na geometria. As pressões foram analisadas para duas relações de esbeltez (2 e 3, respectivamente) com fundo plano, utilizando milho, um produto de fluxo livre, como produto armazenado. As pressões foram analisadas durante as condições de carregamento e descarregamento. Os resultados experimentais foram comparados com os preconizados por meio das normas vigentes EN 1991-4 e ANSI/ASAE S433.1 e a teoria de Jenike et al. (1973). Os resultados obtidos mostram que as pressões dinâmicas para a relação H/D igual a 2 podem exceder as obtidas pelo método de cálculo proposto pela ANSI/ASAE S433.1, evidenciando que os coeficientes utilizados na norma não são suficientes para promover a segurança em projetos dessa configuração. Dentre as normas analisadas, a EN 1991-4:2006 ajustou-se melhor as pressões dinâmicas experimentais para a relação H/D igual a 3. Contudo, a teoria de Jenike et al. (1973) apresentou valores teóricos mais próximos aos experimentais em todas as profundidades analisadas. É claro que ainda são necessários mais estudos experimentais para entender os fenômenos físicos subjacentes e as relações entre as pressões, geometria do silo e padrão de fluxo do material armazenado.

Palavras-chave: Experimentos; Silo; Paredes lisas; Pressão da parede; Armazenamento de milho.

ABSTRACT

Flat bottom cylindrical silos are used worldwide to store granular products of high commercial value. However, many gaps still remain regarding the estimation of pressures and structural failures still occur. In addition, there are few full-scale experimental stations in the world to facilitate advances in this line of research. Therefore, in this work, pressures were evaluated in a metallic cylindrical pilot silo that allows adaptations in the geometry. Pressures were analyzed for two slenderness ratios (2 and 3, respectively) with a flat bottom, using corn, a free-flowing product, as the stored product. Pressures were analyzed during loading and unloading conditions. The experimental results were compared with those recommended by the current standards EN 1991-4 and ANSI/ASAE S433.1 and the theory of Jenike et al. (1973). The results obtained show that the dynamic pressures for the H/D ratio equal to 2 can exceed those obtained by the calculation method proposed by ANSI/ASAE S433.1, showing that the coefficients used in the standard are not sufficient to promote safety in projects of this configuration. Among the analyzed standards, EN 1991-4:2006 best adjusted the experimental dynamic pressures for the H/D ratio equal to 3. However, the theory of Jenike et al. (1973) presented theoretical values closer to the experimental ones at all analyzed depths. Of course, further experimental studies are still needed to understand the underlying physical phenomena and the relationships between pressures, silo geometry, and flow pattern of stored material.

Keywords

Experiments; Silo; Smooth walls; Wall pressure; Storage Corn.

1. Introdução

Os silos cilíndricos são amplamente utilizados para armazenamento de sólidos a granel [1-10]. São parte integrante de muitos setores industriais (químicos, minerais, farmacêuticos, alimentícios) e agrícolas [3,8,10-13]. Os silos cilíndricos de fundo plano são a configuração mais comum entre a maioria dos silos utilizados para armazenar volumes significativos de sólidos granulares na indústria e na agricultura [10,12,14,15].

Entretanto, o projeto estrutural de silos cilíndricos de fundo plano para armazenamento de grãos representa um problema desafiador [16,17]. Apesar dos estudos sobre silos existirem há praticamente dois séculos [5,16,18], muitas incertezas ainda permanecem e falhas estruturais ainda ocorrem [3,9,10,18-22]. As falhas apontam para as dificuldades em contabilizar corretamente as solicitações estruturais dos silos e as propriedades físicas e de fluxo dos materiais granulares [18].

A previsão das pressões estáticas e dinâmicas em silos depende das propriedades físicas e de fluxo do produto armazenado, da relação altura/diâmetro (H/D) e tipos de descarregamento (concêntrico ou excêntrico), sendo divergente entre os códigos normativos [23-27].

A determinação da magnitude e distribuição das pressões durante a descarga é particularmente desafiadora, pois a pressão tende a exibir flutuações significativas e suas distribuições ao longo das paredes do silo dependem intimamente do padrão de fluxo desenvolvido ao longo do silo [6,28-31], exigindo predições mais conservadoras para silos esbeltos, sendo encontrados coeficientes de sobrepressão na faixa de 1,1 a 3,9 [10,32,33].

Existem dois padrões de fluxo principais, fluxo de massa (fluxo uniforme) e fluxo de funil (fluxo com formação de zonas estagnadas). Além destes, há um terceiro tipo de fluxo, caracterizado por um regime de transição entre os outros dois, ou seja, uma combinação de fluxo de funil para partículas próximas ao orifício de descarga até uma determinada altura e fluxo de massa a partir deste ponto até o topo, denominado de fluxo misto [30,34-36] sendo característico em silos esbeltos, cuja relação $H/D \geq 2$ [37].

Para silos de fundo plano, a formação de zonas estagnadas de produto é inevitável, e, portanto, os produtos granulares podem desenvolver fluxo de funil ou fluxo misto [36]. A variação do fluxo durante a descarga implica em variação de pressão não associada, além disso, valores de pressão obtidos durante a descarga podem ultrapassar, em alguns casos, os fornecidos pelo método de cálculo propostos pelas normas [38,39].

Apesar da predição das pressões estáticas e dinâmicas constituírem objeto de estudo por vários pesquisadores e muito progresso tenha sido alcançado, ainda não podem ser perfeitamente estimadas [40,41], contudo, algumas metodologias de cálculos são aceitas por apresentarem boa aproximação, destacando-se as formulações desenvolvidas por Janssen (1985) e Jenike et al. (1973) [10,42,43].

As lacunas existentes sobre o comportamento das pressões que ocorrem com o carregamento e descarregamento do produto no interior da estrutura, justificam a importância de estudos que contribuam para projetos de silos metálicos, possibilitando a elaboração de projetos seguros e confiáveis [10].

Existe quantidade relativamente pequena de pesquisas em silos pilotos, por se tratarem de projetos de alto custo [5,11,44-46]. Uma alternativa para estimar as pressões é o emprego de simulações, contudo, há divergências nos resultados obtidos, em razão das principais limitações dos métodos computacionais (problemas de distorções de malha), obrigando o uso de simplificações que em alguns casos não representam necessariamente a realidade [10,28,47,48]. Portanto, um procedimento de validação experimental deve ser sempre solicitado para garantir a qualidade dos resultados obtidos em simulação [5,11,28,48,49].

Nesse contexto, as estações experimentais configuram-se como uma abordagem adequada à aquisição de dados para entendimento da relação das ações do produto armazenado com a estrutura do silo, mensurando a interação de forma fidedigna e viabilizando a disponibilização de valores mais próximos aos reais.

Em função deste cenário, este trabalho teve como objetivo mensurar as pressões normais e de atrito em um silo-piloto cilíndrico de fundo plano, em duas relações H/D com descargas concêntricas, e comparar os resultados com os preconizados por meio das normas vigentes EN 1991-4 [23] e ANSI/ASAE S433.1 [25] para condições de carregamento e descarregamento de milho (comumente armazenado em silos cilíndricos de fundo plano). O modelo teórico de Jenike et al. (1973) [50] foi testado para uma das configurações.

2. Material e métodos

2.1. Estação Experimental

Uma estação de testes em escala piloto, baseada no projeto proposto por Pieper e Schütz (1980) [51], está localizada na Universidade Federal de Lavras (Figura 1). A

estação experimental consiste em um silo auxiliar de armazenamento, elevador de canecas e silo piloto. Esse modelo forneceu suportes para elaboração da DIN 1055-6 [27].

O silo piloto foi instrumentado, calibrado e validado pelo grupo de pesquisa Gandia et al. (2021) [52] como parte de um estudo extenso de pressões e fluxo em silos. Para detalhes do conjunto completo de medições e da confiabilidade geral da medição, uma descrição mais detalhada pode ser encontrada nas referências [5], [52]. As medidas de pressão foram controladas por meio de um programa de aquisição de dados (sistema LYNX, modelo DS2000), que registrou e analisou os dados em tempo real. A frequência de amostragem utilizada foi de 2 Hz.

O silo piloto é constituído por doze anéis independentes, de parede interna lisa (Figure 2). Cada anel apresenta 50 cm de altura, 10 mm de espessura e diâmetro interno de 70,5 cm, resultando uma altura total de 600 cm e capacidade de armazenamento de 2,35 m³ para produto granular. O orifício de descarga apresenta um diâmetro de 20 cm, sendo empregada uma chapa metálica tipo gaveta para controle da abertura.

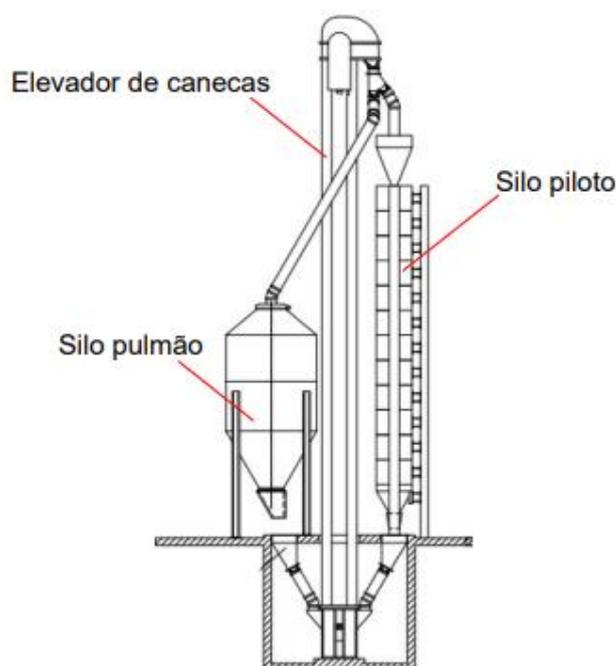


Figura 1. Estação experimental do silo piloto.

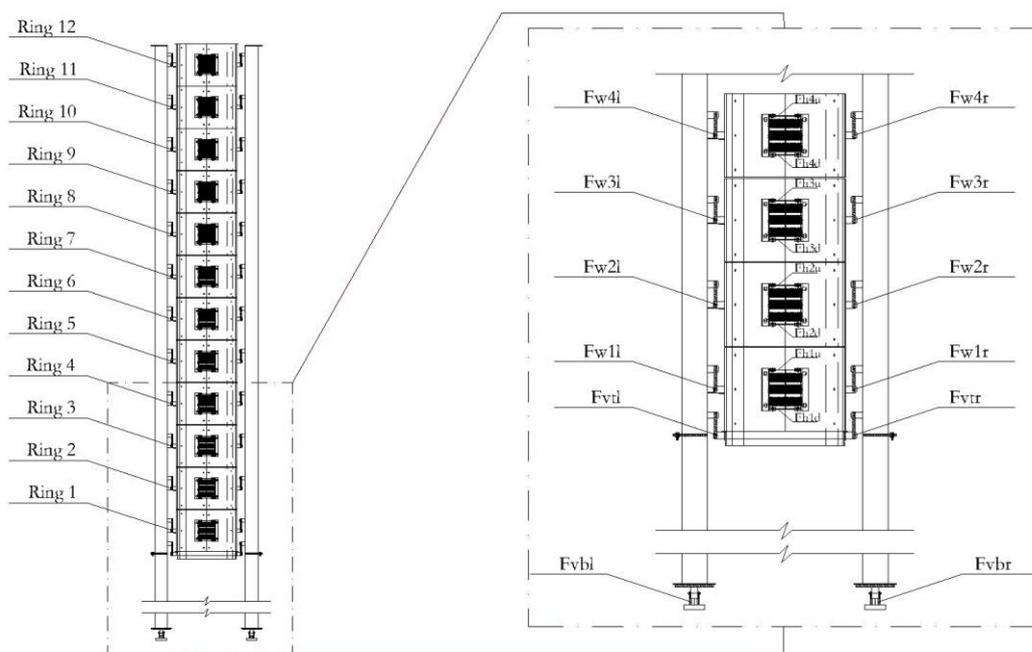


Figura. 2. Geometria do silo piloto e visualização detalhada de anéis com instrumentação e pontos de medição de forças e pressões no silo piloto.

2.2. Medição das forças verticais e horizontais

Para a medição das forças nos anéis foram instaladas células de carga de capacidade nominal de 80 kN. A força horizontal ($F_{h(1,12)u}$ e $F_{h(1,12)d}$) é mensurada por células de carga pré-tracionadas por meio de três molas helicoidais (Figura 3). Os anéis são suspensos por presilhas (células de carga verticais) de medição para determinação da força de atrito nas paredes ($F_{w(1,12)r}$ e $F_{w(1,12)l}$) (Figura 3). Todas as ligações das presilhas são articuladas nos apoios e nos anéis, cuja conexão se dá por meio de pinos de aço inoxidável.

Sob duas colunas do silo foram instaladas células de carga (F_{vbl} e F_{vbr}) para medição da força total mobilizada pelo atrito (Figura 3). Para as medições das pressões ao longo do fundo plano do silo-piloto, foram utilizadas células de pressão do tipo diafragma de 5,3 cm de diâmetro, de aço inoxidável, com capacidade nominal de 70 kPa cada (Figura 3).

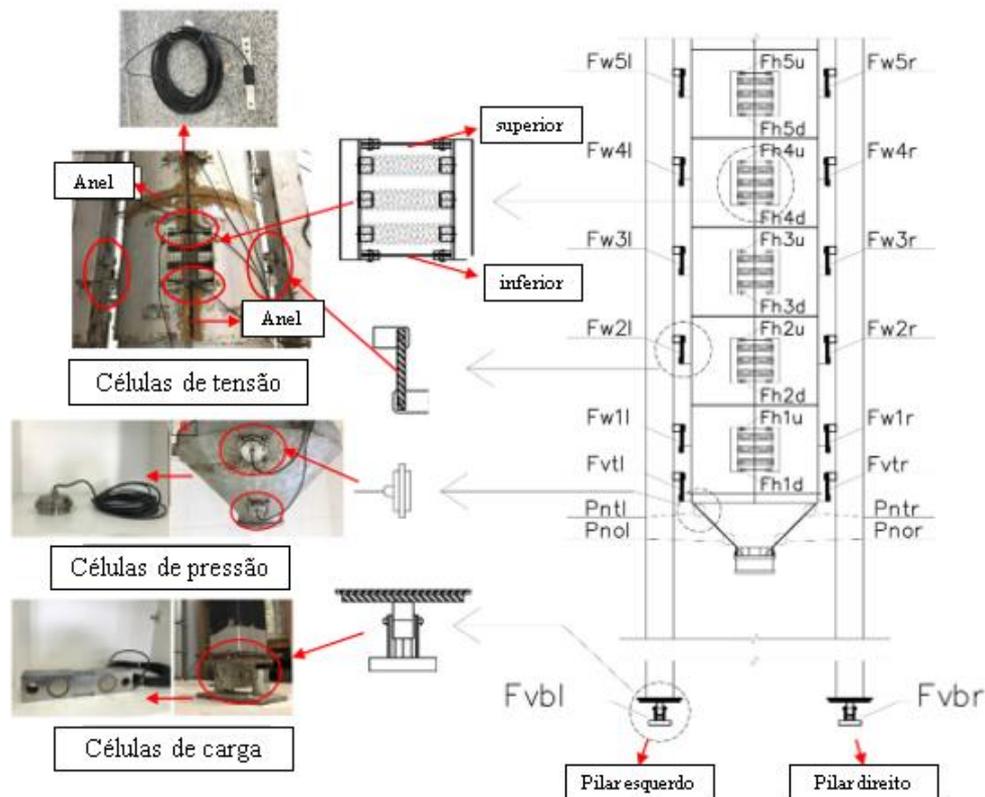


Figura 3. Instrumentação e pontos de medição de forças e pressões no silo piloto. Fonte: Gandia et al. (2021) [5].

2.3. Processamento de dados - Cálculo das pressões e outros componentes

Pressões horizontais ($p_{h(1,12)}$)

A pressão horizontal ($p_{h(1,12)}$) em cada anel foi relacionada à soma das forças obtidas nas células de carga de tração presente em cada anel ($F_{h(1,12)u}$ e $F_{h(1,12)d}$), pela altura do anel ($h_r = 0,495$ m) e o valor da constante dos momentos (C_r) (Eq. 1).

$$p_{h(1,12)} = \frac{F_{h(1,12)u} + F_{h(1,12)d}}{h_r \cdot C_{r(1,12)}} \quad (1)$$

A constante foi obtida experimentalmente por meio da calibração dos doze anéis (Tabela 1). No presente trabalho foram utilizados os valores experimentais das constantes de calibração para cada anel ($C_{r(1,12)}$), sendo apresentados somente os coeficientes dos anéis correspondentes à altura de carregamento máxima (2,0 m) (Tabela 1).

Tabela 1. Valores das constantes obtidas para cada anel do silo piloto.

Constante de cada anel	Valor da constante obtida experimentalmente
C_{r1}	0.275
C_{r2}	0.288
C_{r3}	0.253
C_{r4}	0.280

Pressão de atrito ($F_{w(1,12)}$)

A pressão de atrito na parede do silo foi medida indiretamente pelos pares de células de carga de tração localizadas no suporte vertical (posicionado a 180° de distância) de cada anel ($F_{w(1,12)r}$) e $F_{w(1,12)l}$), Eq. (2).

$$p_{w(1,12)} = \frac{F_{w(1,12)r} + F_{w(1,12)l}}{h_r \cdot d_i \cdot \pi} \quad (2)$$

Peso do produto armazenado (W)

O peso do produto armazenado (W) é obtido a partir da soma dos esforços obtidos das células de carga do tipo viga posicionadas na base dos pilares direito (F_{vbr}) e esquerdo (F_{vbl}), utilizando Eq. (3).

$$W_{(1,12)} = F_{vbr} + F_{vbl} \quad (3)$$

Coefficiente de sobrepressão (C_d)

Os coeficientes de sobrepressão foram determinados experimentalmente, pela relação expressa na Eq. (4).

$$C_d = \frac{p_{h(1,12)d}}{p_{h(1,12)f}} \quad (4)$$

2.4. Configurações dos testes

O produto utilizado para a realização dos testes no silo piloto foi o milho (*Zea mays*), com carregamento e descarregamento concêntricos, divididos em duas configurações com cinco repetições cada. Cada configuração diferiu quanto à altura do

enchimento do produto (esbeltez). Foram utilizadas duas alturas de carregamento: 1,5 m (relação H/D 2) e 2,0 m (relação H/D 3) (Fig. 4); e ambas configurações com fundo plano. Embora a relação altura/diâmetro não fosse exatamente 2 e 3, esse termo foi usado para facilitar a escrita.

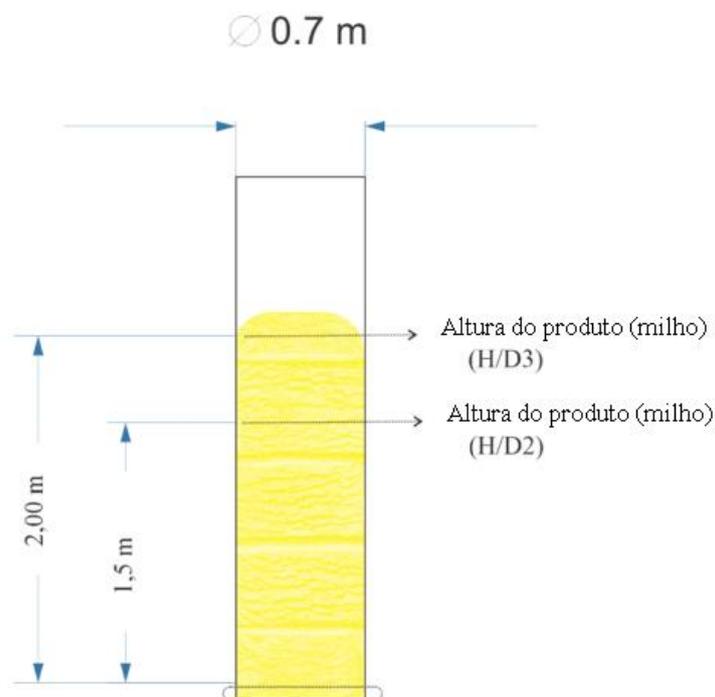


Figura 4. Configuração do ensaio, variando a altura de carregamento do produto.

A análise da pressão foi realizada durante as fases estática e dinâmica. O milho foi transferido para o silo piloto através de um elevador de canecas que proporcionou vazão constante e carregamento centralizado até que a massa de grãos atingisse altura de aproximadamente 1,5 m e 2,0 m, respectivamente (verificado pela célula de carga de tração que mostrou a medição para o anel acima da altura de interesse). Após o carregamento, o milho permaneceu em repouso por 10 min (condição estática) para estabilização do sistema e acomodação do produto armazenado, seguido do descarregamento do produto como orifício de descarga 100% aberto (Figura 5).

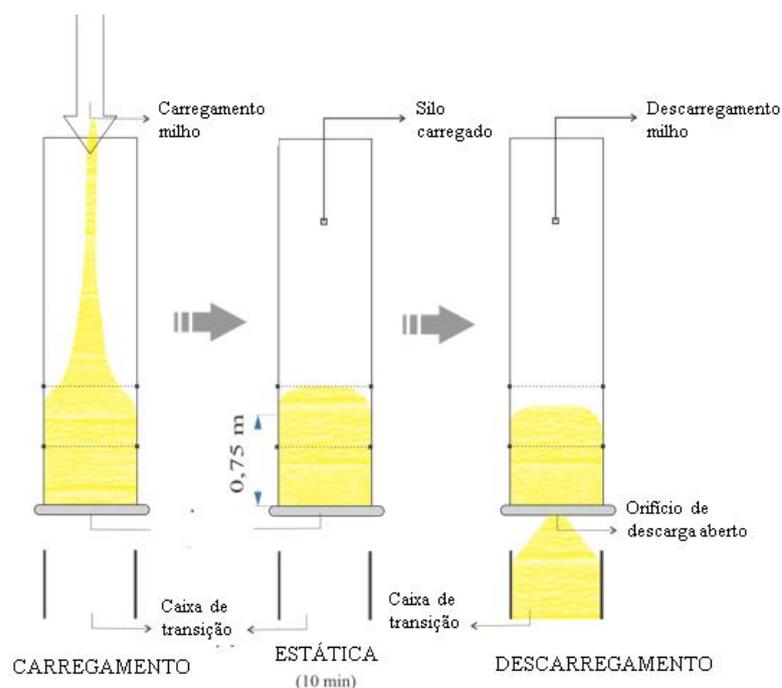


Figura 5. Descrição dos ensaios.

Na Tabela 2 são apresentados os valores relativos ao peso da massa de grãos para cada configuração de esbeltez e o peso específico (γ) do milho calculado de acordo com o volume e a carga de cada configuração.

Tabela 2. Carga média para cada teste.

Teste	Carga média do produto (kN)	Desvio padrão (kN)	Peso Específico Médio (kN m ⁻³)
H/D = 2	5.14	0.25	7.96
H/D = 3	6.54	0.13	7.85

Como cada uma das configurações testou uma geometria diferente (altura do cilindro), os valores de carga do produto também foram diferentes. Observa-se um baixo desvio padrão em ambas configurações, confirmando a uniformidade dos ensaios realizados.

2.5. Propriedades do produto armazenado

As propriedades físicas e de fluxo do milho (*Zea mays*) foram obtidas na Universidade Federal de Campina Grande, Brasil, com o uso de um dispositivo de

cisalhamento (modelo TSG 70/140) baseado no aparelho de cisalhamento Jenike. Para a execução do teste, foram utilizadas as recomendações da norma britânica [53,54], incluindo o Manual de Operação do TSG 70-140, que está em conformidade com o Eurocódigo 1, parte 4 [23] e ANSI/ASAE S433.1 [25]. Na Tabela 3 constam os valores (limites inferior e superior) obtidos nos ensaios.

Tabela 3. Variações das propriedades físicas e fluxo do milho (*Zea mays*).

Peso		Ângulo de		Coeficiente		Ângulo de		Efetivo		Umidade
Específico		atrito da		de atrito da		atrito		ângulo de		
(kN m ⁻³)		parede		parede		interno do		atrito interno		(b.u.)
						produto		do produto		
Inf.*	Sup.*	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Média
7.52	7.97	8.1°	11.8°	0.14	0.21	24°	40°	34°	42°	10.78%.

*Inf – limite inferior da propriedade; *Sup – limite superior da propriedade.

Os valores de peso específico obtidos nestes testes foram muito próximos aos obtidos com o silo experimental (Tabela 1), o que indica boa concordância entre as duas metodologias. Os valores utilizados para obter as pressões segundo o método de cálculo proposto no Eurocódigo 1, parte 4 [23] e ANSI/ASAE S433.1 [25] foram aqueles obtidos em ensaios laboratoriais.

2.6. Descrição das análises

Nos resultados e discussão abaixo, comparamos e discutimos as variáveis de esbeltez com os prescritos pelas normas Eurocode 1 parte 4 [23] e ANSI/ASAE S433.1[25].

A formulação básica para a previsão das pressões durante o carregamento nos códigos normativos é obtida da teoria de Janssen (1985). Em relação às pressões dinâmicas, as normas adotam coeficientes de majoração para as pressões estáticas.

No entanto, Jenike et al. (1973) [50] mostraram por meio de experimentos, que a predição das condições dinâmicas para silos muito esbeltos (relação $H/D > 2$) com fluxo de funil passa a ser insatisfatória assumindo-se as tensões de Janssen, sendo necessária a avaliação de uma envoltória de todos os possíveis picos de pressão. Deste modo, o modelo

de Jenike et al. (1973) [50] foi comparado com as pressões horizontais na condição dinâmica obtidas experimentalmente para relação H/D igual a 3.

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

As pressões foram avaliadas em todas as fases do teste (carregamento e descarregamento). O objetivo foi investigar possíveis incompatibilidades entre os valores de pressões obtidos experimentalmente e preditos pelas normas para diversas condições de carregamento e descarregamento de silos verticais esbeltos.

A análise dos resultados e a discussão dividem-se em: pressões horizontais na parede do silo; pressões de atrito e sobrepressão dinâmica no corpo do silo.

3. Resultados e discussão

3.1. Pressões horizontais na parede do silo

3.1.1. H/D igual a 2 (altura de 1.5 m)

A forma das curvas obtidas para as pressões horizontais máximas na parede do silo na condição estática, considerando esbelteza igual a 2, são apresentadas na Figura 6. As posições cotadas no gráfico (Fig. 6) são as relativas ao posicionamento das células de pressão no silo piloto.

Constata-se na Fig. 6 que os valores preditos pela ANSI/ASAE S433.1 [25] nas posições dos anéis 2 (p_{h2}) e 3 (p_{h3}) descrevem o comportamento obtidos nos testes, coincidindo com os valores experimentais (considerando os desvios padrões de 0.21 e 0.54 obtidos para os anéis 2 e 3, respectivamente). Observa-se que nas profundidades equivalentes aos anéis 2 e 3 as diferenças percentuais foram iguais a 16 e 17.2%, respectivamente.

Entretanto, sua predição passa a ser insatisfatória quando comparada com a maior profundidade do silo comparativamente aos valores obtidos experimentalmente (Fig. 6). Os dados experimentais na profundidade máxima do silo (p_{h1} - anel 1) são em torno 30% superiores as pressões fornecidas pela norma ANSI/ASAE S433.1 [25] (Fig. 6). Essas diferenças percentuais obtidas entre os valores teóricos e os experimentais com esta relação H/D, notadamente nas maiores profundidades, possivelmente constitui uma das razões do grande número de acidentes com silos.

Em todas as alturas, verifica-se que as máximas pressões horizontais foram obtidas com a formulação da norma europeia, sendo capaz de prever as pressões normais estáticas com relativa margem de segurança (Fig. 6). Observa-se também que os valores das pressões horizontais experimentais de carregamento registradas na parte intermediária do silo (p_{h2} - anel 2) foram inferiores (13.8%) aos calculados pela norma EN 1991-4:2006 [23] (Fig. 6).

Apesar dos códigos normativos adotarem a formulação de Janssen para a condição estática, os valores dos coeficientes de atrito grão-parede são menores na predição da norma europeia quando comparados ao valores propostos pela norma americana. Esse comportamento pode ser atestado ao analisar matematicamente a equação de Janssen e pelos estudos de Bucklin et al. (1989) [55].

É importante destacar que os valores obtidos pela norma europeia são calculados considerando a situação mais desfavorável em relação às propriedades do produto granular (limites superior e inferior), durante toda a vida útil do silo e para qual deverá ser projetado, em contrapartida, a norma americana estabelece valores fixos para os coeficientes de atrito grão-parede, parâmetro K e peso específico máximo dos grãos, sendo essas propriedades referentes ao grão de trigo (cujo valor é 834 kg m^{-3} , para qualquer produto com fluxo livre), o qual provoca maiores solicitações.

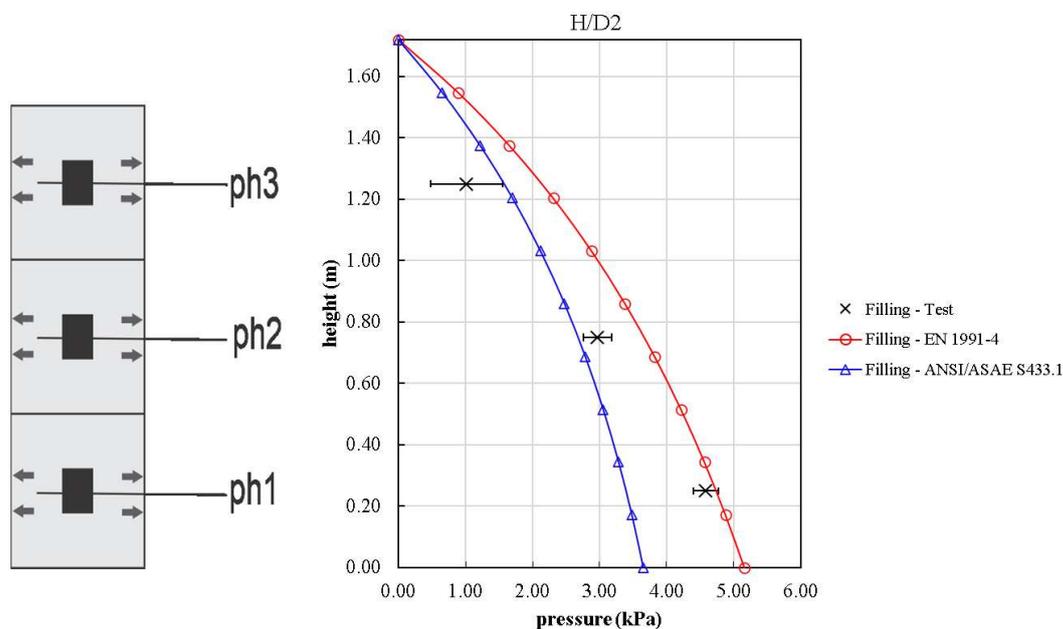


Figura 6. Pressões horizontais teóricas e experimentais durante o carregamento para silo com relação H/D igual a 2 (produto: milho).

Na Fig. 7 consta o gráfico das máximas pressões horizontais mensuradas experimentalmente e calculados pelas normas para a condição de descarregamento do silo com relação H/D igual a 2.

O comportamento das pressões na Figura 7 implica na formação de um funil de escoamento (zona estática), pois não houve aumento significativo de pressão na descarga, o que caracteriza o escoamento através de um funil [50], corroborando com o encontrado por Gandia et al. [56] para mesma configuração de silo (H/D igual a 2).

Ao comparar as pressões calculadas pelas normas com as mensuradas experimentalmente durante a descarga, nota-se que os valores das pressões calculadas pela norma americana descreveram com maior precisão o comportamento para as profundidades de 0.75 e 1.5 m, contudo, sua predição passa a ser insatisfatória quando comparada com a maior profundidade do silo (p_{h1} - anel 1), subestimando a pressão experimental em 10% (Fig. 7). Nesta situação, colapsos podem ocorrer devido às possibilidades de padrões de flambagem crescerem significativamente na fase estática antes de uma mobilização total de atrito na parede [57]. Outras falhas possíveis envolvem distorções ou deformações, pelo fato das partículas sólidas transferirem tensões de cisalhamento entre si e entre si e as paredes do silo, mesmo que não haja movimento relativo entre elas [58].

Os valores determinados pela norma europeia foram mais conservadores ao longo de toda altura do silo, sendo 56, 63 e 61% superiores aos valores experimentais obtidos para os anéis 1, 2 e 3, respectivamente. A determinação correta da distribuição e magnitude das pressões laterais nas paredes de um silo é determinante para a segurança e economia dos projetos. A estimativa conservativa das pressões é favorável para segurança estrutural, entretanto, influencia nos custos de fabricação e montagem, onde se determinam as qualidades do material e as tolerâncias requeridas, proporcionando aumento no preço do silo.

Ao analisar as pressões em um silo cilíndrico com tremonha e relação altura/diâmetro igual a 2, Couto et al. (2013) [39] não encontraram a mesma aproximação aos dados experimentais para a norma Eurocode [23]. Os autores constataram que na parte inferior do corpo (denominado ponto GA1) esta norma superestimou os resultados experimentais entre 26 e 41%. Ao mensurar as pressões em um silo cilíndrico esbelto de paredes lisas, Cheung & Calil Júnior (2009) [59] concluíram que as forças de descarga podem ser perfeitamente representadas por meio de coeficientes de sobrecarga adicionados às forças de carregamento.

Como ponto de diferenciação, cada norma adota diferentes coeficientes de sobrepressão às pressões de carregamento para obtenção dos valores de descarga o que, inevitavelmente, tende a gerar diferentes resultados de pressão para o mesmo silo, como pode ser observado na Fig. 7. Constata-se que a norma ANSI/ASAE S433.1 [25] apresentou-se adequada pela semelhança dos valores de coeficientes de sobrepressão experimentais.

Pela análise dos pontos teóricos é possível observar que os coeficientes de sobrecarga adotados pelas normas são muito distintos, resultando em curvas bastante diferentes. A norma ANSI/ASAE S433.1 [25] apresentou-se adequada para o descarregamento concêntrico e relação H/D igual a 2, por praticamente se igualar aos valores encontrados nos ensaios. Esse resultado se deve ao fato de o coeficiente de sobrecarga adotado por essa norma diferir em apenas 1.4% do encontrado experimentalmente.

A norma EN 1991-4:2006 [23] pode ser adotada para a configuração de silo analisada, contudo, constitui um modelo um tanto conservativo em relação às pressões horizontais de descarregamento.

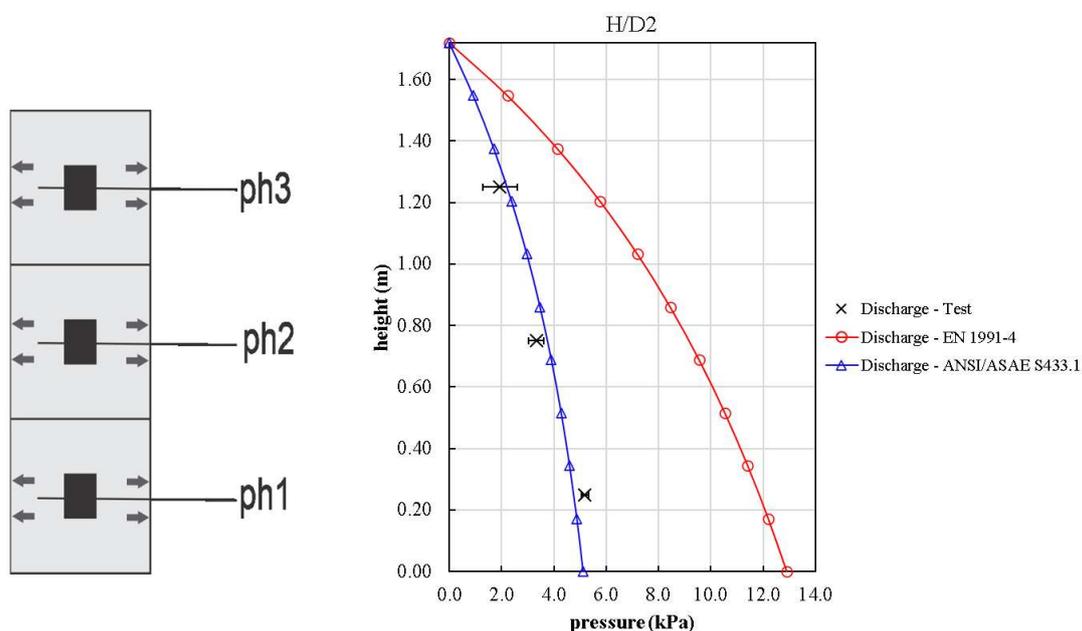


Figura 7. Pressões horizontais teóricas e experimentais durante o descarregamento para silo com relação H/D igual a 2 (produto: milho).

3.1.2. H/D igual a 3 (altura de 2.0 m)

Verifica-se (Fig. 8) que com maior esbeltez (H/D igual a 3) em relação aos valores experimentais, os valores preditos pela ANSI/ASAE S433.1 [25] subestimam em média 30% os valores das máximas pressões horizontais para a condição estática em todas as profundidades analisadas, sendo mais expressiva na profundidade máxima do silo (p_{h1} – anel 1), com valores 33.4% inferiores aos experimentais.

Na Figura 8, observa-se que, de forma geral, os valores determinados pela EN 1991-4:2006 [23] descreveram com maiores precisão a magnitude e o comportamento das pressões para a condição de carregamento. Essa constatação é evidenciada a partir da comparação entre os resultados teóricos terem sido, em média, 10% superiores aos encontrados nos ensaios experimentais.

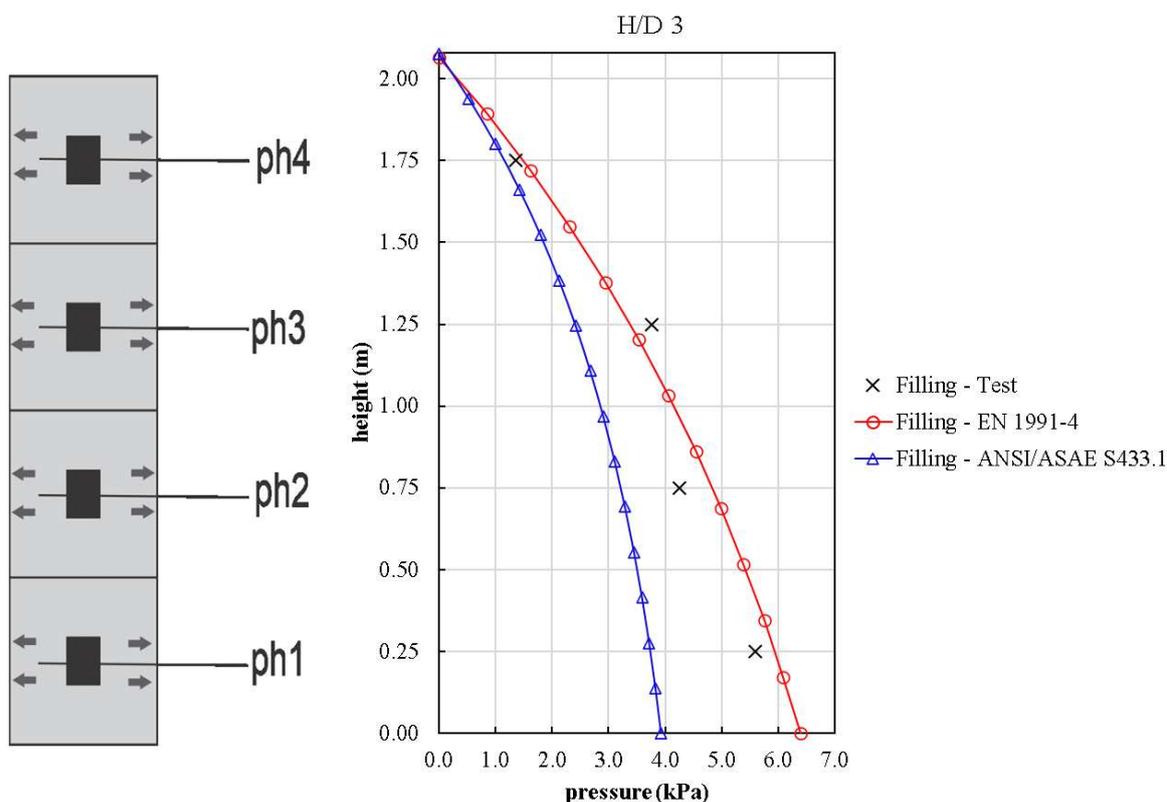


Figura 8. Pressões horizontais teóricas e experimentais durante o carregamento para silo com relação H/D igual a 3 (produto: milho).

As curvas das pressões horizontais para condição de carregamento são notavelmente divergentes entre as normas analisadas, evidenciadas na Figura 8. Como ponto de diferenciação cada norma adota distintos coeficientes de atrito grão-parede e fator k (relação teórica entre as pressões horizontais e verticais) no cálculo das pressões.

A norma ANSI/ASAE S433.1 [25] emprega um valor fixo igual a 0.5 para o fator k e estabelece o coeficiente de atrito grão-parede como 0.3. Em contrapartida, a EN 1991-4:2006 [23] recomenda que o máximo valor do fator k seja obtido em função do menor valor do ângulo de atrito interno e preconiza que coeficiente de atrito grão-parede seja determinado em função do menor ângulo de atrito grão-parede, condição essa que promove maiores valores de pressão da norma europeia, levando a diferença de 37% na maior profundidade do silo-piloto (p_{h1} - anel 1) em relação a norma americana (Fig. 8).

Na Figura 9 pode-se constatar que os valores obtidos experimentalmente apresentaram uma tendência assintótica em relação ao eixo da profundidade para a relação H/D 3 na condição dinâmica. Devido a elevada esbeltez do modelo analisado, durante o descarregamento observou-se fluxo misto, ou seja, condição essa que indica a ocorrência em simultâneo do fluxo de funil e de massa.

O modelo que melhor descreveu a envoltória dos picos de pressão durante a descarregamento para a para a relação H/D 3 foi o modelo de Jenike et al. (1973) [50], apresentando boa correlação com os dados experimentais. O emprego da norma ANSI/ASAE S433.1 [25] considerando o fator $F=1.4$ não descreveu o comportamento dos picos de pressão mensurados durante os ensaios experimentais, não sendo adequada para previsão das pressões horizontais de descarregamento, na região correspondente, aproximadamente, ao primeiro terço da altura do silo (p_{h4} - anel 4 e p_{h3} - anel 3) (Fig. 9).

As maiores pressões são apresentadas pela EN 1991-4:2006 [23] (Fig. 9), sendo em média 63% superiores em relação aos valores obtidos experimentalmente, na região inferior do silo (anéis 1 e 2) e 44% superiores aos experimentais na região superior do silo (anéis 3 e 4).

Observa-se (Fig. 9) que as pressões horizontais de descarga para silos esbeltos ($H/D = 3$) não correspondem à teoria de Janssen se for ponderada por um coeficiente, conforme proposto no Eurocódigo 1 parte 4, devido à influência do fundo do silo e ao tipo de fluxo. Nesses casos, o tipo de fundo do silo pode ser um critério a ser considerado para calcular ações nas paredes [1].

O valor máximo de pressão obtido experimentalmente ocorreu aproximadamente a 1.25 m do fundo do silo, diretamente sobre as células de pressão que ocorreram acima do nível de transição efetivo, onde o limite do fluxo cruzou as paredes do silo e, isso é consistente com o entendimento geral sob um cenário de fluxo misto. Abaixo da transição efetiva na parte inferior do silo, as menores flutuações foram associadas ao canal de escoamento interno onde efetivamente não havia escoamento contra as paredes do silo.

Há evidências experimentais [20,60-62] que sugerem que a parede do silo sofre um aumento considerável na pressão horizontal na transição efetiva onde o canal de fluxo cruza com o silo.

Estas características da pressão corroboram com os resultados encontrados no experimento de Wang et al. (2015) [28]. Os autores afirmam que o ponto onde o fluxo intercepta a parede pode variar em tempo e localização, em correspondência com o desenvolvimento do fluxo. Uma boa compreensão de tal fenômeno é importante no projeto de silo [28].

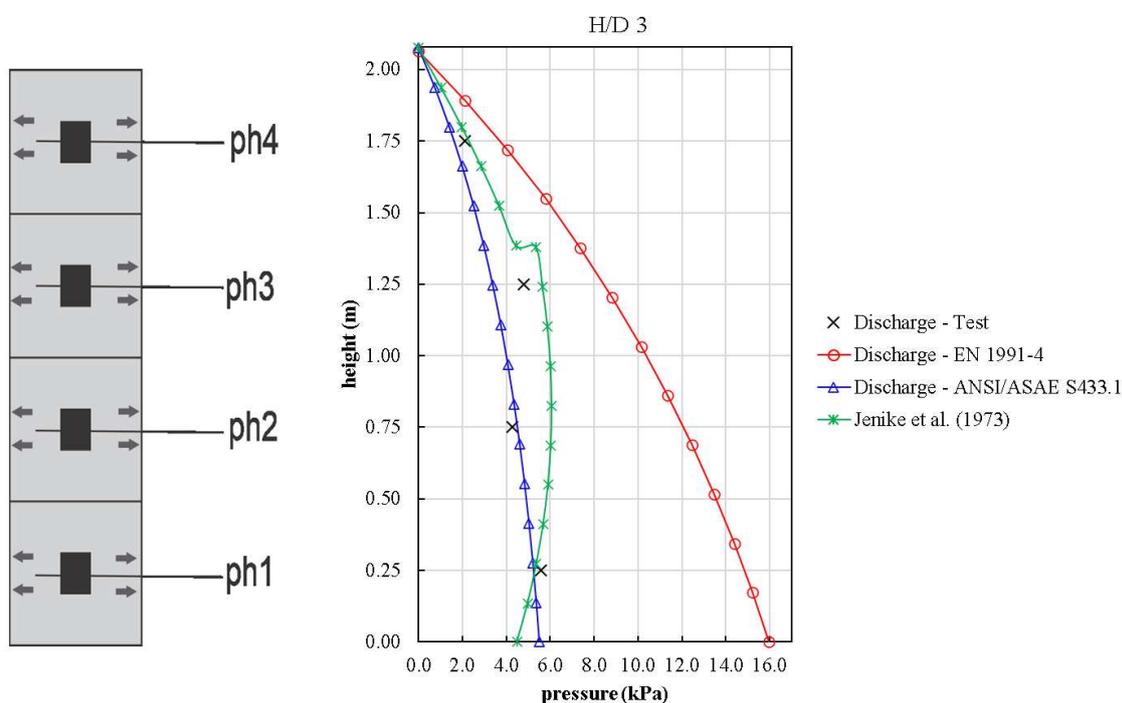


Figura 9. Pressões horizontais teóricas e experimentais durante o descarregamento para silo com relação H/D igual a 3 (produto: milho).

A partir dos dados acima mostrados, observa-se que as pressões de carregamento apresentam uma tendência exponencial, o que pode ser muito bem representado pelo modelo de pressão de Janssen (1985), desde que sejam obtidas com a combinação mais desfavorável das propriedades físicas do produto. Já para as pressões de descarregamento, o modelo de Jenike et al. (1973) [50] oferece um melhor ajuste aos dados experimentais.

3.2. Pressões de atrito na parede do silo

3.2.1. H/D igual a 2 (altura de 1.5 m)

Na Fig. 10 são apresentados os valores máximos das pressões de atrito teórico e experimentais para a configuração de silo H/D igual a 2, na condição de carregamento. Nota-se que os valores preditos pela EN 1991-4:2006 [23] ajustam-se perfeitamente os experimentais para a parte superior do silo ($p_{w2,3}$ correspondentes aos anéis 2 e 3, respectivamente). Para a maior profundidade do silo (p_{w1} - anel 1), o modelo da norma EN 1991-4:2006 [23] não representou os dados experimentais, apresentando valores, em média, 15% inferiores (Fig. 10).

Na condição do silo carregado, o modo axissimétrico de flambagem local poderá ocorrer, provocado pela ação resultante do atrito do material armazenado e a parede do silo [12]. Os silos baixos ($H/D \leq 1.5$) apresentam menor risco de sofrer flambagem local devido à compressão meridional (direção da geratriz).

As curvas da pressão de atrito na parede do silo durante o carregamento concêntrico para a norma americana cobriram com margem de segurança os valores obtidos experimentalmente, destacando-se a boa aproximação da norma ANSI/ASAE S433.1 [25] para a profundidade de 0.25 m (p_{w1} - anel 1) (Fig. 10).

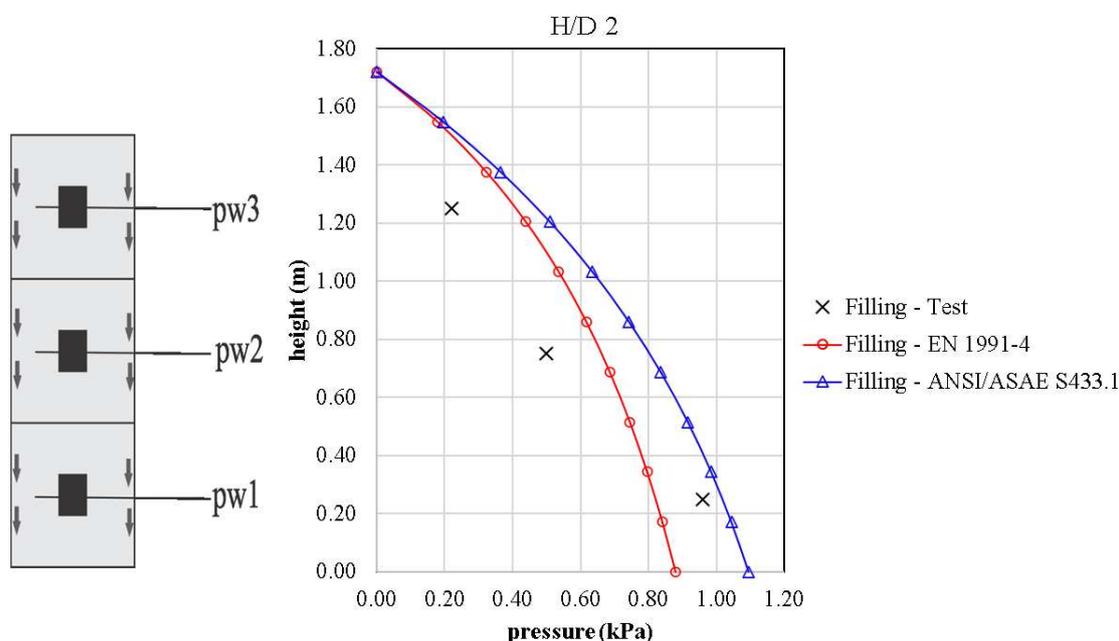


Figura 10. Pressões de atrito teóricas e experimentais durante o carregamento para silo com relação H/D igual a 2 (produto: milho).

Na Figura 11 encontram-se as curvas máximas pressões de atrito na parede do silo nas profundidades de 0.25, 0.75 e 1.5 m durante o descarregamento concêntrico. Observa-se que os valores das pressões de atrito experimentais não ultrapassaram os valores calculados pela norma EN 1991-4:2006 [23] ao longo da altura do silo, demonstrando segurança na previsão desses esforços para o descarregamento.

A predição da pressão de atrito dinâmica para a norma ANSI/ASAE S433.1 [25] foi consideravelmente conservadora em relação aos valores experimentais. Observa-se (Fig. 11) que na profundidade máxima do silo (p_{h1} - anel 1) as maiores pressões são apresentadas pela ANSI/ASAE S433.1 [25] 34.5% superior ao valor experimental.

O código normativo americano resultou em valores consideravelmente superiores ao código europeu por adotar em suas formulações de determinação das pressões de atrito, o coeficiente de atrito grão-parede do trigo, determinado por Moore et al., (1842) [63]. É importante destacar que essa majoração de esforços conduz a dimensionamentos antieconômicos das paredes e montantes, ou seja, estruturas mais caras.

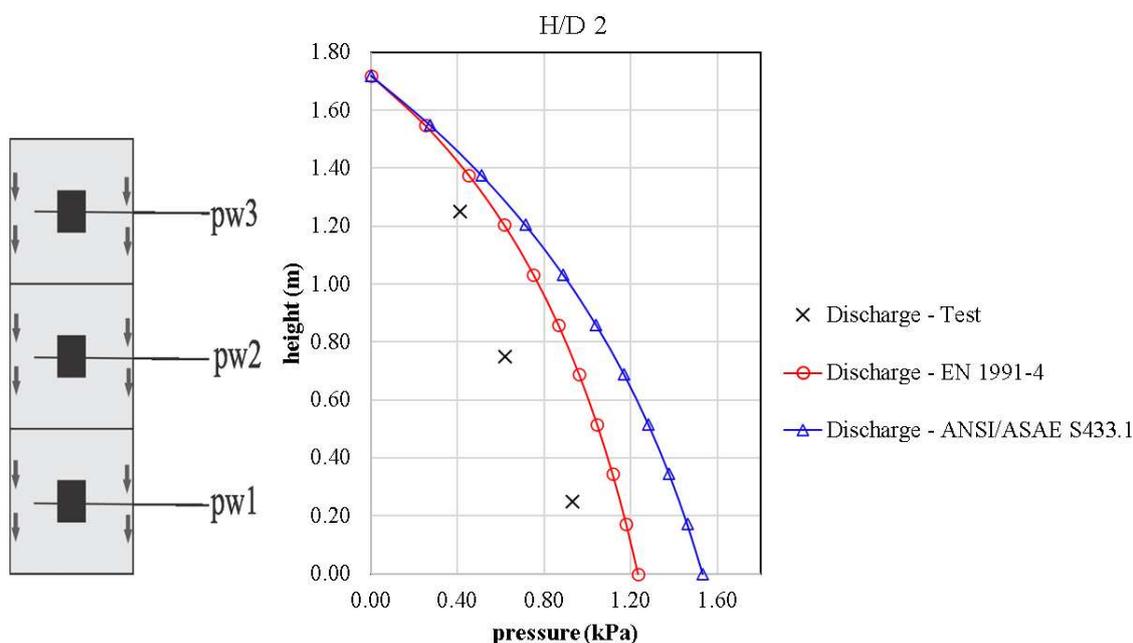


Figura 11. Pressões de atrito teóricas e experimentais durante o descarregamento para silo com relação H/D igual a 2 (produto: milho).

Os dados apresentados nas Fig. 10 e 11 estão de acordo com o estudo realizado por Gandia et al. (2021) [56] ao avaliarem a pressão de atrito temporal ao longo da altura de um silo cilíndrico esbelto (H/D igual a 2) utilizando milho, produto de fluxo livre, como produto armazenado. Os autores constataram que o primeiro anel (p_{w1}) apresenta

comportamento distinto dos demais anéis. Observa-se uma diminuição da pressão no início do escoamento, reforçando que o produto armazenado estagnou naquela região (estava presente um canal de escoamento), resultando em menor vazão e, portanto, menos força vertical foi exercida na região do primeiro anel [56].

3.2.2. *H/D igual 3 (altura de 2.0 m)*

As pressões de atrito durante o carregamento e descarregamento de milho, obtidas para a configuração de silo H/D igual a 3 com fundo plano, são apresentadas nas Figuras 12 e 13. A principal carga de projeto para montante é devido ao atrito do grão com a parede do silo, caso esta carga seja subavaliada, a estrutura poderá apresentar problemas, entre eles, flambagem dos montantes.

Observa-se pela Figura 12 que os valores experimentais se adequam à predição da norma EN 1991-4:2006 [23] apenas para a região intermediária do silo, ou seja, 0.75 e 1.25 m, sendo ligeiramente inferior aos valores experimentais (6%) na maior profundidade do silo (0.25 m).

A pressão de atrito na parede é resultante de cada profundidade, ou seja, vai somada as porções superiores. Sendo assim, entende-se que a norma EN 1991-4:2006 [23] é adequada para o cálculo da forma que será absorvida pelos montantes, mesmo tendo o ponto de maior profundidade diferente do calculado.

De acordo com a Figura 12, ocorreu aumento na tendência de ajuste entre os valores experimentais e os recomendados pela ANSI/ASAE S433.1 [25], praticamente igualando-se aos valores encontrados nos ensaios na maior profundidade do silo (p_{h1} - anel 1).

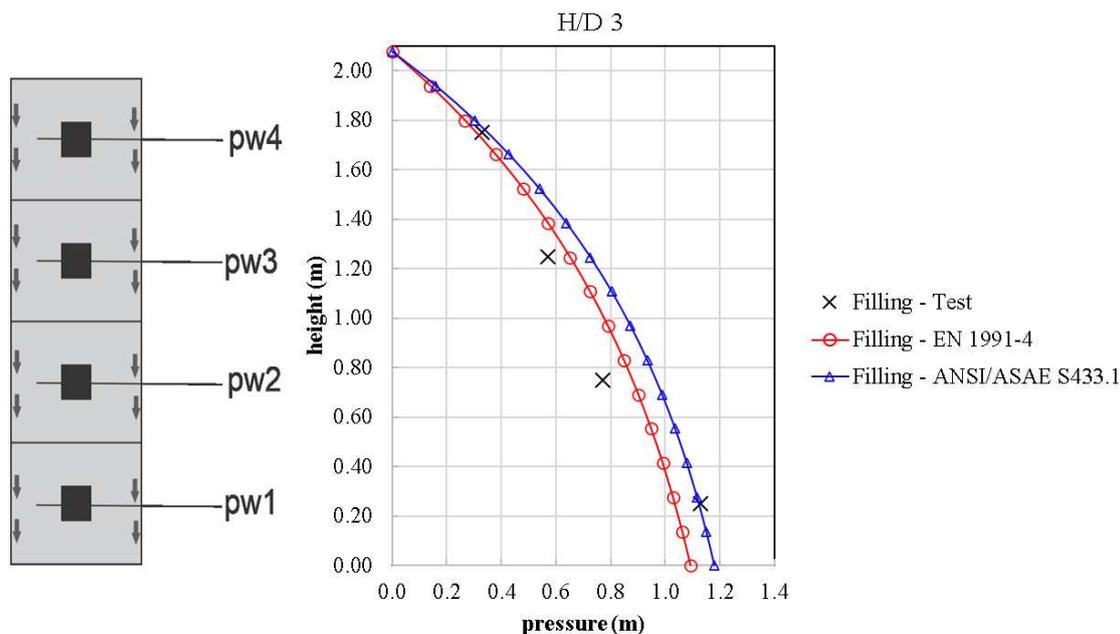


Figura 12. Pressões de atrito teóricas e experimentais durante o carregamento para silo com relação H/D igual a 3 (produto: milho).

Durante a descarga observa-se que os valores das pressões de atrito foram subestimados em alguns pontos pelos códigos normativos (Fig. 13). Os valores calculados pela norma EN 1991-4:2006 [23] ajustaram-se bem aos obtidos experimentalmente na região superior do silo (p_{w4} – anel 4) e inferior, atendendo os anéis 1 e 2, praticamente igualando-se aos valores encontrados nos ensaios (Fig. 13). Entretanto, a predição da norma EN 1991-4:2006 [23] não foi capaz de cobrir a pressão de atrito localizada no terceiro anel, subestimando o valor máximo experimental (1.03 kPa) em 15.5%, no descarregamento (Fig. 13).

Em contrapartida, nota-se que os valores das pressões de atrito experimentais não ultrapassaram os valores calculados pela ANSI/ASAE S433.1 [25], sendo consideravelmente superestimados na parte inferior do silo (p_{h1} - anel 1) em 27%, pelo fato da norma demonstrando segurança na previsão desses esforços.

Observa-se pela Fig. 13 que o modelo de Jenike et al. (1973) [50] apresentou-se adequado aos valores obtidos experimentalmente. Sabe-se que o ponto crítico em silos com fluxo misto é a transição efetiva, porém nenhuma norma analisada fornece sua localização. Constatou-se que teoria de Jenike et al. (1973) [50] é a que melhor descreve o comportamento para silos com relação H/D igual a 3 e fundo plano, apresentando uma boa correlação com os dados experimentais, cobrindo todos os valores obtidos.

Nota-se (Fig. 13) que na profundidade máxima do silo (p_{h1} - anel 1) as maiores pressões são apresentadas pela ANSI/ASAE S433.1 [25], sendo 28% superior aos valores da EN 1991-4:2006 [23] e ao modelo de Jenike et al. (1973) [50]. Observa-se também que a pressão obtida com o modelo de Jenike et al. (1973) [50] é 39% superior que a pressão obtida pela EN 1991-4:2006 [23] e 14.3% superior ao prescrito pela norma ANSI/ASAE S433.1 [25] no ponto onde possivelmente o canal do fluxo toca a parede, registrada pelo sensor localizado no terceiro anel (p_{w3}) (Fig. 13).

A diferença entre os resultados das normas para a força de atrito durante o carregamento reside, basicamente, na formulação proposta para o fator k [40]. Ao passo que, o coeficiente de sobrepressão aplicado pelas normas é o responsável pelas diferenças nos resultados das pressões de atrito dinâmicas. Nota-se a grande variabilidade das recomendações tanto por pesquisadores como pelas normas. Muito provavelmente esta diferença explica o grande número de silos com problemas nos montantes.

Lopes Neto et al. (2014) [40] realizaram análise e comparação com normas de diversos países, para os valores de forças de atrito nas paredes de um silo cilíndrico de paredes lisas de fundo plano com diferentes relações altura/diâmetro. Para a relação $H/D = 2.4$, o que representa um silo classificado como esbelto, de modo geral, todas as normas analisadas pelos autores (EN 1991-4 (2006), ISO 11697 (1995), AS 3774 (1996) e DIN 1055 (1987)) foram insatisfatórias ao prever as forças experimentais. Os resultados obtidos pelos autores evidenciam os valores teóricos propostos pelas normas AS 3774 e DIN 1055 são mais adequados para representar as forças de atrito, considerando descarregamento concêntrico para todas as relações H/D estudadas.

Jenike et al. (1973) [50] explicam que no momento de descarga do produto, onde a mudança do estado ativo para o passivo de tensões ocorre, um pico de pressão (sobrepressão) é exercido sobre as paredes do silo. Essa sobrepressão de descarga se desloca para cima no mínimo até o nível no qual o canal intercepta o corpo do silo, foi observada sua presença no anel 3 (p_{w3}) (Fig.13).

Existem muitas normas para cálculo das pressões no interior de silos, contudo, os padrões variam em precisão e complexidade ao lidar com cálculos de pressões exercidas pelos produtos. Essa variação é notada especialmente em termos de classificação, estimativa de cargas dinâmicas [10], evidenciando a importância de que seja redigida uma norma brasileira que considere a variabilidade e tipos de produtos que são armazenados no país.

Muito progresso foi feito nos últimos 50 anos no fornecimento de diretrizes para predição de pressões em silos para engenheiros de projeto e estruturais. A EN 1991-4:2006 é um avanço significativo em relação a todos os códigos anteriores, mesmo assim, não cobre muitos casos comuns [58].

Conforme recomendações de Carson & Craig (2015) [58], para casos de carga não cobertos pelos códigos, o engenheiro de projeto/estrutural tem duas opções: ser extremamente conservador na estimativa de cargas aplicadas. No entanto, essa abordagem pode ser bastante cara e ainda não ser conservadora o suficiente para evitar que o silo falhe. A segunda opção seria contar com engenheiros de projeto com experiência significativa no cálculo de cargas de silos.

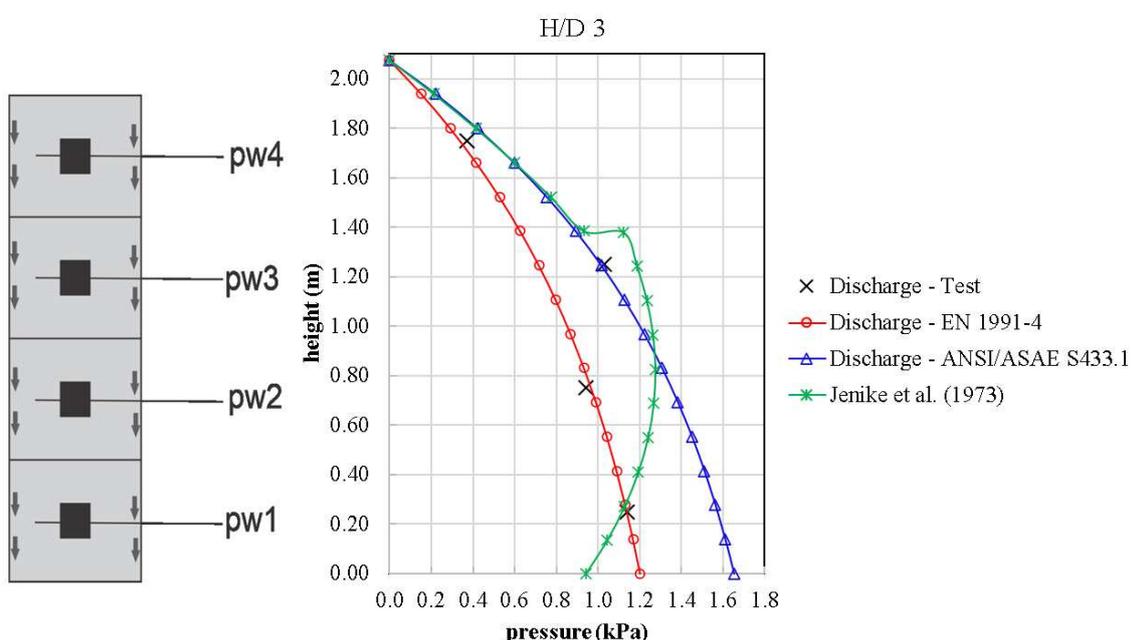


Figura 13. Pressões de atrito teóricas e experimentais durante o descarregamento para silo com relação H/D igual a 3 (produto: milho).

3.3. Coeficiente de Sobrepressão (Cd)

3.3.1. H/D igual a 2 (altura de 1.5 m)

Na Tabela 4 constam os valores dos coeficientes de sobrepressão obtidos nos ensaios para a configuração H/D igual a 2. Para o milho obteve-se coeficiente de sobrepressão médio de 1,38.

Constata-se que a adoção de pressões adicionais deve-se ao fato de que pressões assimétricas são inevitáveis, mesmo para silos com carregamento concêntrico, sendo dependentes das propriedades do produto armazenado e das imperfeições na geometria das paredes do silo. Raramente o fluxo ocorre em um canal de fluxo vertical, sempre há

movimentos laterais, denominados *ratholes*, que alteram completamente o campo de pressão na massa de grãos, promovendo sobrepressão. Por estas razões, os silos devem ser projetados para resistir às pressões assimétricas, tendo especial atenção aos momentos de flexão induzidos por estas pressões.

Dada a incerteza da atuação das pressões adicionais, permite-se utilizar uma aproximação, que consiste em afetar as pressões atuantes por um coeficiente de ponderação. Quanto aos valores normatizados observa-se grande consonância da ANSI/ASAE S433.1 [25] com os dados experimentais. A norma americana recomenda a adoção de um fator de sobrepressão de 1.40, diferença de apenas 1.4% com o fator obtido experimentalmente, o que justifica a boa correlação com os dados experimentais, cobrindo os valores obtidos, sendo o que mais aproximou-se das pressões obtidas experimentalmente, conforme apresentado na Figura 7.

Em contrapartida, houve uma superestimação teórica da sobrepressão dinâmica pelo Eurocódigo para essa categoria de esbeltez, descrito também por Mansour et al. (2022) [22], produzindo resultados conservadores em comparação aos resultados obtidos experimentalmente. Isso se justifica pelo fato do Eurocódigo propor métodos para calcular as diferentes pressões de acordo com a classe a que pertence o silo. O silo-piloto enquadra-se como modelo classe 1 de confiabilidade e esbelto, deste modo, o valor do coeficiente de sobrepressão utilizado é igual a 2.5.

Nascimento et al. (2013) [11] mostram que os coeficientes tendem a aumentar com o aumento da profundidade do silo para a relação H/D igual a 1,0. No entanto, para a razão $H/D = 1,5$, as maiores diferenças de sobrepressão entre os sensores de pressão ocorreram próximo a parte superior do silo devido à mudança de fluxo de massa para fluxo de funil próximo à $H/D = 1.2$, para grãos de trigo. Os autores identificaram coeficiente de sobrepressão igual a 2,0 na parte superior em um silo metálico cilíndrico de paredes corrugadas e fundo plano com 1,82m de diâmetro e 5,4m de altura.

Coefficientes de sobrepressão variando de 1.2 a 1.3 foram encontrados em estudos com relação de altura/diâmetro igual a 1.6 e 2.4, com silo cilíndrico de parede lisa, fundo plano e descarregamento concêntrico, devendo estes serem utilizados em projetos de silos verticais cilíndricos [40].

Tabela 4. Coeficientes de sobrepressão horizontal para o silo-piloto na configuração H/D igual a 2.

Anel	Altura (m)	C_d	C_d médio
3	1.25	1.90	
2	0.75	1.12	1.38
1	0.25	1.13	

3.3.2. H/D igual a 3 (altura de 2.0 m)

Na Tabela 5 se encontram os valores dos coeficientes de sobrepressão obtidos para o silo-piloto na configuração H/D igual a 3. Os coeficientes de sobrepressão possuem o mesmo comportamento dos obtidos para configuração de H/D igual a 2 (Tabela 4), com os valores decrescendo ao longo da profundidade do silo.

Os coeficientes de sobrepressão nas maiores profundidades do silo (anéis 1 e 2) apresentaram distribuição uniforme de pressões, indicando a influência da esbeltez e do tipo de fundo (fundo plano) nas pressões horizontais.

Durante a descarga, pressões quase constantes foram registradas na parte inferior do silo em comparação com o estado estático (Figuras 8 e 9), justificando o coeficiente igual a 1. Uma explicação para este achado pode ser que o padrão de propagação de sobrepressão durante a descarga, da parte inferior para a parte superior do silo, produz pressões aumentadas em certas áreas, mas pressões constantes ou mesmo reduzidas em outras. [64].

Tabela 5. Coeficientes de sobrepressão horizontal para o silo-piloto na configuração H/D igual a 3.

Anel	Altura (m)	C_d	C_d médio
4	1.75	1.56	
3	1.25	1.27	
2	0.75	1.00	
1	0.25	1.00	1.21

Segundo Mansour et al. (2022) [22], diferentes coeficientes de atrito grãos-parede podem levar a diferentes sobrepressões. Deste modo, em termos de projeto, deverão ser

determinados dois limites (inferior e superior) para cada parâmetro do produto a ser armazenado, de modo a delimitar a sua faixa de variação e, com isso, obtém-se as combinações mais desfavoráveis para cada caso.

Os resultados obtidos nos estudos de Vidal et al. (2005) [1] relataram que os silos de fundo plano com fluxo misto apresentam valores de sobrepressão inferiores aos obtidos no caso de silos de tremonha com padrão de fluxo mássico. O estudo também indicou que a pressão de descarga aumenta à medida que o tamanho da saída aumenta e o coeficiente de atrito grão-parede diminui.

A distribuição local dos componentes dinâmicos de sobrepressão ao longo da circunferência da seção e sobre a altura do silo deve ser melhor avaliada, permitindo uma fórmula de projeto mais robusta, uma vez que a maioria dos estudos analíticos assume distribuição uniforme de sobrepressões e a maioria dos padrões não se aproxima desse problema [22].

O modelo em escala reduzida de silo de fundo plano foi utilizado por Yuan et al. (2013) [65]. Em seu trabalho, foi determinada a pressão lateral estática nas paredes do silo. Seus resultados indicaram que a existência da sobrepressão dinâmica do silo durante o projeto de engenharia não pode ser ignorada, corroborando com os resultados obtidos no presente trabalho (Tabelas 3 e 4). Em conclusão, os avanços da pesquisa no campo são urgentemente necessários.

4. Conclusões

- O silo-piloto apresentou-se adequado para as medidas experimentais de pressões do milho, com boas respostas para a avaliação das pressões de carregamento e descarregamento, por meio do sistema de instrumentação utilizado

- O estudo mostrou que o silo vertical metálico investigado apresentou valores de pressões acima dos valores recomendados pelas normas utilizadas, o que está de acordo com a grande ocorrência de falhas estruturais em silos metálicos de fundo plano armazenando produtos granulares ocorridas nos últimos anos no Brasil;

- Durante o descarregamento, as pressões horizontais da parede podem exceder as obtidas pelo método de cálculo proposto pela ANSI/ASAE S433.1 para a relação $H/D = 2$, desde que utilize o fator de sobrepressão 1.4;

- Durante o descarregamento em silos cilíndricos de fundo plano cuja relação H/D é igual a 3, dentre as normas analisadas, a EN 1991-4:2006 ajustou-se melhor aos dados experimentais. Contudo, a teoria de Jenike et al. (1973) [50] apresentou valores teóricos

mais próximos aos experimentais em todas as profundidades analisadas (0.25, 0.75, 1.25 e 1.50 m);

- Dentre as normas estudadas, a EN 1991-4:2006 se adequa ao cálculo da pressão de atrito dinâmica no silo de esbeltez igual a 2;

- As pressões de atrito dinâmicas ao longo da parede para o silo de esbeltez igual a 3 foram melhor representadas pela teoria de Jenike et al. (1973);

- Os coeficientes de sobrepressão obtidos decresceram ao longo da altura do silo. Os coeficientes de sobrepressão médios foram 1.38 para H/D igual a 2 e 1.21 para H/D igual a 3.

Declarações de crédito aos autores

Dornelas Karoline C: Conceituação, Metodologia, Validação, Análise Formal, Investigação, Curadoria de Dados, Redação- Rascunho Original, Redação - Revisão e Edição, Visualização. **Rodrigues Hygor C S:** Curadoria de dados, Redação - Revisão e Edição. **Gandia Rômulo M:** Metodologia, Redação - Revisão e Edição. **Gomes Francisco C:** Supervisão, Administração de projetos, Captação de recursos. **Nascimento José W B:** Análise Formal, Supervisão, Administração de projetos, Captação de recursos.

Declaração de conflitos de interesses

Os autores declaram que não têm interesses financeiros concorrentes ou relacionamentos pessoais que influenciaram a pesquisa relatada neste artigo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento da bolsa associada a este projeto. Também agradecem a parceria com a Universidade Federal de Lavras.

Referências

- [1] P. Vidal, M. Guaita, F. Ayuga, Analysis of dynamic discharge pressures in cylindrical slender silos with a flat bottom or with a hopper: comparison with Eurocode 1, Biosyst. Eng. 91(2005) 335-348, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.03.012>.
- [2] C. Sonat, C. Topkaya, J.M. Rotter, Buckling of cylindrical metal shells on discretely supported ring beams, Thin-Walled Struct. 93 (2015) 22–35, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.03.003>.

- [3] M. Wójcik, M. Sondej, K. Rejowski, J. Tejchman, Full-scale experiments on wheat flow in steel silo composed of corrugated walls and columns, *Powder Technol.* 311 (2017): 537-555, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.066>.
- [4] O. Zeybek, M. Seçer, A design approach for the ring girder in elevated steel silos, *Thin-Walled Struct.* 157 (2020), 107002, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107002>.
- [5] R.M. Gandia, F.C. Gomes, W.C. de Paula, P.J.A. Rodriguez, Evaluation of pressures in slender silos varying hopper angle and silo slenderness, *Powder Technol.* 394 (2021) 478-495, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.087>.
- [6] J. Wiącek, E. Gallego, P. Parafiniuk, R. Kobyłka, M. Bańda, J. Horabik, M. Molenda, Experimental analysis of wheat-wall friction and grain flow in a steel silo with corrugated walls, *Biosyst. Eng.* 209 (2021) 216-231, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.07.003>.
- [7] H. Jing, H. Chen, J. Yang, P. Li, Shaking table tests on a small-scale steel cylindrical silo model in different filling conditions, *Struct.* 37 (2022) 698–708, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.026>.
- [8] Z. Xu, P. Liang, Modified lateral pressure formula of shallow and circular silo considering the elasticities of silo wall and storage materials. *Sci. Rep.* 12 (2022) 7069, <https://doi-org.ez292.periodicos.capes.gov.br/10.1038/s41598-022-11305-6>.
- [9] V. Purushotham, B.D.V.C.M. Rao, P.S. Rao, Parametric study of silo analysis, *Materials Today: Proceedings.* 51 (2022) 2450-2456, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.614>.
- [10] M. Khalil, S. Ruggieri, G. Uva, Assessment of Structural Behavior, Vulnerability, and Risk of Industrial Silos: State-of-the-Art and Recent Research Trends, *Appl. Sci.* 12 (2022) 3006, <https://doi.org/10.3390/app12063006>
- [11] J.W.B. do Nascimento, J.P. Lopes Neto, M.D. Montross, Horizontal pressures in cylindrical metal silos and comparison with different international standards, *Eng. Agric.* 33 (2013) 601-611, <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000400002>.
- [12] A. M. Mehretehran, S. Maleki, Axial buckling of imperfect cylindrical steel silos with isotropic walls under stored solids loads: FE analyses versus Eurocode provisions, *Engineering Failure Analysis,* 137 (2022) 106282, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106282>.
- [13] X. Wang, Y. Shi, B.Luo, C. Liang, D. Liu, J. Ma, X. Chen, Flow profile and wall normal stress characteristics in pattern-transformable flow silos, *Chemical Engineering Research and Design,* 182 (2022) 381-394, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.04.019>.

- [14] J.M. Rotter, *Guide for the economic design of circular metal silos*, Spon. Press., Taylor & Francis Group, London, New York (2001).
- [15] Q.S. Cao, Y. Zhao, Buckling design of large eccentrically filled steel silos, *Powder Technol.* 327 (2018): 476-488, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.001>.
- [16] S. Silvestri, S. Ivorra, L.D. Chiacchio, T. Trombetti, D. Foti, G. Gasparini, L. Pieraccini, M. Dietz, C. Taylor, Shaking-table tests of flat-bottom circular silos containing grain-like material, *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 45.1 (2016): 69-89, <https://doi.org/10.1002/eqe.2617>.
- [17] S. Silvestri, S. Mansour, M. Marra, J. Distl, M. Furinghetti, I. Lanese, E. Hernández-Montes, C. Neri, M. Palermo, A. Pavese, E.R. Parisi, A.J. Sadowski, F. Selva, T. Taniguchi, L. Vadrucchi, F. Weber, Shaking table tests of a full-scale flat bottom manufactured steel silo filled with wheat: Main results on the fixed-base configuration, *Earthquake Engng Struct Dyn.* 51.1 (2022): 169-190, <https://doi.org/10.1002/eqe.3561>.
- [18] Y. Lei, Q. Ma, Q. Shi, Side-wall pressure distribution of cylindrical granular containers with flat bottom, *Powder Technol.* 353 (2019): 57-63, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.003>.
- [19] Z. Tian, D. Jiao, Discrete sizing optimization of stepped cylindrical silo using PSO method and implicit dynamic FE analysis, *Eng. with Comput.* 37 (2021) 1015–1047, <https://doi-org.ez52.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00366-019-00870-6>.
- [20] A.J. Sadowski, J.M. Rotter, J. Nielsen, A theory for pressures in cylindrical silos under concentric mixed flow, *Chem. Eng. Sci.* 223 (2020) 115748, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115748>.
- [21] K.C. Dornelas, G.D.J. Ayres, H.C.S. Rodrigues, R.T., Nascimento, J.P. Lopes Neto, J.W.B. do Nascimento, The throat of Brazilian Agricole production: The breakdown of vertical silos. *Res., Soc. Dev.* 10.8 (2021) e14510817253, <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17253>.
- [22] S. Mansour, L. Pieraccini, M. Palermo, D. Foti, G. Gasparini, T. Trombetti, S. Silvestri, Comprehensive Review on the Dynamic and Seismic Behavior of Flat-Bottom Cylindrical Silos Filled With Granular Material. *Front. Built. Environ.* 7 (2022) 2297-3362, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.805014>.
- [23] CEN, EN 1991--4:2006, Eurocode 1: Actions on Structures. Part 4: Silos and Tanks, Brussels, 2006.
- [24] Internacional Organization for Standardization, ISO 11697, Bases for design of strutures - Loads due to bulk materials, 2012.

- [25] ANSI/ASAE: S433.1, Loads Exerted by Free-Flowing Grain on Bins. American Society of Agricultural and Biological Engineers. St Joseph: [s.n.], 2019.
- [26] AS 3774, Australian Standard: Loads on bulk 20containers. Supplement 1. Sydney: [s.n.], 1997.
- [27] DIN, DIN 1055--6, Basis of design and actions on structures – Part 6: design 623 loads for buildings and loads in silo bins, Berlin, Verlaz, 2005.
- [28] Y. Wang, Y. Lu, J.Y. Ooi, A numerical study of wall pressure and granular flow in a flat-bottomed silo, *Powder Technol.* 282 (2015) 43-54, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.01.078>.
- [29] H. Hammadeh, F. Askifi, A. Ubysz, M. Maj, A. Zeno, Effect of using insert on the flow pressure in cylindrical silo. *Studia Geotechnica et Mechanica* 41.4 (2019) 177-183, <https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0022>.
- [30] K. Saleh, S. Golshan, R. Zarghami, (2018) A review on gravity flow of free-flowing granular solids in silos – Basics and practical aspects, *Chem. Eng. Sci.* 192 (2018) 1011-1035, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.08.028>.
- [31] J. Xue, S. Schiano, W. Zhong, L. Chen, C.Y. Wu, Determination of the flow/no-flow transition from a flat bottom hopper, *Powder Technol.* 358 (2019) 55-61, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.063>.
- [32] J. RAVENET, *Silo: deformaciones, falhas, explosiones, prevencion de*, Barcelona, Ed. Tecnicos Asociados, 1983.
- [33] R. Kobyłka, J. Horabik, M. Molenda, Numerical simulation of the dynamic response due to discharge initiation of the grain silo, *Int. Jour. of Sol. and Struct.* 106 (2017) 27-37, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.12.001>.
- [34] M.C.V. Olivares, J.G. Benito, R.O. Uñac, A.M. Vidales, Towards a one parameter equation for a silo discharging model with inclined outlets, *Powder Technol.* 336 (2018) 265-272, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.010>.
- [35] R.M. Gandia, W.C. de Paula, E.A. de Oliveira Junior, G.H. Rodrigo, Á.R. Padín, A.T.Vegas, F.C. Gomes, P.J.A. Rodríguez, Effect of the Hopper Angle of a Silo on the Vertical Stress at the Cylinder-to-Hopper Transition, *Agronomy*, 12.4 (2022) 830, <https://doi.org/10.3390/agronomy12040830>
- [36] D. Zhang, X. Yang, J. Zhan, X. Liu, Fluctuation of particles during funnel flow discharge from flat-bottomed silos, *AIChE Journal* 68.1 (2022) e17414, <https://doi.org/10.1002/aic.17414>.

- [37] A.J. Sadowski, J.M. Rotter, Steel silos with different aspect ratios: I - behavior under concentric discharge, *Jour. of Constr. Steel Resear.* 67.10 (2011) 1537-1544, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.03.028>.
- [38] A. Couto, A. Ruiz, L. Herraiez, J. Moran, P.J. Aguado, Measuring pressures in a slender cylindrical silo for storing maize. Filling, static state and discharge with diferente material flow rates and comparison with Eurocode 1 part 4, *Comput. Electron. Agric.* 96 (2013) 40–56, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.04.011>.
- [39] A. Couto, A. Ruiz, P.J. Aguado, 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.* 237 (2013) 450–467, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.030>.
- [40] J.P. Lopes Neto, J.W. do Nascimento, M.Z. Fank, Forças verticais e de atrito em silos cilíndricos com fundo plano, *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* 18 (2014) 652-657, <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000600013>.
- [41] S. Sun, J. Zhao, C. Zhang, Calculation of Silo Wall Pressure considering the Intermediate Stress Effect. *Adv. Civ. Eng.* 2018 (2018) 1–10, <https://doi-org.ez52.periodicos.capes.gov.br/10.1155/2018/3673515>.
- [42] R.J. Goodey, C.J. Brown, J.M. Rotter, Rectangular steel silos: Finite element predictions of filling wall pressures, *Eng. Struct.* 132 (2017) 61-69, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.023>.
- [43] A.J. Matchett, Exponential stress in silos — An example from literature, *Chem. Eng. Res. Des.* 161 (2020) 125-129, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.06.030>.
- [44] J. Haertl, J.Y. Ooi, J.M. Rotter, M. Wójcik, M., S. Ding, G.G. Enstad, The influence of a cone-in-cone insert on flow pattern and wall pressure in a full-scale silo, *Chemical engineering research and design*, 86.4 (2008) 370-378, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2007.07.001>.
- [45] A. Ramírez, J. Nielsen, F. Ayuga, J. Munch-Andersen, On the use of plate-type normal pressure cells for silos. In *Proceedings of the 5th World Congress on Particle Technology [CD-ROM]* 23-27 April, Orlando (USA).. 2006.
- [46] A. Couto, A. Ruiz, P.J. Aguado, Design and instrumentation of a mid-size test station for measuring static and dynamic pressures in silos under different conditions - part I: description, *Comput. Electron. Agric.* 85 (2012) 164–173, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.04.009>.

- [47] J.M. Rotter, F.G. Holst, J.Y. Ooi, M. Sanad, Silo pressures predictions using discrete-element and finiteelement analyses. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. Phil. Trans. Math. Phys. Eng. Sci. Series A*, 356.1747 (1998) 2685–2712, <https://doi.org/10.1098/rsta.1998.0293>.
- [48] R. Balevičius, I. Sielamowicz, Z. Mróz, R. Kačianauskas, Effect of rolling friction on wall pressure, discharge velocity and outflow of granular material from a flat-bottomed bin, *Particuology*, 10.6 (2012) 672-682, <https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.07.002>.
- [49] E. Gallego, A. Ruiz, P.J. Aguado, Simulation of silo filling and discharge using ANSYS and comparison with experimental data, *Comput. Electron. Agric.* 118 (2015) 281–289, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.014>.
- [50] A.W. Jenike, J.R. Johanson, J.W. Carson, Bin loads—Part 4: funnel-flow bins, *J. Eng. Ind.* 95 (1973) 13–16, <https://doi.org/10.1115/1.3438089>.
- [51] K. Pieper, M. Schütz, Bericht über das Forschungsvorhaben Norm-Mess-Silo für Schüttguteigenschaften, Technische Universität, Hochbaustatik, 1980.
- [52] R.M. Gandia, F.C. Gomes, W.C. de Paula, E.A.O. Junior, P.J.A. Rodriguez, Static and dynamic pressure measurements of maize grain in silos under different conditions, *Biosyst. Eng.* 209 (2021) 180–199, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.07.001>.
- [53] A. Jenike, *Storage and Flow of Bulk Solids Bull*, 123, University of Utah, 1964.
- [54] WPMPs, *Standart Shear Testing Technique for Particulate Solids Using the Jenike Shear Cell*, England 1989.
- [55] R.A. Bucklin, S.A. Thompson, I.J. Ross, R.H. Biggs, Apparent Coefficient of Friction of Wheat on Bin Wall Material, *Transactions of the ASAE*, 32.5 (1989) 1769–1773, <https://doi.org/10.13031/2013.31221>.
- [56] R.M. Gandia, E.A. de Oliveira Júnior, F.C. Gomes, W.C. de Paula, K.C. Dornelas, Experimental Pressures Exerted by Maize in Slender Cylindrical Silo: Comparison with Iso 11697, *Eng. Agr.* 41 (2021): 576-590, <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n6p576-590/2021>.
- [57] G. Gutiérrez, C. Colonnello, P. Boltenhagen, J.R. Darias, R. Peralta-Fabi, F. Brau, E. Clément, Silo Collapse under Granular Discharge, *Phys. Rev. Lett.* 114.1 (2015), 018001, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.114.018001>.
- [58] J. Carson, D. Craig, Silo design codes: Their limits and inconsistencies, *Proc. Eng.* 102 (2015) 647-656, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.157>.

- [59] A.B. Cheung, C. Calil Junior, Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos, *Caderno de Engenharia de Estruturas*, 11.48 (2009) 1-22.
- [60] J. Hartlén, J. Nielsen, L. Ljunggren, G. Mårtensson, S. Wigram, The wall pressure in large grain silos: inventory, pressure measurements, material investigations. Document-Swedish Council for Building Research 2 (1984).
- [61] J. Munch-Anderson, J. Nielsen, The internal pressures in the outlet zone and the transition zone of a silo, In: *Third International Conference on Bulk Materials, Storage, Handling and Transportation: Preprints of Papers: Preprints of Papers*. Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia, (1989) 235-239.
- [62] J. Munch-Anderson, J. Nielsen, Pressures in slender grain silos. Measurements in three silos of different sizes. In: *2nd European Symposium on the Stress and Strain behaviour of Particulate Solids-Silo Stress*, Praha, Czechoslovakia. 1990.
- [63] D.M. Moore, G.M. White, I.J. Ross, Friction of wheat on corrugated metal surfaces, *Trans. ASAEM*, 27.6 (1842), 1842–1847.
- [64] A. Ruiz, A. Couto, P.J. Aguado, 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, *Comput. Electron. Agric.* 85 (2012) 174-187, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.04.008>.
- [65] F. Yuan, X.D. Li, Y.H. Song, The research of squat silos dynamic pressure and eccentric discharge trial. *Appl. Mec. Mat.* 438 (2013) 612–618, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.438-439.612>.
-

CAPÍTULO IV

**SIMULAÇÃO DE CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO
EM SILOS CILÍNDRICOS METÁLICOS USANDO O MÉTODO
DOS ELEMENTOS FINITOS E COMPARAÇÃO COM DADOS
EXPERIMENTAIS****SIMULATION OF CYLINDRICAL STEEL SILOS FILLING AND
DISCHARGE USING FINITE ELEMENT METHOD AND
COMPARISON WITH EXPERIMENTAL DATA**

Artigo submetido na Revista Computers and Electronics in Agriculture (ISSN 0168-1699).

SIMULAÇÃO DE CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO EM SILOS CILÍNDRICOS METÁLICOS USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E COMPARAÇÃO COM DADOS EXPERIMENTAIS

RESUMO

Silos, especialmente os constituídos por seção cilíndrica com fundo plano, são comumente usados para armazenamento de produtos granulares em fazendas e setores industriais. Apesar dos avanços nas pesquisas sobre pressão atuando nas paredes dos silos, ainda existem muitas lacunas para se obter uma previsão confiável das pressões, especialmente na fase dinâmica. Este artigo descreve uma análise de elementos finitos das pressões geradas por armazenamento de produto granular em um silo modelo constituído por uma seção cilíndrica de fundo plano, variando a relação H/D. Os resultados numéricos foram validados contra as observações experimentais de um silo piloto baseada no modelo de Pieper e Schütz (1980), armazenando milho. As propriedades físicas foram determinadas experimentalmente em laboratório e as mecânicas obtidas da literatura. Os cálculos numéricos foram realizados usando uma formulação arbitrária Lagrangiana. Os resultados dos elementos finitos da apresentaram concordância satisfatória na distribuição da pressão estática na parede, para todas as relações H/D analisadas. Os padrões das curvas obtidas para as pressões dinâmicas foram semelhantes, contudo, os resultados numéricos foram inferiores aos obtidos experimentalmente em magnitude. Os resultados da simulação mostram flutuações de pressão significativas durante a descarga do silo.

Palavras-Chave: Silos; Pressões normais; Descarga; Produto de fluxo livre; Modelo numérico; Propriedades dos produtos armazenados.

ABSTRACT

Silos, especially those consisting of a cylindrical section with a flat bottom, are commonly used for the storage of granular products in farms and many industries. Despite advances in research on pressure acting on silo walls, there are still many gaps to obtain a reliable prediction of pressures, especially in the dynamic phase. This article describes a finite element analysis of the pressures generated by storing granular product in a model silo consisting of a cylindrical flat-bottomed section, varying the H/D ratio. Numerical results were validated against experimental observations of a pilot silo based on the model of Pieper and Schütz (1980), storing corn. The physical properties were determined experimentally in the laboratory and the mechanical ones obtained from the literature. The computations were performed using an Arbitrary Lagrangian formulation. The finite element results of the presented satisfactory agreement in the distribution of the static pressure in the wall, for all the analyzed H/D ratios. The patterns of the curves obtained for the dynamic pressures were similar, however, the numerical results were lower than those obtained experimentally in magnitude. The simulation results show significant pressure fluctuations during silo discharge.

Keywords: Silos; Normal pressures; Discharg; Free-flowing product; Numerical model; Properties of stored products.

1. Introdução

As estruturas para armazenamento de grãos são geralmente silos cilíndricos metálicos de paredes finas (Cao e Zhao, 2017; 2018; Maleki e Mehrehtehran, 2019; Trung et al., 2020; Tian e Jiao, 2021). Com o rápido crescimento das indústrias alimentícias, a demanda por armazenamento de grãos aumentou dramaticamente. Assim, a integridade estrutural e a segurança dos silos tornaram-se cada vez mais importantes (Ranjan Debbarma et al., 2022).

A esbelteza dos silos produzidos comercialmente, definida como a relação altura/diâmetro da parte cilíndrica, situa-se entre 0,4-3,5 (Sondej et al., 2018), no caso de silos de grande diâmetro a relação geralmente não excede $H/D=1,0$. Códigos e diretrizes internacionais geralmente adotam o termo *squat* para descrever silos com baixas relações altura/diâmetro ($H/D \leq 1,5$) e silos esbeltos para estruturas com altas relações altura/diâmetro ($H/D \geq 1,5$) (Hussei e Risan, 2022). A configuração predominante dos silos empregados em fazendas é de baixa relação entre a altura e o seu diâmetro, e fundo plano. Em contrapartida, no setor industrial é comum a utilização de silos esbeltos.

O ponto de partida essencial no projeto estrutural e de fluxo dos silos é a determinação das propriedades físicas do produto armazenado, devendo ser conduzidas nas condições mais severas daquelas esperadas que ocorram em um silo, possibilitando a previsão das pressões nas fases estática e dinâmica (Maleki e Mehrehtehran, 2019).

A distribuição da pressão da parede depende do tipo de silo. De acordo com as características de carga, os silos são geralmente divididos em silos esbeltos e silos baixos. Para silos esbeltos, a maioria dos padrões de projeto são baseados na teoria de Janssen, mas cada um deles considera diferentes coeficientes de pressão de parede. As teorias clássicas de pressão de parede para silos baixo incluem a teoria de Rankine e a teoria de Coulomb modificada (Sun et al., 2018; Jayachandran et al., 2019).

Embora muitos estudos tenham sido desenvolvidos sobre essas estruturas, muitas incertezas ainda permanecem, uma vez que as leis que controlam o comportamento dos materiais armazenados em silos não são totalmente compreendidas. (Tian e Jiao, 2021). Os métodos analíticos nem sempre predizem corretamente essas pressões (González-Montellano et al., 2011) 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.

Goodey et al. (2017) constataram que as orientações de projeto existentes na EN 1991-4:2006 levam a dimensionamentos de silos metálicos consideravelmente mais caros

do que o necessário. Sondej et al. (2018) afirmam que o dimensionamento analítico de silos de chapas corrugadas baseado nos códigos normativos atuais de silos é muito simplificado e antieconômico, especialmente para silos com distâncias relativamente grandes entre os montantes.

Cabe salientar que a taxa de falhas em silos é muito superior à encontrada em outras construções industriais (Sondej et al., 2018; Chavez Sagarnaga e Kulkarni, 2020; Hussei e Risan, 2022; Ranjan Debbarma et al., 2022), as pressões exercidas pelo material armazenado são geralmente um fator chave para as diversas falhas e colapsos em silos (Sondej et al., 2018; Bywalski e Kamiński, 2019; Gandia et al., 2022). Embora a pressão atuando nas paredes do silo durante o carregamento seja razoavelmente bem compreendida, uma previsão confiável da pressão durante a descarga continua sendo um importante problema em aberto para o projeto de silos (Wang et al., 2014; Sondej et al., 2018; Jayachandran et al., 2019).

Nesse contexto, o advento de técnicas numéricas abriu novos caminhos para a compreensão das interações complexas entre os sólidos armazenados e as paredes do silo (Zhao e Jofriet, 1992; Holst et al., 1999; Ayuga et al., 2006; Gallego et al., 2010; Gallego et al., 2015; Pardikar et al., 2020; Gandia et al., 2021a; Moya et al., 2022). Nas últimas décadas, progressos significativos foram feitos nas abordagens computacionais para sólidos granulares e no projeto de silos em todo o mundo (Hilal et al., 2022).

Dos métodos numéricos destacam-se pela sua importância o método dos elementos finitos (MEF), o método dos elementos discretos (DEM) e combinações dos dois (Vidal et al., 2008). Estudos estabeleceram o MEF como mais preciso para prever as tensões do silo (Gallego et al., 2015; Jayachandran et al., 2019). O MEF foi apontado na EN 1993-4-1:2007 (Eurocode 3-Design of steel structures-Silos) como a ferramenta mais precisa e confiável para análise de tensões estruturais, devendo ser o único método numérico validado para os silos nas Classes de Confiabilidade das Ações 3 (Tian and Jiao, 2021).

Nesse contexto, evidencia-se que os métodos numéricos são muito úteis para o entendimento dessas estruturas complexas (Ooi e Rotter, 1990; Chen et al., 1999; Martinez et al., 2002; Wang et al., 2014; Wang et al., 2015, Horabik et al., 2016), pois é possível simular simultaneamente a existência de uma parede flexível e o material armazenado no silo, ou considerar modelos de materiais não lineares para o sólido granular, entre outros (Gallego et al., 2015). Conseqüentemente, o emprego dos métodos numéricos pode não apenas melhorar a qualidade e durabilidade do silo, mas também gerar benefícios econômicos (Sun et al., 2018). Segundo Sondej et al. (2018) silos

projetados usando MEF oferecem maiores oportunidades para avaliação realista da capacidade de carga de flambagem do silo, em comparação com os cálculos baseados em padrões normativos. Esta abordagem leva a uma enorme economia de material, ao mesmo tempo que permite analisar em detalhes fenômenos importantes.

Entretanto, os modelos numéricos devem ser validados por ensaios experimentais (Gallego et al., 2015; Gandia et al., 2021a), fornecendo alguns parâmetros necessários para simulações (Couto et al., 2013; Moya et al., 2022) e permitindo que os modelos sejam ajustados adequadamente (Moya et al., 2022). Simulações numéricas, com modelos validados por experimentos, podem solucionar muitas limitações, além de proporcionarem proximidade aos valores reais, viabilizando a confiança nos dados e possibilitando o entendimento das pressões nos silos.

Devido ao elevado investimento necessário para construção, instrumentação e operações, há poucas instalações experimentais de silo em escala real no mundo (Schwab et al., 1994; Brown et al., 2000; Teng et al., 2001; Zhao e Teng, 2004; Teng e Lin, 2005; Härtl et al., 2008; Ramírez et al., 2010; Couto et al., 2012; Jayachandran et al., 2019; Sun et al., 2020; Gandia et al., 2021b). Além disso, o fator escala é de extrema importância para confiança nos dados (Brown e Nielsen, 1998).

Um modelo experimental em escala real de um silo possibilita a obtenção aproximada de valores reais, facilitando a compreensão dos efeitos das pressões nos silos (Gandia et al., 2021a). A estação de teste em escala piloto empregada no presente trabalho foi proposta por Pieper e Schütz em 1980 (Pieper e Schütz, 1980) e amparou as diretrizes da DIN 1055-6: Basis of design and actions on structures – Part 6 (DIN, 2005), possibilitando a obtenção de inúmeras variáveis que influenciam diretamente no comportamento das pressões no silo. O silo piloto foi descrito e validado detalhadamente em duas publicações anteriores (Gandia et al., 2021b e 2021c).

Com a finalidade de avançar o conhecimento científico na área armazenamento de produtos granulares, este trabalho tem por objetivo desenvolver um estudo experimental e numérico das pressões estáticas e dinâmicas devidas ao armazenamento de milho em silos verticais com carregamento e descarregamento concêntricos. Para fins de análise foram consideradas paredes lisas, fundo plano e três relações altura/diâmetro. Realizou-se uma análise bidimensional e axissimétrica baseada no método dos elementos finitos (MEF) desenvolvido com o pacote de software ANSYS. Os resultados obtidos numericamente foram comparados com as pressões normais às paredes do silo obtidas experimentalmente.

2. Material e Métodos

2.1. Propriedades físicas e mecânicas do produto

A confiabilidade dos resultados obtidos pelo método dos elementos finitos é altamente dependente do conhecimento das propriedades físicas e mecânicas dos produtos analisados (Jayachandran e Rao, 2018; Moya et al., 2022).

O material granular utilizado nos ensaios experimentais foi o milho (*Zea mays*), com pureza mínima de 97%. As propriedades físicas deste produto (Tabela 1) foram determinadas experimentalmente na Universidade Federal de Campina Grande, de acordo com os métodos de ensaio propostos pela *British standard* (British Materials Handling Board, 1985; Jenike, 1964).

As propriedades mecânicas adotadas nas simulações numéricas foram baseadas nos ensaios experimentais de Moya et al. (2022). Os valores dos respectivos parâmetros de entrada associados ao produto armazenado são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1

Propriedades do milho usadas na simulação EF.

Parâmetros do produto	Valor	Referência
Peso específico, γ (kN m^{-3})	7.75	---
Módulo de elasticidade do grão, E (kPa)	34.8	Moya et al. (2022)
Efetivo ângulo de atrito interno, ϕ_i ($^\circ$)	38 $^\circ$	---
Atrito com parede lisa, ϕ_w ($^\circ$)	9.95	---
Coefficiente de atrito da parede, μ	0.17	---
Coesão, c (kPa)	0.78	
Coefficiente de Poisson, ν	0.30	Gallego et al. (2015)
Ângulo de dilatância, ψ ($^\circ$)	33.6 $^\circ$	Moya et al. (2022)

3. Testes experimentais

3.1. Descrição da instalação Experimental

A instalação experimental consiste em um silo piloto contendo a instrumentação para medição das pressões e outro silo auxiliar para armazenamento do produto. O produto testado é transferido por meio de um elevador de canecas, de forma a realizar as operações de carregamento e descarregamento automatizadas (Fig. 1).

O silo-piloto é formado por 12 anéis independentes, suspensos de modo estaticamente determinado, cada um com 49.5 cm de altura, separados por uma folga de precisamente 5 mm (restringindo a influência vertical entre os anéis), resultando uma altura total de 6 m. As paredes do silo são de aço inoxidável com 10 mm de espessura. Portanto, as paredes do silo devem ser consideradas rígidas. De acordo com a classificação Eurocode 1, Part 4 (EN 1991-4, 2006), pode-se obter um silo baixo, medianamente esbelto ou esbelto, de acordo com relação altura/diâmetro adotada no momento do teste (pela independência de cada anel).

O diâmetro interno do silo é de 0,691 m. O orifício de descarga possui 0.20 m de diâmetro. Imediatamente abaixo do orifício de descarga do silo-piloto, localiza-se uma caixa de transição, a fim de alimentar o elevador de canecas de forma contínua, permitir o fluxo máximo de descarregamento no silo piloto e neutralizar qualquer influência do transporte pelo elevador de canecas (Fig. 1).

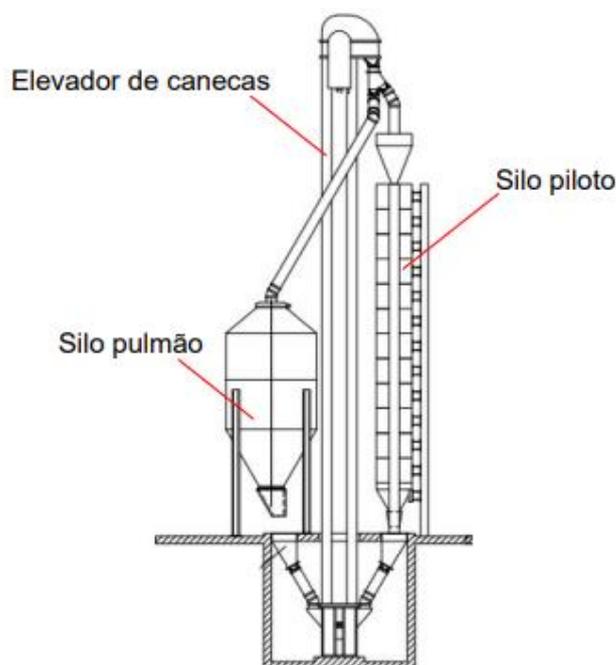


Fig. 1. Configuração da estação experimental.

As pressões normais na parede são mensuradas por células de carga do tipo extensômetros na posição horizontal, unindo a abertura de cada anel calandrado. Em cada anel do silo piloto, pares de células de carga são pré-tracionados por um conjunto de três molas (Fig. 2).

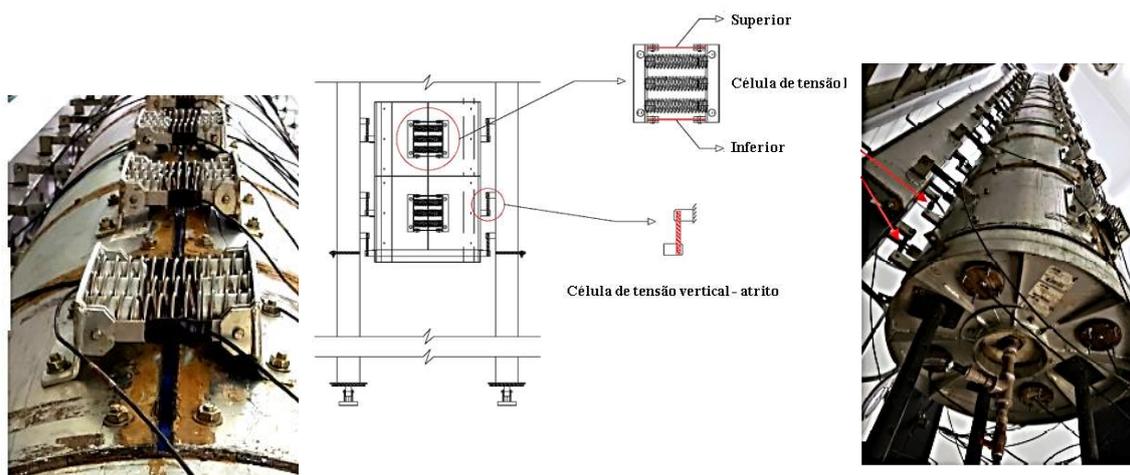


Fig. 2. Sistema de medição das pressões horizontais e de atrito nas paredes, células de carga de 8 kN.

Os anéis são suspensos por braçadeiras/presilhas verticais de medição (células de carga de 8 kN) para determinação da força de atrito nas paredes (Fig. 2). O peso total do silo é medido por outro grupo de células de carga localizadas sob as duas colunas do silo (Fig. 3). Mais informações sobre esta estação experimental são dadas em dois artigos anteriores publicados pela equipa responsável pela calibração e validação da estrutura (Gandia et al., 2021b; Gandia et al., 2021c).

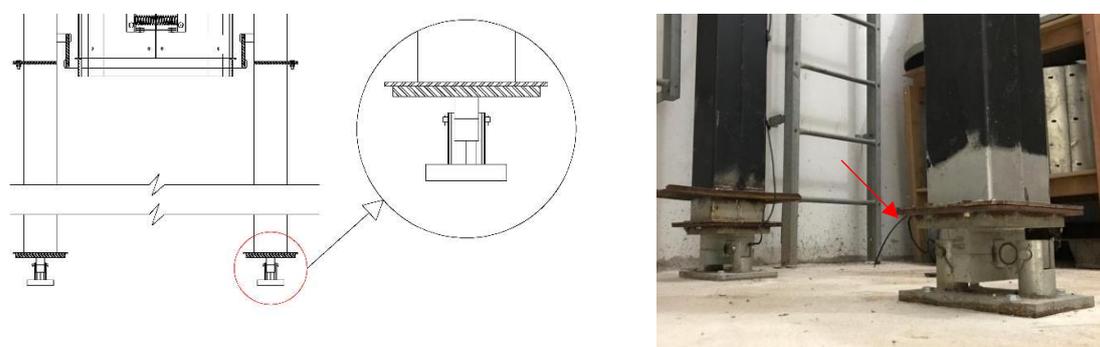


Fig. 3. Células de carga tipo viga, localizado na base de cada pilar do silo, com capacidade de 50 kN para medição da força total mobilizada pelo atrito.

3.2. Descrição dos testes

Os testes experimentais foram conduzidos com as seguintes configurações:

- Três relações H/D, conforme descrito na Tabela 2;
- Fundo plano;
- Tipo de parede do silo piloto: lisa;

- Réplicas em cada configuração (ciclos de carregamento e descarregamento): 5.

Tabela 2

Configuração das relações H/D avaliadas no silo piloto.

Classificação de esbeltez do silo*	Relação H/D*	Altura do silo (m)	Diâmetro interno (m)	Relação H/D experimental	Volume de armazenamento (m ³)
Baixo	$0,4 \leq H/D \leq 1,0$	0,75	0,691	$\cong 1,0$	0,34
Medianamente esbelto	$1,0 < H/D \leq 2,0$	1,500	0,691	$\cong 2,00$	0,64
Esbelto	$H/D > 2,0$	2,00	0,691	$\cong 3,00$	0,83

*Classificação de esbeltez de acordo com a EN 1991-4:2006.

Para cada combinação a ser avaliada no silo piloto, as pressões de carregamento e descarregamento foram distintamente mensuradas. O silo foi carregado até que a massa de grãos atingisse a altura de interesse e, após uma pausa de aproximadamente 10 min (condição estática), o produto foi descarregado. O carregamento foi realizado por meio de um tubo vertical, de modo que os grãos caíssem centralmente por gravidade. O descarregamento também foi concêntrico. O orifício de descarga foi totalmente aberto, produzindo assim um descarregamento de fluxo livre durante os momentos iniciais até que a caixa de transição estivesse cheia (Fig. 4).

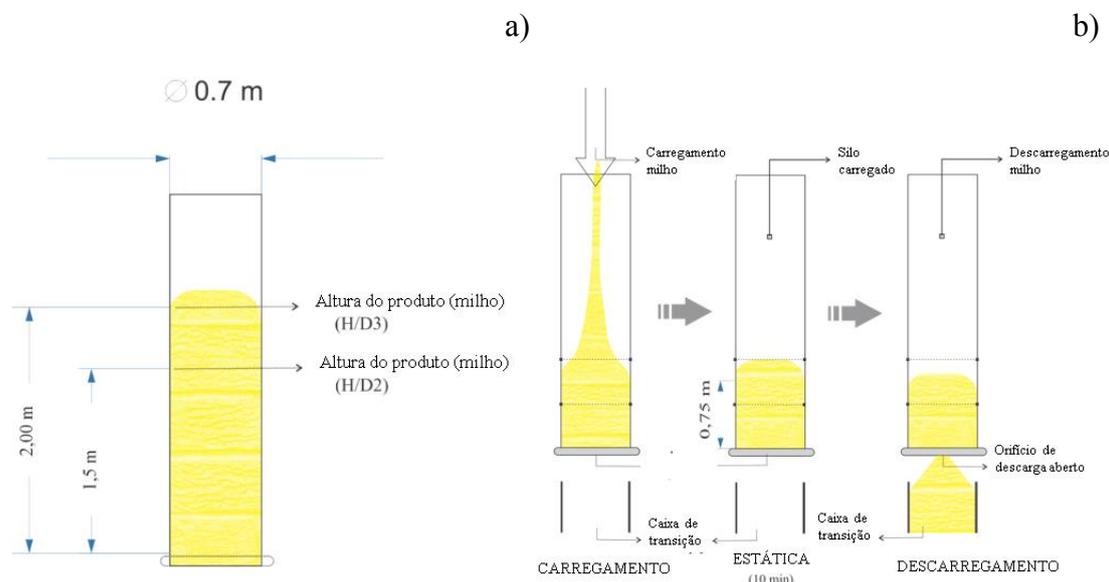


Fig. 4. Descrição do teste. a) Relações de H/D analisadas no silo piloto; b) Fases dos testes: Condições de carregamento, estática e descarregamento.

Os valores das pressões normais ($p_{h(1,12)}$) de parede foram obtidos diretamente da somatória das leituras fornecidas pelas células de carga localizadas em cada anel do silo

piloto, dividindo-se o valor de força obtido pela altura do anel ($h_r = 0.495$ m) e o valor da constante dos anéis ($C_{r(1,12)}$) (Eq. (1)).

$$p_{h(1,12)} = \frac{F_{h(1,12)u} + F_{h(1,12)d}}{h_r \cdot C_{r(1,12)}} \quad (1)$$

A constante de cada anel foi obtida experimentalmente por meio de calibração do silo piloto, sendo apresentados somente os coeficientes dos anéis correspondentes à altura máxima de carregamento empregada nos testes experimentais (2,0 m) (Tabela 3).

Tabela 3

Valores das constantes dos anéis - silo piloto.

Constante de cada anel	Valor da constante obtido experimentalmente
C_{r1}	0.275
C_{r2}	0.288
C_{r3}	0.253
C_{r4}	0.280

4. Análise numérica – Elementos Finitos

4.1. Geometrias dos silos

Para fins de análise, a geometria do silo ensaiado experimentalmente foi modelada em elementos finitos, a fim de se ter um modelo numérico para servir de comparação com os resultados que foram encontrados experimentalmente.

A geometria dos modelos de silos simulados foi construída com as mesmas dimensões do silo piloto (Fig. 5), diâmetro interno do 0,691 m e orifício de descarga de 0,20 m. Foram adotadas três relações H/D: silos cilíndricos de fundo plano, variando somente a altura do produto, e conseqüentemente a esbeltez.

O pacote de software ANSYS (ANSYS, 2015) foi utilizado para desenvolver o modelo numérico 2-D que reproduz com precisão as dimensões e a forma do silo piloto. O silo foi assumido como axissimétrico.

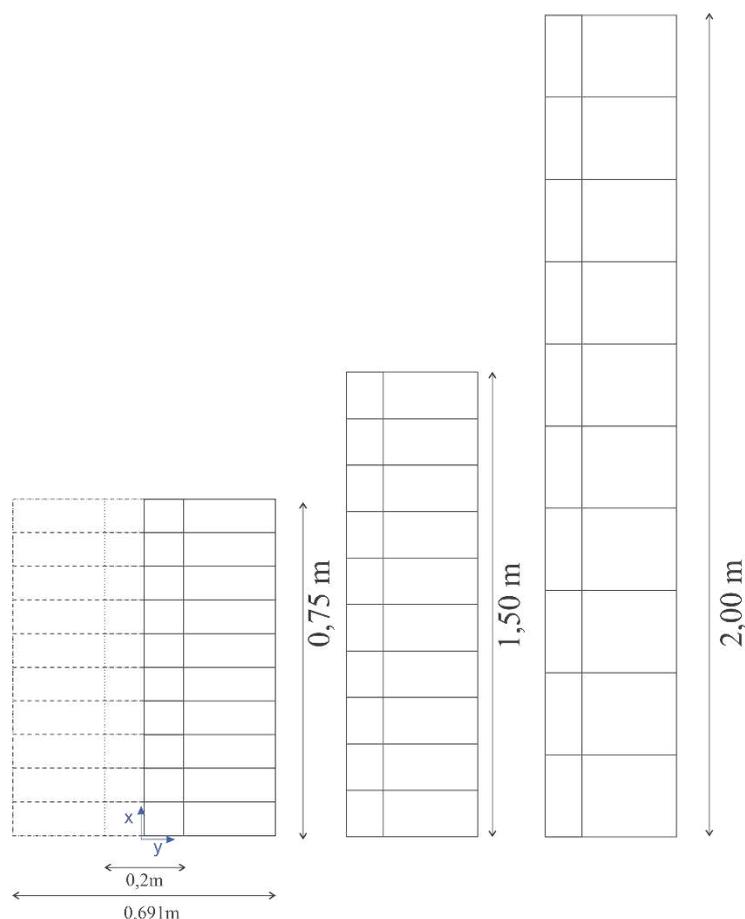


Fig. 5. Relações H/D dos silos no modelo numérico desenvolvido.

4.2. Elementos usados e simulação de contato

O elemento isoparamétrico de quatro nós (PLANE42) foi utilizado para representar o grão nas análises bidimensionais no programa ANSYS. Esse elemento é do tipo Lagrangiano e admite grandes deformações, diferentes modelos de plasticidade, análise do tipo morte (*Death*) e nascimento (*Birth*), além de permitir que sejam adotadas diversas leis de comportamento do produto armazenado, com a inclusão de parâmetros como critério de deslizamento ou ruptura considerando a dilatância do produto e alta capacidade de deformação. Os graus de liberdade para este elemento são apenas translações, nos eixos x e y (Fig. 6). O PLANE42 pode ser usado como um elemento plano (tensões planas ou deformações planas) ou como um elemento axissimétrico.

Para representar a interação entre o produto armazenado e a parede do silo, o algoritmo de contato “Superfície-a-Superfície” (*Surface-to-Surface*) foi usado no ANSYS. Esse método se baseia na definição de duas superfícies: a superfície alvo (*Target Surface*) e a superfície de contato (*Contact Surface*). Uma descrição mais

detalhada da simulação de contato grão-parede em silos pode ser encontrada em Gallego et al. (2010).

A parede é representada pela superfície alvo, pois representa o material mais rígido e a superfície de contato representa o material deformável, ou seja, o produto granular. O elemento TARGET169 foi utilizado para representar a superfície alvo e o elemento CONTACT172 para representar a superfície de contato (Fig. 6).

A superfície alvo de contato com os elementos finitos TARGET169 é discretizada por um conjunto de elementos finitos segmentados que emparelham uns com os outros da outra superfície de contato. O contato ocorre quando o elemento finito CONTACT172 penetra em um dos elementos finitos de contato alvo, TARGET169. Determinando-se qual a superfície alvo do contato e qual a superfície de contato, é possível modelar uma superfície respectivamente deformável e uma rígida.

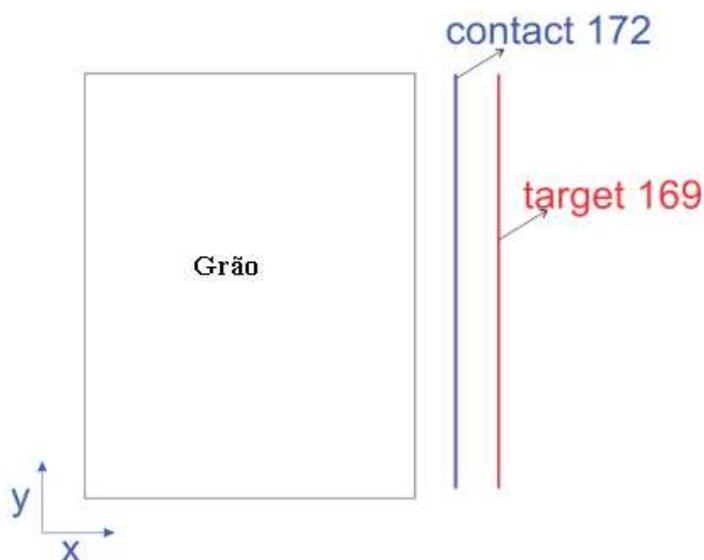


Fig. 6. Simulação do contato produto – parede.

O modelo de Mohr-Coulomb foi usado neste trabalho para simular o atrito. Deste modo, o coeficiente de atrito grão-parede configura o único parâmetro necessário para simular essa interação, uma vez que a aderência entre os grãos de milho e a parede lisa do silo metálico é desprezível.

4.3. Cargas e restrições

A única carga considerada na análise foi o peso próprio do material. Para isso, foi aplicado o efeito da ação da gravidade sobre a massa do produto armazenado. As restrições aplicadas ao modelo numérico foram as seguintes:

- Na condição estática, todos os nós colocados no fundo do silo foram totalmente restringidos, enquanto os nós localizados em $x=0$ tiveram seus deslocamentos restringidos apenas em x para, dessa forma, criar a condição de simetria (Fig. 7);

- Para simulações de descarregamento, as restrições aplicadas aos nós situados no orifício de descarga foram removidas para permitir que durante a análise transiente, ocorresse o fluxo livre do produto granular. No entanto, as restrições aplicadas aos nós da parede no fundo do silo foram mantidas.

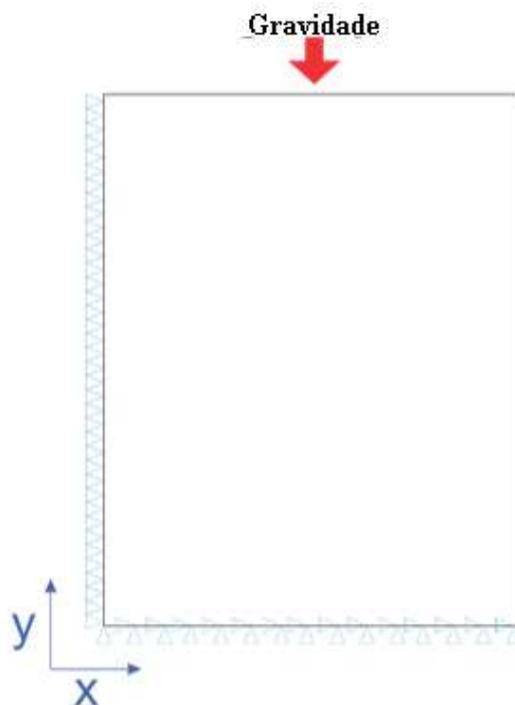


Fig. 7. Cargas e restrições consideradas no modelo numérico.

O procedimento de Newton-Raphson foi aplicado para resolução do conjunto de equações não lineares formuladas para o processo de carregamento, enquanto o método de integração direta e implícita de Newmark foi utilizado para solucionar a análise de descarregamento.

4.4. Modelo de material

Um modelo de material elastoplástico foi utilizado para simular o comportamento do sólido a granel armazenado no interior do silo. O modelo isotrópico-linear comum foi empregado para representar o comportamento elástico do produto na fase estática, enquanto o critério de plasticidade perfeita de Drucker e Prager (1952) foi usado para definir o comportamento do grão na fase plástica (descarga).

Portanto, na fase elástica, apenas dois parâmetros do material são necessários: coeficiente de Poisson do produto (ν), e o módulo de elasticidade (E). O limite de tensões a partir do qual o produto se plastifica é representado pelo critério de plastificação ou ainda superfície de fluência.

Por outro lado, três parâmetros do produto armazenado são necessários para definir a parte plástica do modelo: o ângulo de atrito interno (ϕ_i), a coesão (c) e o ângulo de dilatação (ψ).

5. Resultados e discussão

5.1. Pressões normais sobre a parede do silo – condição estática

A distribuição da pressão normal estática ao longo da altura do silo com relação H/D igual a 1 e fundo plano é apresentada na Figura 8. Os resultados numéricos das pressões estáticas obtidas com o MEF foram comparados com resultados experimentais do silo piloto.

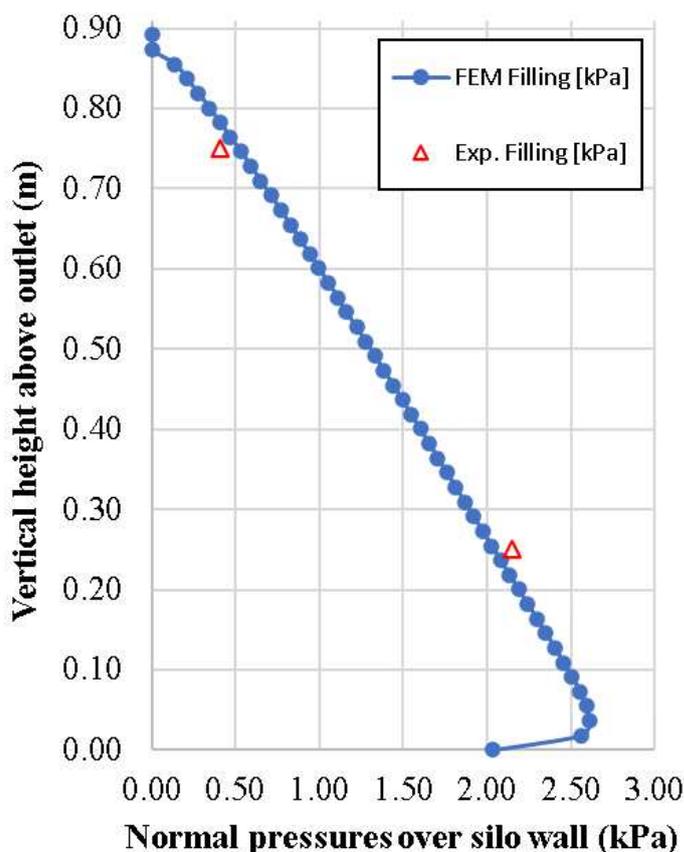


Fig. 8. Comparação das pressões normais estáticas sobre a parede do silo com relação H/D = 1.

Pode-se observar que a curva de distribuição de pressões obtidas pelo MEF (0,53 kPa) é superior na parte mais alta do silo do que a pressão obtida experimentalmente (0,41 kPa) e sofre decréscimo (6%) próximo à base do silo (Fig. 8). Para a mesma altura, obteve-se com o MEF 2,03 kPa e registro do sensor experimental (localizado no anel 1) de 2,15 kPa (Fig. 8). Isto se deve à consideração de base engastada no modelo numérico.

De um modo geral, constatou-se que a tendência da distribuição dos resultados obtidos com o método dos elementos finitos coincide com as médias do trabalho experimental em toda a altura do silo, para a relação H/D igual a 1.

A curva de pressões estáticas obtida pelo MEF (Fig. 8) apresentou distribuição linear ao longo da altura para o silo com relação H/D igual a 1. Esse comportamento foi observado por Ooi e Rotter (1990), Freitas e Calil Júnior (2005), Sun et al. (2018) e Sun et al. (2020) em análises experimentais realizados em silos com baixa relação altura diâmetro. Na fase estática, o comportamento do produto armazenado foi considerado elástico-linear, o qual é descrito pela lei de Hooke (Pardikar et al., 2020). Para essa esbelteza, Gallego et al. (2010) verificou que as pressões de carregamento em silos com fundo plano são insensíveis ao modelo de material utilizado na análise.

Os resultados da distribuição de pressão normal ao longo da altura para o silo com relação H/D igual a 2 para a condição de carregamento são apresentados na Figura 9. Ao comparar os valores das pressões obtidas experimentalmente e por meio dos modelos do MEF, observa-se que para as alturas 0,75 e 1,25 m, respectivamente os valores do MEF são próximos e maiores que os experimentais, configurando um modelo preciso e garantindo a segurança do projeto de forma concomitante.

Em relação ao valor mensurado pelos sensores na altura de 0,25 m, a diferença foi de aproximadamente 4% em relação ao MEF (4,13 kPa vs 4,3 kPa), como pode ser observado na Figura 9. Essas pequenas discrepâncias próximas ao fundo, tornam-se mais pronunciadas em consequência da seção ser considerada como rígida no modelo numérico. Comportamento semelhante foi observado por Hilal et al. (2022) e Hussei e Risan (2022). Portanto, o método numérico aplicado é confiável para previsão das pressões estáticas nessa configuração de silo.

Além disso, para a esbelteza analisada ($H/D = 2$), nota-se que a pressão horizontal de carregamento obtidas pelo MEF (Fig. 9) apresenta uma tendência exponencial, o que pode ser representado pelo modelo de pressões de Janssen (1985) (Madrona e Calil Júnior, 2009; Wang et al., 2014; Gallego et al., 2015; Hilal et al., 2022; Horabik et al., 2022). Desde que sejam considerados os parâmetros apropriados dos produtos

armazenados, os valores das pressões de carregamento do silo são muito próximos dos valores obtidos pela teoria de Janssen (Rotter, 2001).

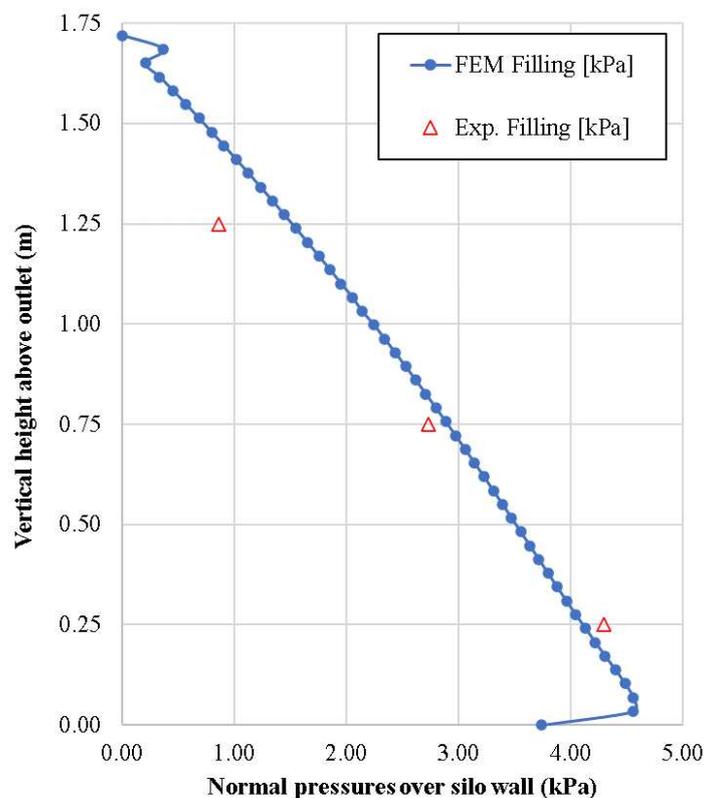


Fig. 9. Comparação das pressões normais estáticas sobre a parede do silo com relação $H/D = 2$.

Madrona e Calil Júnior (2009) verificaram que a curva de pressões obtida pelo MEF foi praticamente coincidente com a curva de pressões para os silos da primeira classe de confiabilidade da EN 1991-4:2006 (configuração similar ao presente trabalho) pelo fato do coeficiente de Poisson e coeficiente de atrito com a parede adotados no modelo numérico serem calculados com base nos valores médios de K e coeficiente de atrito (μ). Sendo assim, excluindo a influência da variabilidade dos valores das propriedades físicas dos produtos, as pressões obtidas por meio do MEF apresentam boa concordância com as previstas pela equação de Janssen, com exceção da base do silo, que foi considerada engastada no modelo numérico enquanto que a teoria de Janssen é baseada na hipótese de cilindro infinito.

Na Figura 10 é apresentada a distribuição de pressão normal estática ao longo da altura para o silo com relação H/D igual a 3. Ao comparar os valores obtidos experimentalmente e por meio dos modelos desenvolvidos no MEF, observa-se que, de

um modo geral, as pressões normais previstas pelo MEF estão muito próximas dos valores experimentais registrados, para o processo de carregamento. A maior diferença percentual entre as alturas analisadas foi de 17%, situada no terceiro anel do silo (correspondente à altura de 1,25 m).

Conforme afirmado por alguns pesquisadores (Gallego, 2006; Sielamowicz et al., 2015) e está contemplado na EN 1991-4:2006, a excentricidade durante o enchimento do silo pode induzir o aparecimento de sobrepressões no paredes do silo. Possivelmente ocorreu uma excentricidade de carregamento devido à altura de queda livre do produto armazenado (6 m), sendo registrada sobrecarga de pressão na altura de 1,25 m (terceiro anel do silo piloto), conforme pode ser observado na Figura 10. Ou seja, o talude formado no final do carregamento atingia a parede do silo em torno de 1,25 m.

Na prática, carregamentos excêntricos são difíceis de evitar, em função de diversos fatores, tais como possíveis excentricidades de entrada, tipo de abertura, altura de queda livre do produto, segregação dos produtos, limitações de operação mecânica, etc. (Cao e Zao, 2018). A ocorrência de pequena excentricidade durante o processo de carregamento, pode levar a um comportamento bastante inesperado da estrutura do silo (Sielamowicz et al., 2015).

Assim como ocorreu para a relação H/D igual a 2 (Fig. 9), para a esbeltez analisada ($H/D=3$), a distribuição das pressões determinadas pelo MEF tende a um comportamento exponencial, semelhante ao comportamento descrito pela teoria de Janssen (1985).

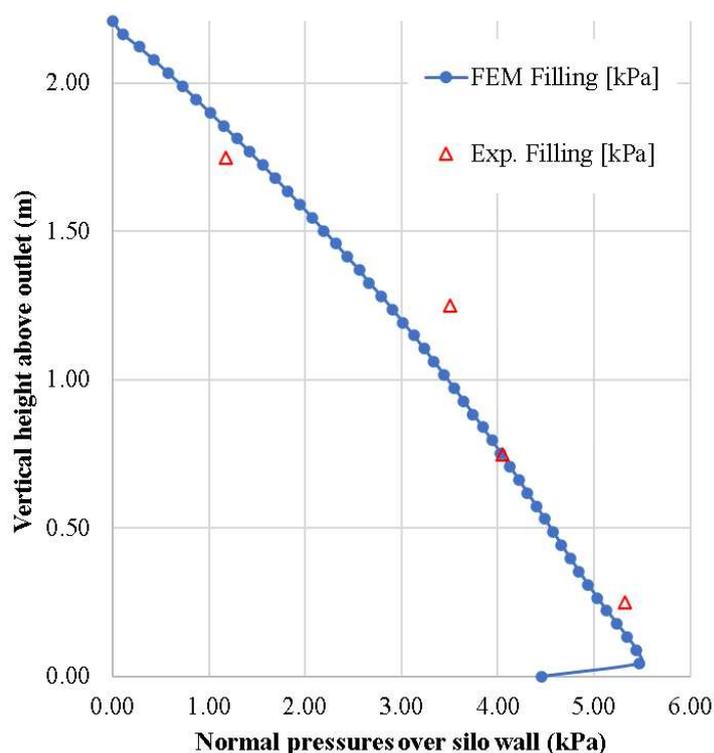


Fig. 10. Comparação das pressões normais estáticas sobre a parede do silo com relação $H/D = 3$.

5.2. Pressões normais sobre a parede do silo – condição dinâmica

Na Figura 11 é apresentada a distribuição de pressão normal ao longo da altura para o silo com relação H/D igual a 1 durante o descarregamento do milho. Os valores das pressões foram obtidos experimentalmente e por meio dos modelos desenvolvidos com o método dos elementos finitos. Na fase dinâmica, observa-se que na altura de 0,25 m (anel 1) a pressão normal obtida com o MEF foi 17,8% inferior a experimental e, na altura de 0,75 m (anel 2) foi 13,6% inferior a experimental.

O maior valor registrado pelo sensor na altura de 0,25 m (Fig. 11) possivelmente corresponde ao pico de pressão ocasionado pelo talude formado no descarregamento dos grãos, ou seja, a camada de grãos na superfície livre superior forma uma estrutura em forma de V (Han et al., 2019), tocando a parede nessa altura correspondente, característica padrão de fluxo funil. Comportamento semelhante foi obtido para as demais relações H/D analisadas no presente trabalho (Fig. 12 e 13).

Para silos com fluxo de funil, um fator que pode ocasionar picos de pressão durante a descarga do produto é o aumento volumétrico da massa de grão que ocorre sobre influência da dilatância do produto.

Comportamento semelhante foi encontrado por Wang et al. (2014). Ao simular pressões de carregamento e descarregamento em silos, os autores constataram que o modelo do MEF produziu excelente acordo com as observações de pressão estática, contudo, não foi capaz de prever um aumento de 15 a 20% no descarregamento. Esse fato levanta questionamentos sobre possíveis alterações em alguns dos parâmetros de entrada com o início da descarga. Uma proposição plausível é que o atrito na parede pode ter alterado do valor estático para o dinâmico (Wang et al., 2014).

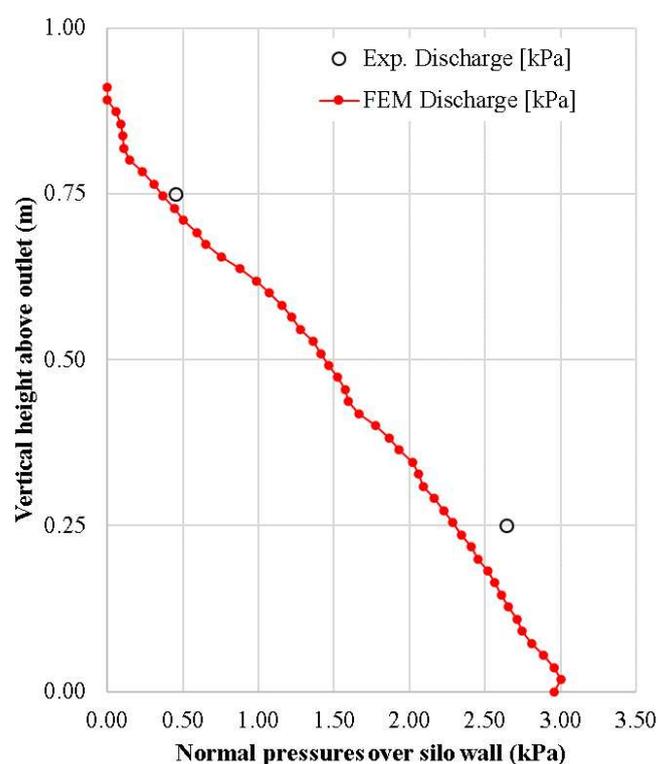


Fig. 11. Comparação das pressões normais dinâmicas sobre a parede do silo com relação $H/D = 1$.

A distribuição de pressão normal dinâmica ao longo da altura para o silo de relação H/D igual 2 é apresentada na Figura 12. Observa-se descontinuidade e picos na curva de pressão normal dinâmica (Fig. 12) obtidas com o MEF. Wójcik e Tejchman (2009) e Gallego et al. (2015) relatam que essas flutuações ao longo da altura são causadas pelas zonas de cisalhamento do produto.

O ângulo de atrito interno do produto (ϕ_i) define a inclinação da superfície de fluência enquanto o ângulo de dilatância (ψ) corresponde ao ângulo formado entre a linha de deslizamento da amostra e a direção real do deslizamento, por isso ele está relacionado com a dilatação volumétrica do produto submetido ao cisalhamento. Vários autores acreditam que esta dilatação volumétrica é um dos fatores que causam o aumento das

pressões na condição de descarga do silo (Madrona e Calil Junior, 2009, Ramirez et al., 2009 e 2010).

Ao comparar os valores de pressão, nota-se que a pressão normal calculada com o MEF foi 25, 10 e 19% inferior a pressão experimental, para as alturas correspondentes aos anéis 1, 2 e 3, respectivamente (Fig. 12).

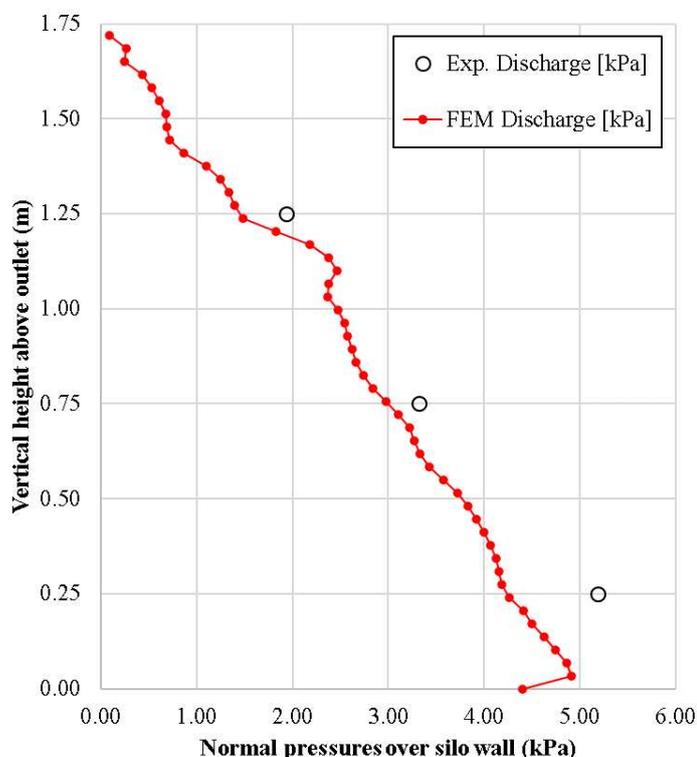


Fig. 12. Comparação das pressões normais dinâmicas sobre a parede do silo com relação $H/D = 2$.

Verifica-se que pressão experimental registrada a altura de 0,25 m é consideravelmente maior (Fig. 12), assim como observado para relação H/D igual a 1, pois em silos de fundo plano, zonas estagnadas inevitavelmente aparecerão nos cantos inferiores (Zhang et al., 2022). Esse registro de sobrepressão deve-se ao contato da zona de produto estagnada durante o descarregamento.

Zhang et al. (2022) identificaram com simulações através do método dos elementos discretos, que para silos planos com fluxo de funil, flutuações de pressões são registradas na posição mais alta, ou seja, no limite superior da parte convergente da zona de fluxo e é caracterizada pelas oscilações mais significativas da força de contato. Assim, os resultados de simulação encontrados pelos pesquisadores, sugerem que não há diferença intrínseca entre as flutuações oscilatórias surgidas durante o fluxo do funil e descargas de fluxo misto.

Na Figura 13 é demonstrado a distribuição de pressão normal ao longo da altura para o silo com relação H/D igual a 3 durante a descarga do produto. Para a esbeltez analisada, foi observado descontinuidade e picos na curva de pressão normal (Fig. 13), assim como foi constatado para o silo com relação H/D igual a 2 (Fig. 12).

Ao comparar os dados experimentais e numéricos, observa-se que a maior discrepância ocorreu na altura 1,25 m (correspondente ao anel 3), com diferença de 48%. Considerando a elevada esbeltez do silo, o fluxo desenvolvido durante o descarregamento foi misto (*plug-flow*), e o ponto onde o fluxo misto toca a parede do silo encontra-se próximo aos sensores do anel 3 (altura de 1,25 m) sendo registrado um pico de pressão nessa altura (Han et al., 2019).

Dessa forma, verifica-se que o pico de pressão que ocorre entre o fluxo de massa e fluxo de funil não foi detectado pelo MEF (Fig. 13). Isso é justificado devido a formulação do elemento finito usado não prever a inversão das tensões principais na zona entre os estados de tensão. O método mais apropriado para realizar essas observações é o método dos elementos discretos. Os autores Sanad et al., (2001) observaram tal comportamento, constatando que o MEF fornece previsão razoável das tensões internas e das pressões que atuam nas paredes do silo. No entanto, apresenta considerável dificuldade na modelagem da descarga do silo, principalmente na modelagem de fenômenos altamente localizados como a formação de zonas de cisalhamento e o escoamento do produto pelo orifício. Em contrapartida, os autores verificaram que o MED apresenta previsão satisfatória de vários fenômenos dinâmicos que ocorrem em silos, como o desenvolvimento de padrões de fluxo, formação de arcos e zonas de cisalhamento.

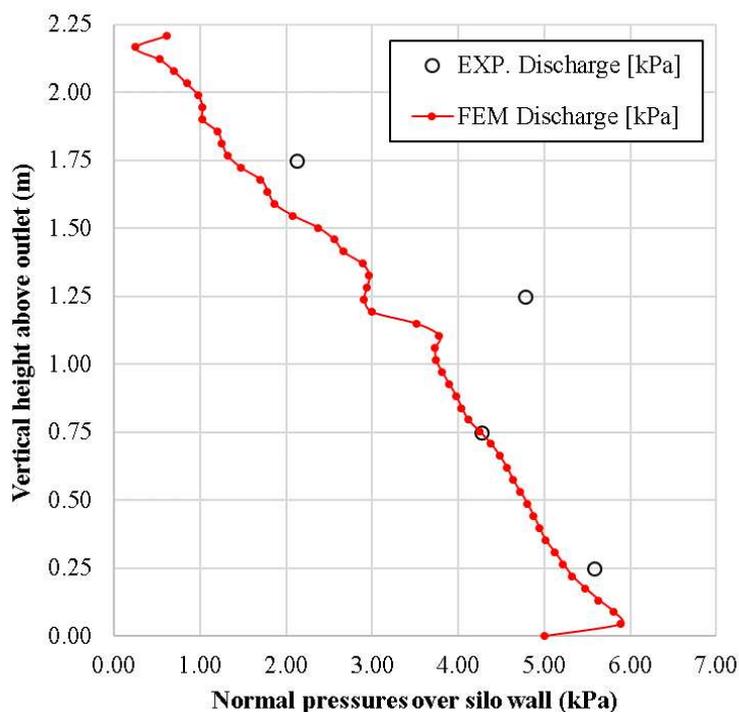


Fig. 13. Comparação das pressões normais dinâmicas sobre a parede do silo com relação $H/D = 3$.

Apesar das pressões normais dinâmicas obtidas pelo MEF serem inferiores as experimentais em todos os pontos analisados (Fig. 13) o comportamento da curva seguiu a mesma tendência dos dados experimentais. Para a parte inferior do silo, os valores experimentais de pressões dinâmicas registrados nos anéis 1 e 2, foram de 5,58 e 4,27 kPa, respectivamente, e os valores obtidos pelo MEF nas alturas correspondentes foram de 5,27 e 4,25 kPa.

Para a parte superior do silo, o valor obtido pelo MEF foi 1,47 kPa, enquanto o valor experimental para a altura equivalente (1,75 m) foi 2,12 kPa. O pico de pressão registrado pelos sensores do anel 3 (altura de 1,5 m) apresentou magnitude de 4,78 kPa, enquanto no MEF, o valor obtido para altura correspondente foi de 2,92 kPa.

Han et al. (2019) afirmam que ainda há uma carência de investigações quantitativas e sistemáticas na literatura para analisar a transição do padrão de fluxo dentro dos silos esbeltos. Pode-se constatar que para as três relações de H/D analisadas, o MEF apresentou curvas de pressões dinâmicas com pico próximo ao fundo (Fig. 11, 12 e 13). Este fato deve-se à descontinuidade do modelo bidimensional axissimétrico neste local, que causa dificuldade para o programa determinar com exatidão a pressão (Madrona e Calil Júnior, 2009).

As flutuações de pressões registradas tanto experimentalmente quanto pelo MEF na condição dinâmica para os silos esbeltos (configurações H/D igual a 2 e 3), podem ser atribuídas à mudança de orientação da principal tensão principal da direção vertical para a direção convergente, o que pode ser uma fonte de problemas de tremores e vibrações observados em alguns silos (Wang et al., 2014).

Wang et al. (2014) verificaram que essas flutuações exibem duas frequências distintas, uma faixa inferior a 1 Hz e outra cerca de 3,5 Hz para o silo estudado (seção cilíndrica com 5 m de altura e diâmetro interno de 0,70 m, paredes de epóxi com espessura de 20 mm). Os autores constaram que as frequências inferiores a 1 Hz parecem ser atribuíveis ao macrodeslizamento intermitente do produto granular contra a parede do silo (*slip-stick*), enquanto as em torno de 3,5 Hz estão associados à propagação das ondas longitudinais no interior da massa granular. Esses macrodeslizamentos e propagação de ondas parecem estar associados a flutuações significativas de pressão na parede.

O mecanismo *stick-slip* baseia-se na observação da formação de zona de cisalhamento nas proximidades da parede do silo e considera que o cisalhamento intenso nesta região é a fonte das intensas flutuações das tensões.

6. Conclusões

- A tendência da distribuição das pressões estáticas pelo modelo dos elementos finitos coincide com a média dos dados experimentais em toda a profundidade do silo, nas três relações de H/D analisadas.

- A curva das pressões dinâmicas do modelo numérico apresenta tendência semelhante aos dados experimentais, em todas as relações H/D analisadas, porém, com magnitudes inferiores.

- O modelo do MEF ajustou-se as pressões experimentais na condição estática, mas, não apresentou o mesmo comportamento na condição dinâmica, subestimando as pressões experimentais ao longo da profundidade.

-

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento da bolsa associada a este projeto. Também agradecem a parceria com a Universidade Federal de Lavras.

Referências

- Ayuga, F., Aguado, P., Gallego, E., Ramirez, A., 2006. Experimental tests to validate numerical models in silos design. 2006 ASABE Annual International Meeting. 0300 (06).
- BMHB - British Materials Handling Board. (1985) Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers. Berkshire: BMHB.
- Brown, C. J., Lahlouh, E. H., Rotter, J. M., 2000. Experiments on a square planform steel silo. *Chemical Engineering Science*. 55 (20), 4399–4413.
- Brown, C. J., Nielsen, J., 1998. In E & FN Spon (Ed.), *Silos: Fundamentals of theory, behaviour and design*.
- Bywalski, C., Kamiński, M., 2019. A case study of the collapse of the over-chamber reinforced concrete ceiling of a meal silo. *Engineering Structures*. 192, 103-112.
- Cao, Q., Zhao, Y., 2017. Buckling design of large steel silos with various slendernesses. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE (Applied Physics & Engineering)*. 18 (4), 282-305. <http://dx.doi.org/10.1631/jzus.A1600369>.
- Cao, Q., Zhao, Y., 2018. Buckling design of large eccentrically filled steel silos. *Powder Technology*. 327, 476-488. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.001>.
- CEN. EN 1991-4:2006. Eurocode 1: Actions on Structures. Part 4: Silos and Tanks. Brussels: [s.n.].
- Chavez Sagarnaga, J., Kulkarni, A. D., 2020. The need for a comprehensive standard/code for the design of bins and silos in the USA. *Structures Congress*, 349–360. DOI 10.1061/9780784482230.034.
- Chen, J. F., Rotter, J. M., Ooi, J. Y., 1999. A review of numerical prediction methods for silo wall pressures. *Advances in Structural Engineering*. 2 (2), 119–135.
- Couto, A., Ruiz, A., & Aguado, P. J., 2012. 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*, 85, 164e173. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.04.009>
- Couto, A., Ruiz, A., Aguado, P.J., 2013. Experimental study of the pressures exerted by wheat stored in slender cylindrical silos, varying the flow rate of material during discharge. *Comparison with Eurocode 1. Part 4. Powder Technol.* 237, 450–467.

- DIN. (2005). Din 1055-6: Basis of design and actions on structures e Part 6: Design 623 loads for buildings and loads in silo bins.
- Drucker, D.C., Prager, W., 1952. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quart. Appl. Math.* 10 (2), 157–165.
- Freitas, E. G. A., Calil Júnior, C., 2005, Estudo teórico e experimental das pressões em silos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano. *Cadernos de Engenharia de Estruturas.* 7(24), 1 - 34.
- Gallego V. E., 2006. Simulación de empujes del material almacenado en silos com modelos de comportamiento del material no elásticos = Numerical simulation of loads exerted by stored materials in silos with non-elastic material models. Thesis (Doctoral), E.T.S.I. Agrónomos (UPM). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.445>.
- Gallego, E., Rombach, G.A., Neumann, F., Ayuga, F., 2010. Simulations of granular flow in silos with different finite element programs: ANSYS vs. SILO. *Trans. ASABE* 53 (3), 819–829.
- Gallego, E., Ruiz, A., Aguado, P.J., 2015. Simulation of silo filling and discharge using ANSYS and comparison with experimental data. *Computers and Electronics in Agriculture.* 118, 281-289, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.014>.
- Gandia, R. M., de Paula, W. C., de Oliveira Junior, E. A., Rodrigo, G. H., Padín, Á. R., Vegas, A. T., Gomes, F. C., Rodríguez, P. J. A., 2022. Effect of the Hopper Angle of a Silo on the Vertical Stress at the Cylinder-to-Hopper Transition. *Agronomy.* 12 (4), 830. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040830>.
- Gandia, R. M., Gomes, F. C., de Paula, W. C., Junior, E. A. O., Rodriguez, P. J. A., 2021b. Static and dynamic pressure measurements of maize grain in silos under diferente conditions. *Biosyst. Eng.* 209, 180–199. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.07.001>.
- Gandia, R. M., Gomes, F. C., de Paula, W. C., Rodriguez, P. J. A., 2021c. Evaluation of pressures in slender silos varying hopper angle and silo slenderness, *Powder Technol.* 394 (2021) 478–495. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.087>.
- Gandia, R. M., Gomes, F. C., Paula, W. C. de, & Aguado, P. J. R., 2021a. Influence of specific weight and wall friction coefficient on normal pressures in silos using the Finite Element Method. *Revista Engenharia Na Agricultura – REVENG.* 29, 192–203. <https://doi.org/10.13083/reveng.v29i1.12336>
- González-Montellano, C., Ramírez, Á., Gallego, E., Ayuga, F., 2011. Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the

- discharge flow in silos. *Chemical Engineering Science*. 66 (21), 5116–5126. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.07.009>.
- Goodey, R. J., Brown, C. J., Rotter, J. M., 2017. Rectangular steel silos: Finite element predictions of filling wall pressures. *Engineering Structures*. 132, 61-69, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.023>.
- Han, Y., Jia, F., Li, G., Liu, H., Li, H., Chen, P., 2019. Numerical analysis of flow pattern transition in a conical silo with ellipsoid particles. *Advanced Powder Technology*. 30 (9), 1870-1881. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.06.004>.
- Hartl, J., Ooi, J. Y., Rotter, J. M., Wojcik, M., Ding, S., & Enstad, G. G., 2008. The influence of a cone-in-cone insert on flow pattern and wall pressure in a full-scale silo. *Chemical Engineering Research and Design*, 86 (4), 370e378. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2007.07.001>
- Hilal, A., Sanad, A. M., Abdelbarr, M. H., Ramadan, O. M. O., Abdalla, H. A., 2022. Three-Dimensional Finite Element Analysis for Pressure on Flexible Wall Silos. *Applied Sciences*. 12 (18), 9251. <https://doi.org/10.3390/app12189251>.
- Holst J. M. F. G., Ooi, J. Y., Rotter, J. M., ; Rong, G. H., 1999. Numerical Modeling of Silo Filling. I: Continuum Analyses. *Journal of Engineering Mechanics*. 125 (1), 94–103. 1999. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1999\)125:1\(94\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1999)125:1(94)).
- Horabik, J., Parafiniuk, P., Molenda, M., 2016. Experiments and discrete element method simulation of distribution of static load of grain bedding at bottom of shallow model silo. *Biosystems Engineering*. 149, 60–71.
- Horabik, J., Parafiniuk, P., Wiącek, J., Kobyłka, R., Molenda, M., Stasiak, M., 2022. DEM modelling of the influence of initial stress state on the discharge rate of spherical particles from a model silo. *Powder Technology*. 403, 117402, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117402>.
- Hussein, A. H., Risan, H. K., 2022. Seismic Analysis of Reinforced Concrete Silos under Far-Field and Near-Fault Earthquakes, *Structural Durability & Health Monitoring*. 16 (3), 213-233. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2022.018293>.
- Janssen HA (1895) Experiments on grain pressures in silos. *Verein Deutscher Ingenieure, Zeitschrift* 39: 1045-1049.
- Jayachandran, E. L., Rao, P. S., 2018. Static and Dynamic Stress Analysis of Flat Bottom Bamboo Reinforced Concrete Silo for Rough Rice Storage. 12th International Working Conference on Stored Product Protection (IWCSPP) in Berlin, Germany, October 7-11. DOI 10.5073/jka.2018.463.084

- Jayachandran, L. E., Nitin, B., Rao, P. S., 2019. Simulation of the stress regime during grain filling in bamboo reinforced concrete silo. *Journal of Stored Products Research*. 83, 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.06.011>.
- Jenike, A. (1964). *Storage and flow of bulk solids* (Vol. 123). University of Utah.
- Madrona, F. S., Calil Junior, C., 2009. Análise das pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*. 11 (49), 37-56, 2009.
- Maleki, S., Mehretehan, A. M., 2019. 3D wind buckling analysis of steel silos with stepped walls. *Thin-Walled Structures* 142, 236-261. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.05.007>.
- Martinez, M. A., Alfaro, I., Doblare, M., 2002. Simulation of axisymmetric discharging in metallic silos. Analysis of the induced pressure distribution and comparison with different standards. *Engineering Structure*. 24 (12), 1561–1574.
- Moya, M., Sánchez, D., Villar-García, J. R., 2022. Values for the Mechanical Properties of Wheat, Maize and Wood Pellets for Use in Silo Load Calculations Involving Numerical Methods. *Agronomy*. 12, 1261. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061261>.
- Ooi, J. Y., Rotter, J. M., 1990. Wall pressure in squat steel silo from simple finite element analysis. *Computers & Structures*. 37 (4), 361–374. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(90\)90026-X](https://doi.org/10.1016/0045-7949(90)90026-X).
- Pardikar, K., Zahid, S., Wassgren, C., 2020. Quantitative comparison of experimental and Mohr-Coulomb finite element method simulation flow characteristics from quasi two dimensional flat-bottomed bins. *Powder Technology*. 367,689-702.
- Pieper, K., Schütz, M., 1980. Bericht über das Forschungsvorhaben Norm-Mess-Silo für Schüttguteigenschaften. *Hochbaustatik*, Technische Universität.
- Ramírez A, Ansourian P, Nielsen J, Rasmussen K, Ayuga F (2009) Analysis of Measurements Obtained by Plate-type Pressure Cells Having a Recess - DEM Simulation. *Bulk Solids & Powder – Science & Technology*, 4(1):34-38.
- Ramírez A, Moya M, Ayuga F (2010b) Determination of the mechanical properties of powdered agricultural products and sugar. *Inter Science* 26:220-230, <https://doi.org/10.1002/ppsc.200800016>.
- Ramírez, A., Nielsen, J., Ayuga, F., 2010. On the use of plate-type normal pressure cells in silos. Part 1: Calibration and evaluation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 71 (1), 71–76.

- Ranjan Debbarma, S., Das, D., Kumar, A., Bouri, D., Banerjee, S., Chatterjee, S., Kumar, R. 2022. Failure Investigation of a Multi-hopper Steel Silo. *J Fail. Anal. And Preven.* 22, 209–221. <https://doi.org/ez52.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11668-022-01333-9>.
- Rotter, J. M., 2001. Pressures, stresses and buckling in metal silos containing eccentrically discharging solids. 60th Birthday Celebration for Univ-Prof Dipl-Ing Dr.techn. Richard Greiner, Oct. 12, Institute for Steel, Timber and Shell Structures, Technical University Graz, Austria.
- Sanad A. M., Ooi, J. Y., Holst, J. M. F. G., Rotter, J. M., 2001. computations of granular flow and pressures in a flat-bottomed silo. *J. Eng. Mech.* 127 (10), 1033-1043. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2001\)127:10\(1033\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:10(1033)).
- Schwab, C. V., Ross, I. J., White, G. M., Colliver, D. G., 1994. Wheat loads and vertical pressure. *Transactions of the ASAE.* 37 (5), 1613-1619. doi: 10.13031/2013.28248 @19941613–1619, 1994.
- Sielamowicz, I., Czech, A., Kowalewski, T. A., 2015. Comparative analysis of empirical descriptions of eccentric flow in silo model by the linear and nonlinear regressions, *Powder Technology.* 270 (Part A), 393-410. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.10.007>.
- Sondej, M., Ratnayake, C., Wójcik, M., 2018. Economical and Safe Method of Granular Material Storage in Silos in Offshore Port Terminals. *Polish Maritime Research,* 25 (3) 62-68. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0097>.
- Sun, S., Zhao, J., Zhang, C., 2018. Calculation of Silo Wall Pressure considering the Intermediate Stress Effect. *Advances in Civil Engineering.* 2018, 1687-8086. <https://doi.org/10.1155/2018/3673515>
- Sun, W., Zhu, J., Zhang, X., Wang, C., Wang, L., Feng, J., 2020. Multi-scale experimental study on filling and discharge of squat silos with aboveground conveying channels, *Journal of Stored Products Research.* 88, 101679. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101679>.
- Teng, J. G., Lin, X., 2005. Fabrication of small models of large cylinders with extensive welding for buckling experiments. *Thin-Walled Structures.* 43 (7), 1091–1114.
- Teng, J. G., Zhao, Y., Lam, L., 2001. Techniques for buckling experiments on steel silo transition junctions. *Thin-Walled Structures.* 39 (8), 685–707.

- Tian, Z., Jiao, D. 2021. Discrete sizing optimization of stepped cylindrical silo using PSO method and implicit dynamic FE analysis. *Engineering with Computers* 37. 1015–1047. <https://doi-org.ez52.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00366-019-00870-6>.
- Trung, N. T., Thang, N. T., Tung, M. 2020. Granular material pressure to reinforced concrete walls of cylindrical slender silos: Analysis and Experimental studies according to Eurocodes. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 869, 052045. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/869/5/052045/pdf>.
- Vidal, P., Gallego, E., Guaita, M., Ayuga, F., 2008. Finite element analysis under different boundary conditions of the filling of cylindrical steel silos having an eccentric hopper. *Journal of Constructional Steel Research.* 64 (4), 480-492, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.08.005>.
- Wang, Y., Lu, Y., Ooi, J. Y., 2014. Finite element modeling of wall pressures in a cylindrical silo with conical hopper using an Arbitrary Lagrangian-Eulerian formulation. *Powder Technology.* 257 (5), 181–190.
- Wang, Y., Lu, Y., Ooi, J. Y., 2015. A numerical study of wall pressure and granular flow in a flat-bottomed silo. *Powder Technology.* 282 (24), 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.02.051>.
- Wójcik, M., Tejchman, J., 2009. Modeling of shear localization during confined granular flow in silos within non-local hypoplasticity. *Powder Technology.* 192 (3), 298-310, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.01.021>.
- Zhang, D, Yang, X, Zhan, J, Liu, X., 2022. Fluctuation of particles during funnel flow discharge from flat-bottomed silos. *AIChE J.* 68 (1), e17414. doi:10.1002/aic.17414.
- Zhao, Q.; Jofriet, J. C., 1992. Structural loads on bunker silo walls: Numerical study. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 51, 1-13.
- Zhao, Y., Teng, J. G., 2004. Buckling experiments on steel silo transition junctions. II: Finite element modeling. *Journal of Constructional Steel Research.* 60 (12), 1803–1823, 2004.