



HELLEN PINTO FERREIRA DECKERS

**ESTUDO TEÓRICO DE PRESSÕES EM SILOS
ESBELTOS PRISMÁTICOS COM DESCARGA
EXCÊNTRICA**

LAVRAS - MG

2014

HELLEN PINTO FERREIRA DECKERS

**ESTUDO TEÓRICO DE PRESSÕES EM SILOS ESBELTOS
PRISMÁTICOS COM DESCARGA EXCÊNTRICA**

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

Orientador

Dr. Francisco Carlos Gomes

LAVRAS - MG

2014

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Deckers, Hellen Pinto Ferreira.

Estudo teórico de pressões em silos esbeltos prismáticos com
descarga excêntrica / Hellen Pinto Ferreira Deckers. – Lavras :
UFLA, 2014.

146 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Francisco Carlos Gomes.

Bibliografia.

1. Descarga excêntrica. 2. Silos esbeltos prismáticos. 3.
Programa computacional. 4. Pressões. 5. Estruturas de
armazenamento. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 531.1

HELLEN PINTO FERREIRA DECKERS

**ESTUDO TEÓRICO DE PRESSÕES EM SILOS ESBELTOS
PRISMÁTICOS COM DESCARGA EXCÊNTRICA**

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

APROVADA em 15 de agosto de 2014.

Dr. Evandro de Castro Melo	UFV
Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro	UFLA
Dr. Tadayuki Yanagi Junior	UFLA
Dr. Ednilton Tavares de Andrade	UFLA

Dr. Francisco Carlos Gomes
Orientador

LAVRAS - MG

2014

*Dedico este trabalho a Deus, a meus pais, ao meu marido Elcimar e aos meus
filhos Murilo e Danilo, pela compreensão e apoio dado
para concluí-lo.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, que por sua presença, luz e força sempre me abençoa e capacita para tudo aquilo que Ele me destina.

Agradeço a presença amorosa, a ajuda e o estímulo de Elcimar. Produzir uma tese tendo ao lado um companheiro deste quilate é um presente. Seu carinho, dedicação à família e sua forma positivista de enfrentar as dificuldades da vida, foram incentivos determinantes para eu chegar até aqui.

A meus filhos Murilo e Danilo. O tempo de nossa convivência “roubado” pela tese só fez fortalecer a vontade de estar junto de vocês.

Aos meus pais, Hitler e Eloiza, que por uma vida de dedicação, amor e trabalho sempre possibilitaram a seus filhos a oportunidade de realizar sonhos e conquistas.

Aos meus irmãos, Hallen e Kellen, exemplos de dignidade, bondade e caráter.

Meu agradecimento ao Francisco Carlos Gomes. Meu professor e orientador no Mestrado e no Doutorado agradeço por sua cumplicidade e responsabilidade direta na construção desta tese. O resultado deste processo criativo é que acabamos construindo uma amizade, que carregaremos para sempre, comprovando que a UFLA é muito mais que uma instituição acadêmica de referência.

Aos professores da banca de qualificação, Dr. André Luiz Zangiacomo, Dr. Alessandro Torres Campos e Dr. Tadayuki Yanagi Junior e aos que estiveram presentes somente na banca de defesa, Dr. Evandro de Castro Melo, Dr. Ednilton Tavares de Andrade e Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro, agradeço as suas preciosas considerações ao presente trabalho e generosas sugestões de aprimoramento.

Minha eterna gratidão a todos os professores, funcionários e amigos do Departamento de Engenharia, em particular, à Mirléia, Gláucia, Fátima, Ronaldo e Coutinho e às colegas Fabiana, Daiane, Francine, Patrícia, Jaqueline e Katiúscia.

À querida amiga Adriana que, mesmo distante, ajudou-me nas preciosas correções, sugestões e incentivo com palavras de carinho nos momentos importantes.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa.

Mais uma etapa foi vencida! Sei que é só o começo....

“Sem sonhos, a vida não tem brilho.
Sem metas, os sonhos não têm alicerces.
Sem prioridades, os sonhos não se tornam reais. Sonhe,
trace metas, estabeleça prioridades e corra riscos para
executar seus sonhos. Melhor é errar por tentar do que
errar por omitir!”

Augusto Cury

RESUMO

Os silos verticais prismáticos têm sido amplamente executados na Europa e Estados Unidos por aliar alta capacidade de armazenagem à reduzida área de ocupação e fácil operação. A interação entre a estrutura do silo e o produto armazenado é de grande interesse científico uma vez que o conhecimento das ações atuantes nestas unidades, ainda, é escasso. O desenvolvimento dos projetos industriais de fábricas de unidades verticais exigem estruturas multicelulares para armazenagem de matéria-prima, adequadas para a produção, dados os diversos tipos de produtos usados no processamento e formulação dos alimentos. Apesar de vários estudos conduzidos sobre o assunto, faltam, ainda, respostas com relação ao comportamento das pressões em silos com descarga excêntrica, assim como o estabelecimento de um procedimento de cálculo satisfatório que considere esse tipo de situação. Objetivou-se estimar as pressões, horizontal e de atrito, em silos esbeltos de seção quadrada, com tremonha excêntrica e fluxo de massa utilizando três produtos com granulometria e forma de escoamento diferenciada. Tomaram-se como base as normas internacionais: AS 3774:1996, DIN 1055-6:2005 e BS EN 1991-4:2006 e as teorias propostas por Safarian (1969) e Walker (1966). O estudo foi realizado em cinco projetos de silos com tremonha de formato tronco-piramidal, considerando as seguintes excentricidades: 25%, 30%, 35% e 43% e um modelo concêntrico para comparação. Para as diferentes geometrias, foi simulado o fluxo de massa para os produtos: milho (granular), milho triturado (pulverulento coesivo) e farelo de soja (pulverulento). As pressões foram calculadas em silos esbeltos prismáticos com descarga excêntrica segundo as normas (AS 3774: 1996, DIN 1055-6: 2005 e BS EN 1991-4: 2006) e teorias de Safarian e de Walker. Foi desenvolvido um programa computacional, em linguagem Delphi, para determinação das pressões. Com base nos resultados, pôde-se concluir que as pressões horizontais e de atrito, em silos esbeltos prismáticos com descarga excêntrica e de fluxo de massa não apresentaram diferenças para as excentricidades estudadas para a mesma norma ou teoria analisada, mas apresentam variações quanto aos tipos de produtos armazenados. Na determinação das pressões recomendam-se adotar os métodos de cálculo dados pelas normas EUROCODE e DIN, atentando-se para as combinações dos valores limites das propriedades físicas, o que resultou em carregamentos máximos e a adoção de pressões adicionais para silos prismáticos.

Palavras-chave: Descarga excêntrica. Silos esbeltos prismáticos. Pressões horizontais e de atrito. Tremonha excêntrica.

ABSTRACT

Prismatic vertical silos have been widely executed in Europe and United States for allaying high storage capacity to reduced occupation area and easy operation. The interaction between the structure of the silo and the stored product is of great scientific interest since the knowledge on the pressures acting over these units is still scarce. The development of industrial projects of vertical unit factories demand multicellular structures for storing raw materials, adequate for production, given the many types of products used in food processing and formulation. Despite many studies having been conducted on the subject, answers regarding the behavior of the pressures in silos with eccentric discharge, as well as the establishment of a satisfactory calculus procedure considering this type of situation, are lacking. The objective was to estimate the pressures, horizontal and friction, in prismatic slender silos, with square section, eccentric hopper and mass flow using three products with differentiated gradation and outflow. The international norms taken as basis were: AS 3774:1996, DIN 1055-6:2005 and BS EN 1991-4:2006 and the theories proposed by Safarian (1969) and Walker (1966). The study was conducted in five silo projects with truncated pyramid form hopper considering the following eccentricities: 25%, 30%, 35% and 43%, as well as a concentric model for comparison. For the different gradations, the mass flow was simulated for the products: maize (granular), ground maize (cohesive powder) and soybean meal (powder). The pressures were calculated in slender prismatic silos with eccentric discharge according to the norms (AS 3774:1996, DIN 1055-6:2005 and BS EN 1991-4:2006) and the theories proposed by Safarian and Walker. A computer program was developed in Delphi language for determining the pressures. Based on the results, it may be concluded that, the horizontal and friction pressures in prismatic slender silos with eccentric discharge and mass flow did not present difference for the studied eccentricities for the same norm or theory analyzed, but presented variations regarding the types of product stored. In the determination of the pressures, it is recommended to adopt the data calculation methods by the EUROCODE and DIN norms, paying attention to the combinations of the limit values of the physical properties, which resulted in maximum loadings and the adoption of additional pressures for prismatic silos.

Key-words: Eccentric discharge. Prismatic slender silos. Horizontal pressure and friction. Eccentric hopper.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Série histórica da capacidade estática de armazenamento e de produção agrícola no Brasil.	27
Figura 2 Fluxograma da fábrica de ração extrusada.....	30
Figura 3 Tipos de fluxo em silos com descarga concêntrica: (a) Fluxo de massa, (b) Tubo interno paralelo, (c) Tubo interno cônico e (d) Fluxo misto	31
Figura 4 Tipos de fluxo em silos com descarga excêntrica: (a) Fluxo de massa, (b) Tubo paralelo, (c) Tubo inclinado, (d) Misto completamente excêntrico e (e) Misto parcialmente excêntrico	32
Figura 5 Variação geométrica dos silos e sua influência no fluxo.....	33
Figura 6 Determinação gráfica do tipo de fluxo	34
Figura 7 Determinação gráfica do tipo de fluxo	35
Figura 8 Tipos de obstruções: (a) em arco e (b) em tubo	37
Figura 9 Notação dos parâmetros geométricos de um silo e das pressões	40
Figura 10 Pressões nas paredes do silo para um ciclo de operação de carga, armazenamento e descarga.	41
Figura 11 Camada elementar adotada por Janssen.....	43
Figura 12 Equilíbrio estático de uma fatia elementar de uma tremonha	46
Figura 13 Mudança de pressão em razão da descarga excêntrica em silo retangular	50
Figura 14 Variação da pressão horizontal dinâmica com a profundidade proposta por Safarian (1969)	54
Figura 15 Pressão estática simétrica no corpo do silo.....	58
Figura 16 Silos não circulares: elevação lateral e vista da distribuição da pressão adicional	60
Figura 17 Distribuição de pressões nas tremonhas pelo método alternativo	65

Figura 18 Painéis utilizados em silos metálicos prismáticos industriais	73
Figura 19 Silo prismático com reforços verticais e horizontais.....	76
Figura 20 Silo retangular de cantos arredondados	76
Figura 21 Deformação no silo prismático, de seção quadrada: (a) silo sem reforço e (b) silo com reforço	77
Figura 22 Tensões principais máximas em silo quadrado com e sem reforço (vertical e horizontal)	78
Figura 23 Desenho esquemático e dimensões, em metros, do silo com tremonha concêntrica. Unidade: metros.	85
Figura 24 Desenho esquemático e dimensões, em metros, dos silos com tremonha excêntrica: (a) 25% de excentricidade e (b) 30% de excentricidade. Unidade: metros.	88
Figura 25 Desenho esquemático e dimensões, em metros, dos silos com tremonha excêntrica: (a) 35% de excentricidade e (b) 43% de excentricidade. Unidade: metros.	89
Figura 26 Fluxograma do programa computacional	96
Figura 27 Pressão horizontal estática (ou carregamento) no silo com tremonha concêntrica para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja.....	102
Figura 28 Pressão horizontal estática (ou carregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 25\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja.....	103
Figura 29 Pressão horizontal estática (ou carregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 30\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja.....	104
Figura 30 Pressão horizontal estática (ou carregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 35\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja.....	105

Figura 31 Pressão horizontal estática (ou carregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_o/a = 43\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja.....	106
Figura 32 Pressão horizontal dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha concêntrica para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja.....	115
Figura 33 Pressão horizontal dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_o/a = 25\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja.....	116
Figura 34 Pressão horizontal dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_o/a = 30\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja.....	117
Figura 35 Pressão horizontal dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_o/a = 35\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja.....	118
Figura 36 Pressão horizontal dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_o/a = 43\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja.....	119
Figura 37 Pressão de atrito dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha concêntrica para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja.....	124
Figura 38 Pressão de atrito dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_o/a = 25\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja.....	125
Figura 39 Pressão de atrito dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_o/a = 30\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja.....	126

Figura 40 Pressão de atrito dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_o/a = 35\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja.....	127
Figura 41 Pressão de atrito dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_o/a = 43\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja.....	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Principais vantagens e desvantagens dos fluxos de massa e funil	36
Tabela 2 Classificação quanto à granulometria dos produtos armazenados.....	38
Tabela 3 Emprego do limite inferior e superior das propriedades físicas dos produtos	39
Tabela 4 Fatores que afetam as pressões nas paredes dos silos	42
Tabela 5 Coeficientes de sobrepressão (C_d)	53
Tabela 6 Classificação dos silos segundo a relação H/d_c	55
Tabela 7 Parâmetro K	56
Tabela 8 Classificação dos silos em classes de confiabilidade.....	57
Tabela 9 Disposições construtivas dos silos multicelulares prismáticos.....	74
Tabela 10 Propriedades física dos produtos	81
Tabela 11 Dimensões do silo com tremonha concêntrica	84
Tabela 12. Dimensões do silo com 25% de excentricidade na tremonha.....	86
Tabela 13 Dimensões do silo com 30% de excentricidade na tremonha.....	86
Tabela 14 Dimensões do silo com 35% de excentricidade na tremonha.....	87
Tabela 15 Dimensões do silo com 43% de excentricidade na tremonha.....	87
Tabela 16 Pressões estáticas (ou carregamento).....	91
Tabela 17 Pressões dinâmicas (ou descarregamento)	92
Tabela 18 Pressões sobre a parede da tremonha.....	94
Tabela 19 Diferenças (%) das pressões horizontais estáticas médias entre os produtos analisados para o corpo do silo e a tremonha	97
Tabela 20 Diferenças (%) das pressões horizontais estáticas médias entre as normas, com saída concêntrica e excêntrica, para os produtos analisados.....	99
Tabela 21 Diferenças (%) das pressões horizontais estáticas na transição da tremonha: teoria de Walker (1966) <i>versus</i> EUROCODE/DIN	100

Tabela 22	Diferenças (%) das pressões horizontais dinâmicas médias entre os produtos analisados para o corpo do silo e a tremonha	107
Tabela 23	Diferenças (%) das pressões horizontais dinâmicas médias entre as normas, com saída concêntrica e excêntrica, para os produtos analisados.....	109
Tabela 24	Coefficiente de sobrepressão para pressões horizontais (C_h) e parâmetro K	111
Tabela 25	Diferenças (%) das pressões horizontais dinâmicas na transição da tremonha: EUROCODE/DIN <i>versus</i> AS e teoria de Walker (1966)	113
Tabela 26	Coefficiente de sobrepressão para pressão de atrito no corpo do silo	121
Tabela 27	Diferenças (%) das pressões de atrito dinâmicas médias entre as normas, com saída concêntrica e excêntrica, para os produtos analisados.....	123

LISTA DE SIGLAS

ACI	American Concrete Institute
AS	Australian Standart
BMHB	British Materials Handling Board
CNUA	Cadastro Nacional de Unidades Armazenadoras
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DIN	Deutsches Institut fur Normung
EUROCODE	European Committee for Standardization

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal de uma fatia elementar no interior de uma tremonha	[L ²]
a	Largura da parede da célula do silo	[L]
ae	Largura imaginária	[L]
b	Largura da parede da célula do silo	[L]
b _f	Largura da boca de saída	[L]
C	Relação entre o número de paredes e o número de células	[1]
C _b	Coefficiente de sobrepressão para tremonha	[1]
C _c	Coefficiente de geometria do produto	[1]
C _d	Coefficiente de sobrepressão	[1]
C _h	Coefficiente de sobrepressão para pressões horizontais	[1]
C _w	Coefficiente de sobrepressão para pressões de atrito	[1]
C _{op}	Coefficiente do produto armazenado	[1]
C _{pd}	Coefficiente de pressão adicional dinâmica	[1]
C _{pe}	Coefficiente de pressão adicional estática	[1]
d _c	Diâmetro inscrito	[L]
D	Diâmetro da célula	[L]
D _p	Diâmetro da partícula	[L]
e	Base de logaritmo neperiano	[1]
e	Maior valor entre e _f e e _o	[L]
e _o	Excentricidade da boca de descarga	[L]
e _f	Excentricidade máxima de enchimento no topo da superfície	[L]
e _t	Excentricidade de enchimento no topo da superfície	[L]
E	Relação entre a excentricidade do canal de fluxo (e) e o diâmetro inscrito (d _c)	[1]
ε ₂	Ângulo variável	[1]

F_d	Relação da pressão normal e vertical na tremonha	[1]
ff	Fluidez	[1]
g	Aceleração da gravidade (9,81 m s ⁻¹)	[LT ⁻¹]
H	Altura efetiva do silo (da boca de saída à superfície equivalente)	[L]
H_1	Trecho superior do corpo do silo com uma altura de $\frac{1}{3}H$	[L]
h_o	Altura equivalente do repouso	[L]
h_c	Altura do corpo do silo	[L]
h_{eft}	Altura da transição efetiva	[L]
h_h	Altura da tremonha, do seu eixo até transição	[L]
h_t	Altura da tremonha	[L]
h_{tp}	Altura do repouso do produto armazenado	[L]
j	Expoente da tremonha	[1]
K	Relação entre a pressão horizontal e vertical	[1]
K_n	Relação entre a pressão normal e vertical na tremonha	[1]
K_w	Expoente da tremonha	[1]
l_h	Comprimento da parede da tremonha	[L]
m	Parâmetro que depende da forma da seção da tremonha	[1]
p_e	Pressão incremental em razão da excentricidade	[FL ⁻²]
p_i	Pressão horizontal imaginária	[FL ⁻²]
P_h	Pressão horizontal	[FL ⁻²]
P_{hd}	Pressão horizontal dinâmica	[FL ⁻²]
P_{he}	Pressão horizontal estática	[FL ⁻²]
P_{het}	Pressão horizontal, atuando na transição após o enchimento	[FL ⁻²]
P_n	Pressão normal à parede da tremonha	[FL ⁻²]
P_{nd}	Pressão normal dinâmica à parede da tremonha	[FL ⁻²]
P_{ne}	Pressão normal estática à parede da tremonha	[FL ⁻²]
P_{n1}	Pressão na tremonha em virtude da pressão vertical causada	[FL ⁻²]

	pele 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	$[FL^{-2}]$
P_{n3}	Pressão na tremonha em razão do peso do produto na mesma	$[FL^{-2}]$
P_{pd}	Pressão adicional dinâmica	$[FL^{-2}]$
$P_{pd,nc}$	Pressão adicional dinâmica para silos não circulares	$[FL^{-2}]$
P_{pe}	Pressão adicional estática	$[FL^{-2}]$
$P_{pe,nc}$	Pressão adicional estática para silos não circulares	$[FL^{-2}]$
P_s	Pressão aplicada na transição em silos com fluxo de massa	$[FL^{-2}]$
P_t	Pressão de atrito vertical, por unidade de perímetro da tremonha	$[FL^{-1}]$
P_{td}	Pressão de atrito vertical dinâmica, por unidade de perímetro da tremonha	$[FL^{-1}]$
P_{te}	Pressão de atrito vertical estática, por unidade de perímetro da tremonha	$[FL^{-1}]$
P_v	Pressão vertical	$[FL^{-2}]$
P_{ve}	Pressão vertical estática	$[FL^{-2}]$
P_{vet}	Pressão vertical, atuando na transição após o enchimento	$[FL^{-2}]$
P_{vn}	Pressão vertical dinâmica na tremonha	$[FL^{-2}]$
P_w	Pressão de atrito vertical	$[FL^{-1}]$
P_{wd}	Pressão de atrito vertical dinâmica	$[FL^{-1}]$
P_{we}	Pressão de atrito vertical estática	$[FL^{-1}]$
r	Raio da seção transversal do silo	$[L]$
r_o	Raio da boca de saída	$[L]$
R	Raio hidráulico da célula	$[L]$
S	Altura da zona afetada pelo carregamento	$[L]$
t	Espessura da parede do silo	$[L]$
x	Comprimento entre 0 e l_h	$[L]$

z	Ordenada com base na superfície equivalente	[L]
z'	Ordenada com base no vértice da tremonha	[L]
η	Ângulo variável	[1]
α	Ângulo da tremonha com a horizontal	[1]
β	Ângulo da tremonha com a vertical	[1]
β_{crit}	Ângulo crítico da tremonha com a vertical	[1]
γ	Peso específico do produto armazenado	[FL ⁻³]
γ_i	Peso específico do produto armazenado inferior	[FL ⁻³]
γ_s	Peso específico do produto armazenado superior	[FL ⁻³]
μ	Coefficiente de atrito do produto com a parede	[1]
μ_h	Coefficiente de atrito do produto com a parede da tremonha	[1]
ϕ_e	Efetivo ângulo de atrito interno	[1]
ϕ_{ei}	Efetivo ângulo de atrito interno inferior	[1]
ϕ_{es}	Efetivo ângulo de atrito interno superior	[1]
ϕ_i	Ângulo de atrito interno	[1]
ϕ_{ii}	Ângulo de atrito interno inferior	[1]
ϕ_{is}	Ângulo de atrito interno superior	[1]
ϕ_r	Ângulo de repouso	[1]
ϕ_{ri}	Ângulo de repouso inferior	[1]
ϕ_{rs}	Ângulo de repouso superior	[1]
ϕ_w	Ângulo de atrito do produto com a parede	[1]
ϕ_{wi}	Ângulo de atrito do produto com a parede inferior	[1]
ϕ_{ws}	Ângulo de atrito do produto com a parede superior	[1]
π	3,1415927 (pi)	[1]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	REFERENCIAL TEÓRICO	26
2.1	Situação da armazenagem no Brasil.....	26
2.2	Silos industriais no Brasil	28
2.3	Fluxo dos produtos armazenados	30
2.3.1	Principais vantagens e desvantagens dos fluxos	35
2.3.2	Problemas em fluxo.....	36
2.4	Pressões em silos verticais.....	38
2.4.1	Teoria de Janssen (1895)	42
2.4.2	Teoria de Walker (1966) para tremonhas	45
2.4.3	Método de Safarian para silos retangulares com saída excêntrica ...	49
2.5	Normas internacionais	54
2.5.1	Parâmetro K.....	55
2.5.2	Normas europeias: BS EN 1991-4:2006 e DIN 1005-6:2005.....	56
2.5.3	Norma australiana AS 3774:1996	67
2.6	Silos multicelulares metálicos.....	71
2.6.1	Introdução.....	71
2.6.2	Sistema construtivo	71
2.6.3	Sistema estrutural dos silos prismáticos	75
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	79
3.1	Determinação da geometria do silo	79
3.1.1	Caracterização do produto	79
3.1.2	Geometria do silo	82
3.2	Cálculo das pressões.....	89
3.2.1	Pressão no corpo do silo	90
3.2.2	Pressão na tremonha.....	93

3.3	Desenvolvimento do programa computacional.....	95
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
4.1	Pressão horizontal estática no silo.....	97
4.2	Pressão horizontal dinâmica no silo	107
4.3	Pressão de atrito vertical dinâmica no silo.....	120
5	CONCLUSÃO	129
	REFERÊNCIAS.....	130
	APÊNDICE.....	137

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a necessidade de ampliação da rede armazenadora de grãos, torna-se cada vez maior. Dados do levantamento da safra, elaborado pela Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2014), com produção brasileira de grãos estimada de 193,47 milhões de toneladas na safra 2013/2014, representa um acréscimo de 2,6% sobre a colheita anterior (188,66 milhões de toneladas). A estimativa indica um crescimento de 3,29 milhões de hectares na área plantada em relação ao período anterior, totalizando 56,85 milhões de hectares.

Com a produção de grãos aumentando a cada ano, projetos e construções de novos silos fazem-se necessários para o armazenamento de produtos agrícolas e industriais. Um dos setores que tem crescido nos últimos anos é o da produção de alimentos processados tanto para o consumo humano quanto para o animal, como as rações.

No processamento de cimentos, rações, produtos farmacêuticos e, também, na área de mineração faz-se necessário o uso de estruturas de armazenamentos industriais verticais. Com o desenvolvimento dos projetos, as fábricas verticais exigem estruturas multicelulares, para armazenagem de matéria-prima, adequadas para a produção, considerando as propriedades físicas dos produtos. Dentre os tipos de seções prismáticas temos a quadrada, retangular e poligonal e sua escolha depende da avaliação das ações nas estruturas.

Segundo Brown e Nielsen (1998), o projeto e comportamento de silos retangulares e quadrados são muito diferentes dos silos cilíndricos. Grandezas como pressões e deslocamentos, sua interação e importância no comportamento de silos prismáticos, ainda, são pouco compreendidas. De acordo com Calil Júnior, Nascimento e Araújo (1997), silos prismáticos de parede conformadas são mais econômicas em razão da rigidez das chapas. No estudo pioneiro de

Ravenet (1992), foram executados projetos com duas conformações de parede: a trapezoidal e a zigue-zague, que são utilizadas ainda hoje nas indústrias. Desde o final do século XIX, várias teorias têm sido desenvolvidas para avaliar as pressões exercidas sobre as paredes dos silos. No entanto, muitos parâmetros de cálculo, ainda, não foram corretamente determinados quando se trata de pressões relacionadas com as descargas excêntricas, o que conduz a falhas neste tipo de estrutura. Uma das principais causas para a falha em silos de grãos são as pressões excessivas exercidas na parede do silo durante a descarga.

A descarga excêntrica permite a otimização do uso de transportadores e facilita o acesso de caminhões e trens no descarregamento dos produtos. A desvantagem é que, nesta situação, surgem pressões não uniformes, ao longo do perímetro do silo, consideradas a maior causa de colapsos (MOLENDÁ et al., 2001).

A interação entre o silo e o produto armazenado é de grande interesse científico uma vez que o conhecimento sobre as cargas atuantes em sua estrutura e seus efeitos nas condições estáticas e dinâmicas, ainda, é escasso para silos prismáticos. Apesar de experimentos já terem sido conduzidos sobre o assunto, faltam, ainda, respostas com relação ao comportamento das pressões em silos prismáticos com descarga excêntrica, assim como o estabelecimento de um procedimento de cálculo satisfatório que considere esse tipo de situação.

Este trabalho foi realizado com o objetivo de estimar as pressões, horizontal e de atrito, em silos esbeltos prismáticos, de seção quadrada, com tremonha excêntrica e fluxo de massa para três produtos com granulometria e forma de escoamento diferenciada, tomando como base as normas internacionais: AS 3774:1996, DIN 1055-6:2005 e BS EN 1991-4:2006 (AUSTRALIAN STANDARD - AS, 1996; DEUTSCHE NORM - DIN, 2005; BRITISH STANDARD EUROCODE - BS EN, 2006) e as teorias propostas por Safarian (1969) e Walker (1966).

No presente estudo permitiu-se dar subsídio à elaboração de uma norma brasileira que considera o estudo das pressões em silos esbeltos prismáticos com descarga excêntrica. Para tal foi avaliada a relação da geometria do silo quanto à excentricidade e a influência dos produtos no cálculo das pressões horizontais e de atrito; o coeficiente de sobrepressão entre as normas estudadas; o comportamento das pressões com base na teoria de Safarian; o comportamento das pressões horizontais e de atrito na tremonha; o estabelecimento de parâmetros de decisão em relação às normas quanto à aplicabilidade em silos prismáticos esbeltos e a elaboração de programa para a sistematização das rotinas de cálculo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Situação da armazenagem no Brasil

A característica sazonal da atividade agrícola traz consigo a necessidade do armazenamento da produção. A armazenagem dos produtos agrícolas permite a distribuição do escoamento, ao longo do tempo, adequando as condições de oferta às variações de demanda e, conseqüentemente, amenizando flutuações nos preços de mercado.

A armazenagem pode ser analisada por diferentes fatores, dependendo da configuração da cadeia produtiva. Existem produtores rurais, com volume de produção elevado, que possuem unidades armazenadoras próprias no estabelecimento agropecuário. O produtor rural pode, também, utilizar uma unidade armazenadora pertencente a uma empresa que presta serviços de armazenagem. Existem, ainda, as unidades armazenadoras estatais que são disponibilizadas para utilização de terceiros e estão sob a gestão da CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento).

A atividade de armazenagem é definida pelo Decreto nº 3.855, de 3 de julho de 2001, como “o exercício da guarda e conservação de produtos agropecuários, seus derivados, subprodutos e resíduos de valor econômico, próprios ou de terceiros, por pessoas jurídicas de direito público ou privado, em estruturas apropriadas para esse fim” (BRASIL, 2001). O mesmo Decreto tornou obrigatório que pessoas jurídicas que realizam atividade de armazenagem forneçam informações para o Cadastro Nacional de Unidades Armazenadoras (CNUA), atualmente administrado pela CONAB.

Na Figura 1, é apresentada a série histórica da capacidade estática de armazenamento e de produção agrícola para o Brasil, abrangendo os anos de 2000 a 2013. Nesse período, a produção agrícola cresceu acentuadamente,

passando de 87,4 milhões de toneladas em 2000 para 188,66 milhões de toneladas em 2013. Impulsionada pela expansão da produção agrícola, a capacidade estática de armazenamento, também, cresceu, embora em menor intensidade. A capacidade estática aumentou de 87,0 milhões de toneladas em 2000 para 145,65 milhões de toneladas em 2013. Ao longo de todo o período, a produção agrícola manteve-se maior que a capacidade estática.

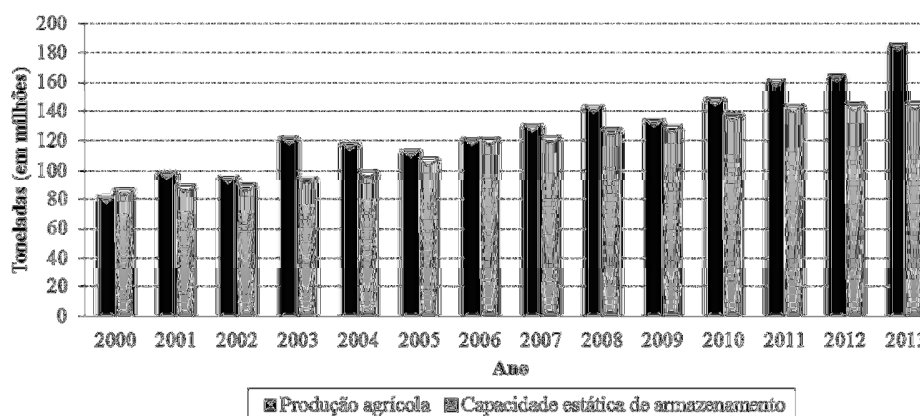


Figura 1 Série histórica da capacidade estática de armazenamento e de produção agrícola no Brasil.

Fonte: CONAB (2014)

Se a expansão da capacidade estática de armazenamento se deu de maneira gradual no período analisado, a produção agrícola apresentou um padrão de crescimento mais inconstante. Entre 2000 e 2009, os anos em que ocorreram fortes incrementos na produção agrícola foram sucedidos por anos de baixo crescimento ou mesmo de redução na produção agrícola.

Tal situação parece ter se modificado a partir de 2010. Por um lado, a produção agrícola passou a apresentar uma trajetória de crescimento mais forte e contínua, registrando expansões significativas em 2010 e 2011. Apesar do aumento da produção agrícola ter sido grande em 2013, a previsão para 2014 é

de expressiva elevação, com a produção agrícola alcançando 193,47 milhões de toneladas. Por outro lado, a capacidade estática de armazenamento praticamente não cresceu em 2013. A consequência dessas dinâmicas foi o progressivo aumento da diferença entre produção agrícola e capacidade estática de armazenamento. Em 2013, essa diferença atingiu 43,01 milhões de toneladas, a maior desde 2000.

O crescimento da diferença entre produção agrícola e capacidade estática de armazenamento, conforme apresentado na Figura 1, é um indício de que, atualmente, a rede de armazenagem é insuficiente.

2.2 Silos industriais no Brasil

Nos processos industriais, principalmente nas áreas de mineração e agroindústria, os silos têm um papel de fundamental importância na armazenagem e manipulação dos processos de produção (ARAÚJO; CALIL JÚNIOR, 2002).

Considerando os sistemas construtivos, são dois os materiais, habitualmente, utilizados na construção dos silos: concreto armado e aço. O primeiro é escolhido quando os esforços de flexão da parede são importantes, utilizando-se paredes de grande espessura. No caso dos silos metálicos, as paredes terão uma pequena espessura, que obrigam a uma redobrada atenção à deformação do painel.

Silos prismáticos têm sua seção transversal quadrada, retangular e poligonal, compostos de armação rígida fechada por uma chapa reforçada com enrijecedores. Obviamente a definição é para silos com paredes lisas, pois silos com paredes de conformação trapezoidal e ziguezague são mais eficientes e econômicos.

Conforme Gaylord Junior e Gaylord (1984), os silos prismáticos têm custo de fabricação reduzido e um completo aproveitamento do espaço disponível, por isso se tornam, economicamente, atraentes. Para uma mesma altura, silos quadrados propiciam 27% a mais de armazenagem em comparação com silos circulares de diâmetro igual ao comprimento de lado do silo quadrado.

Hoje, com o avanço da agroindústria, o uso de silos tornou-se indispensável para que se mantenha a qualidade de produtos como grãos, sementes e seus derivados. Os silos apresentam as vantagens de poder armazenar grandes quantidades em espaço horizontal reduzido, além de poder controlar o estoque a fim de escolher o melhor momento de comercialização (LOPES NETO; NASCIMENTO; LOPES, 2012).

De acordo com Lopes Neto, Nascimento e Calil Júnior (2008) e Nascimento (1996), nas fábricas de ração, por exemplo, necessitam-se, basicamente, de dois tipos de armazenagem em silos: um para produtos granulares e o outro para produtos pulverulentos. O primeiro, geralmente, não apresenta problemas com relação ao fluxo, enquanto o segundo exige fluxo controlado.

Entre os tipos de silos existentes, os silos metálicos prismáticos verticais destacam-se pela possibilidade de serem multicelulares facilitando a transilagem e proporcionando maior facilidade de operação dos equipamentos e precisão na confecção das rações (NASCIMENTO, 1996).

Uma fábrica de ração extrusada consta das seguintes partes: armazenamento, recebimento de matéria prima, moagem, dosagem, mistura, remoagem, extrusão, secagem, aplicação de líquidos, resfriamento/retirada de finos e ensaque e estocagem, ilustrado na Figura 2.

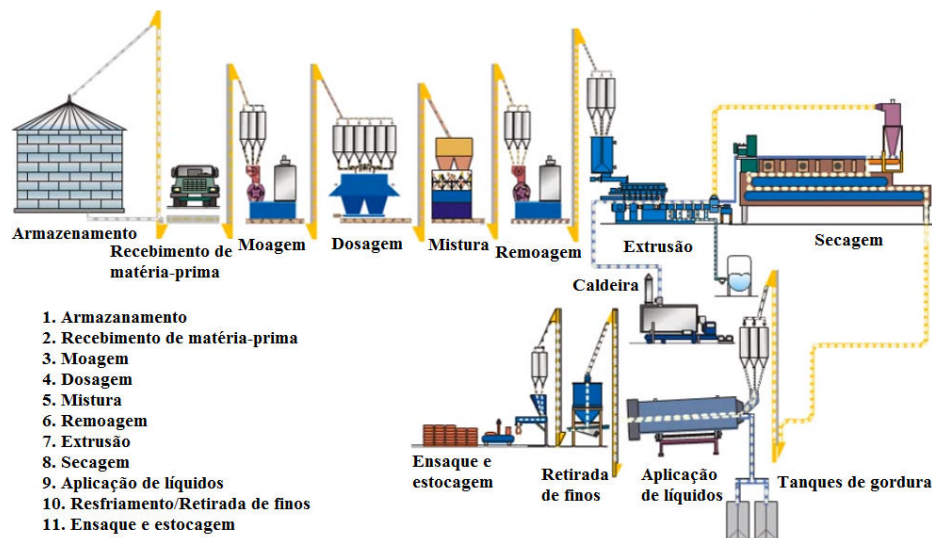


Figura 2 Fluxograma da fábrica de ração extrusada
 Fonte: Ferraz Máquinas (2014)

2.3 Fluxo dos produtos armazenados

Em projetos de tremonhas, é importante a caracterização do tipo de fluxo que irá ocorrer no silo (VIEIRA, 2009). Calil Júnior (1989) ressalta que o tipo de fluxo caracteriza o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente. Determina, ainda, a distribuição das pressões nas paredes do silo e da fundação, a integridade e o custo da construção. O fluxo é influenciado pelas propriedades do produto e em silos dotados de tremonha, pela geometria e rugosidade das paredes.

O modo como um produto fluirá por gravidade em um silo é governado, por um lado, pelas propriedades físicas do produto e, por outro, pela geometria e rugosidade da superfície da tremonha (FREITAS, 2001).

Em geral, podem ser distinguidos dois tipos principais de fluxo: o fluxo de massa e o fluxo de funil (JENIKE; JOHANSON, 1968).

(a) Fluxo de massa: este padrão de fluxo é o ideal de ser obtido sempre que possível. Caracteriza-se pelo fato de que todas as partículas armazenadas estão em movimento do começo até o fim do descarregamento, conforme a Figura 3 (a).

(b) Fluxo de funil: caracteriza-se pela formação de um canal de fluxo, alinhado com a boca de descarga, cercado por uma zona na qual o produto permanece estático (zona parada ou estagnada), conforme Figura 3 de (b) a (d).

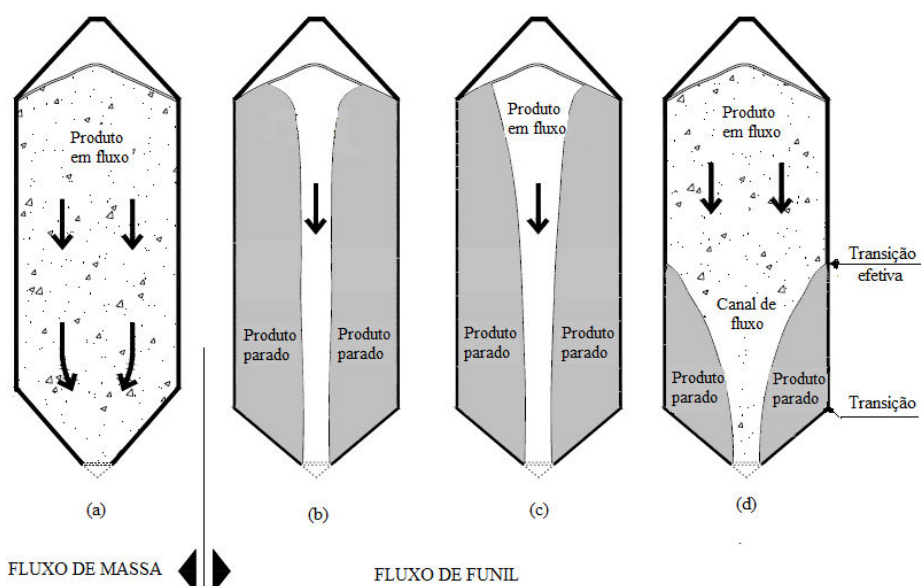


Figura 3 Tipos de fluxo em silos com descarga concêntrica: (a) Fluxo de massa, (b) Tubo interno paralelo, (c) Tubo interno cônico e (d) Fluxo misto
Fonte: Adaptado da BS EN (2006)

Na Figura 3 foram ilustrados os tipos de fluxo para silos que possuam saídas concêntricas. No caso de silos com descarga excêntrica, os tipos de fluxo são, basicamente, os mesmos, conforme Figura 4.

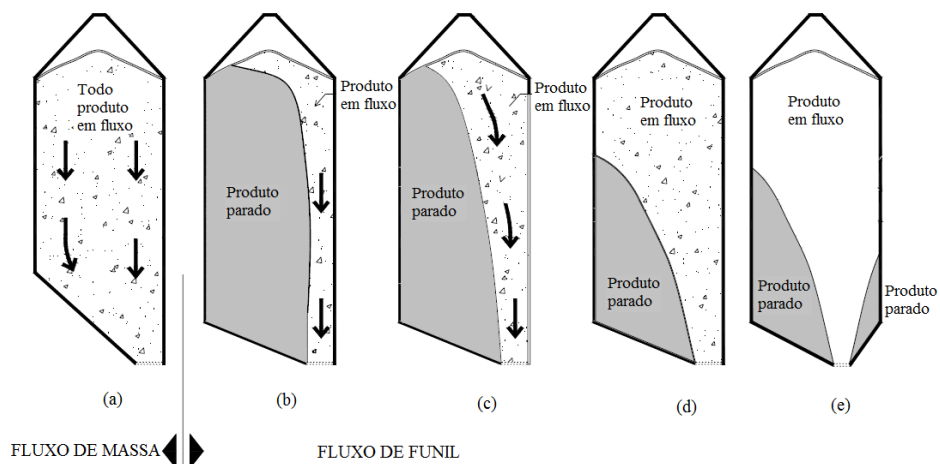


Figura 4 Tipos de fluxo em silos com descarga excêntrica: (a) Fluxo de massa, (b) Tubo paralelo, (c) Tubo inclinado, (d) Misto completamente excêntrico e (e) Misto parcialmente excêntrico

Fonte: Adaptado da BS EN (2006)

Quanto à geometria, o fluxo pode ser:

(a) Trajeto axissimétrico: o centro de gravidade do produto fluindo coincide, aproximadamente, com o eixo vertical do silo, por exemplo, silo circular com abertura de descarga concêntrica (Figura 5a).

(b) Trajeto planar: É um fluxo uniforme que ocorre em silos de seção transversal retangular ou quadrada, com tremonhas em forma de cunha, onde uma das dimensões da boca de saída é paralela e de igual comprimento às paredes do silo. Neste caso, o canal do fluxo é simétrico em relação ao plano que passa pelo eixo longitudinal da abertura de saída (Figura 5b).

(c) Trajeto excêntrico: o canal do fluxo não é simétrico em relação ao eixo vertical do silo, ou em relação ao plano vertical que passa pelo eixo longitudinal do silo (Figura 5c).

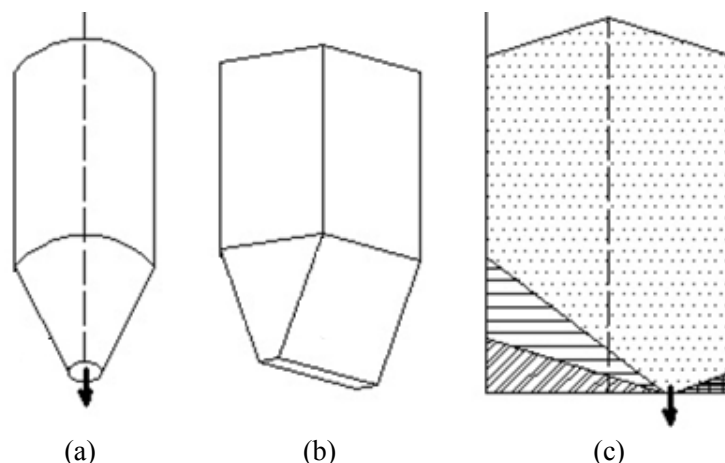


Figura 5 Variação geométrica dos silos e sua influência no fluxo
Fonte: AS (1996)

Quanto ao tipo de fundo, os silos podem ter:

(a) Fundo plano: silo de fundo horizontal ou um fundo com paredes inclinadas em um ângulo $\leq 20^\circ$ com relação à horizontal.

(b) Fundo com tremonha: fundos em forma de funil, cujas formas mais comuns são as tronco-piramidais e as tronco-cônicas.

O fluxo excêntrico, de acordo com Schulze (1996), pode surgir pelas seguintes razões: formação de zonas estacionárias assimétricas em silos com fluxo de funil, silo com sistema de descarga que retira o produto apenas de uma parte da boca de saída, silo com tremonhas assimétricas, silo que possui mais de uma boca de saída sendo que uma ou mais delas estão obstruídas ou em desuso.

Conforme Rotter (2013), silos com saídas concêntricas podem apresentar fluxo excêntrico, especialmente, nos seguintes casos: ocorrência de segregação no produto, bloqueio parcial ou falhas funcionais do sistema de descarga, diferenças de temperatura e de umidade em diferentes lados do silo, causando o fluxo preferencial em um deles.

De acordo com Roberts (1987), as condições de fluxo podem ser, facilmente, produzidas e determinadas, entretanto em um silo com fluxo de funil

é mais difícil de investigar, especialmente, se o silo tem várias bocas de descarga, carregamento excêntrico ou se o produto armazenado está propício a segregar. Com isso, devem ser projetados silos com formas geométricas simples e carregamento simétrico.

É importante ressaltar que a maioria das normas internacionais apresentam, geralmente, dois gráficos para determinação do tipo de fluxo que irá ocorrer no silo. Estes gráficos fornecem o tipo de fluxo em função do ângulo de inclinação da parede da tremonha, do ângulo ou coeficiente de atrito com a parede e do tipo de tremonha (geralmente, cônicas ou em cunha). A seguir, nas Figuras 6 e 7, são apresentados os gráficos para determinação do tipo de fluxo conforme as normas. No caso de silos excêntricos, ou seja, que possuem tremonhas assimétricas, cuja inclinação da tremonha varia ao redor da circunferência do silo, adota-se o maior valor de β (ângulo da parede da tremonha com a vertical) ou α (ângulo da parede da tremonha com a horizontal) para analisar o tipo de fluxo, que corresponde à pior situação de projeto.

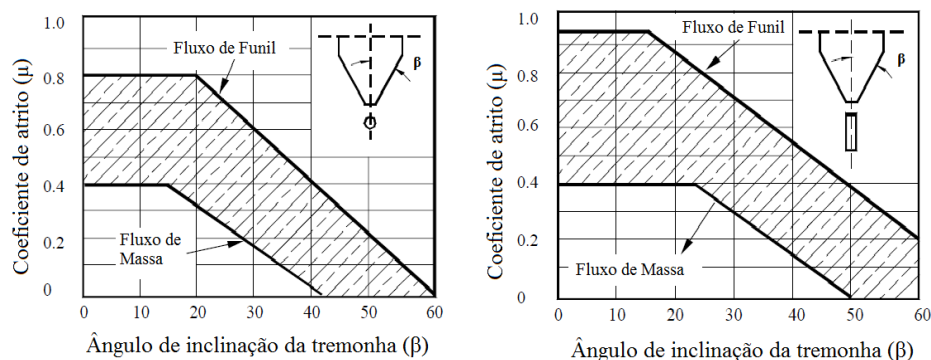


Figura 6 Determinação gráfica do tipo de fluxo
Fonte: AS (1996)

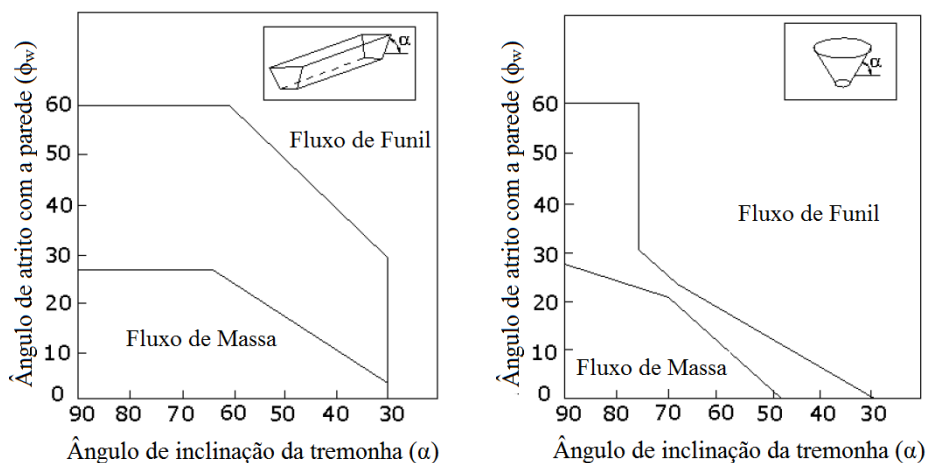


Figura 7 Determinação gráfica do tipo de fluxo
 Fonte: BS EN (2006) e DIN (2005)

2.3.1 Principais vantagens e desvantagens dos fluxos

Calil Júnior e Cheung (2007) apontaram as principais vantagens e desvantagens para os dois tipos de fluxo, visando permitir uma escolha coerente do sistema desejado de armazenamento e beneficiamento (Tabela 1).

Tabela 1 Principais vantagens e desvantagens dos fluxos de massa e funil

Fluxo de massa		Fluxo de funil	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Vazão regular	Altas tensões na transição da tremonha	Menor altura da tremonha	Flutuação na vazão
Efeito de segregação radial e reduzido com a melhora da homogeneidade	Desgaste superficial da parede	Diminuição das pressões dinâmicas na região da tremonha	Efeito de consolidação com o tempo podem causar obstruções no fluxo
Campo de tensão mais previsível	São necessárias tremonhas mais profundas	Menor desgaste superficial da parede	Grande favorecimento ao colapso
Toda capacidade é utilizada	Maior energia de elevação		Redução da capacidade de armazenamento
	As partículas devem resistir à queda de alturas maiores		Formação de tubos
	Maior capacidade de armazenamento, não possui região com produto estagnado		Picos de pressões na região da transição

Fonte: Calil Júnior e Cheung (2007)

2.3.2 Problemas em fluxo

De acordo com Roberts (1987), a obstrução de fluxo deve-se ao fato de que o produto armazenado adquire resistência suficiente para suportar seu próprio peso, em virtude da consolidação do produto. Existem, basicamente, dois tipos de obstruções de fluxo: arco (coesivo e mecânico) e tubo (Figura 8). Admite-se que, se durante a descarga do produto, nenhuma dessas duas obstruções ocorrerem assim, um fluxo satisfatório acontecerá. Essas obstruções causam sérios danos aos silos e, principalmente, à tremonha, pois quando

rompem, atua como um pistão, comprimindo o ar existente na tremonha, levando a danos na boca de descarga e paredes laterais.

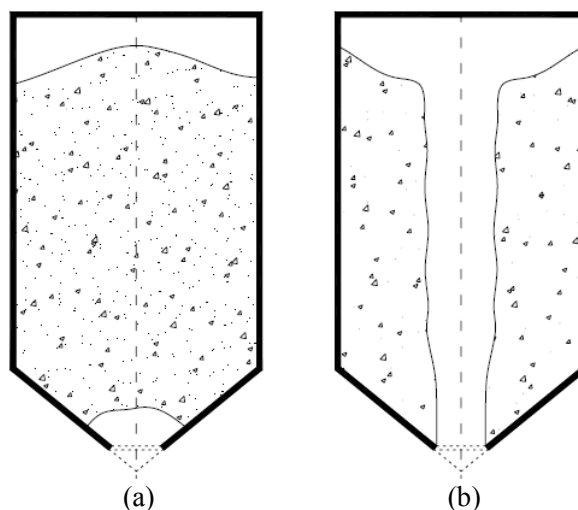


Figura 8 Tipos de obstruções: (a) em arco e (b) em tubo

A obstrução do tipo arco é, normalmente, formada logo acima da boca de descarga, fazendo com que o fluxo seja interrompido. Este tipo de obstrução ocorre por causa da força de adesão existente entre as partículas do produto armazenado.

A formação em tubos é comum em silos com fluxo funil contendo produtos coesivos. Se a consolidação do produto aumenta com o tempo de armazenamento, aumenta o risco de formação deste tipo de obstrução de fluxo (CALIL JÚNIOR; CHEUNG, 2007).

Bandeira (1997) realizou testes em um modelo de silo prismático, com ração avícola e detectou a formação de arco coesivo e o efeito tubo. Nóbrega (2003), utilizando o mesmo silo e rações avícolas com granulometrias diferentes, também, verificou a formação de arco coesivo.

Outra característica que pode proporcionar problemas de fluxo é o fato de que a ração, dentro da classificação quanto à granulometria, é um produto pulverulento e, algumas vezes, coesivo, o que exige dos projetistas cuidados especiais no dimensionamento de silos que evitem a formação de arcos coesivos e tubos (NÓBREGA; NASCIMENTO, 2005).

A análise granulométrica do produto armazenado é importante para a determinação do tipo de fluxo que irá ocorrer no silo, pois a dimensão das partículas sólidas influencia, diretamente, a formação ou não de obstruções de fluxo, especialmente, no que diz respeito à formação de arcos mecânicos junto à boca de descarga.

Calil Júnior (1984) recomenda que a classificação dos produtos armazenados seja feita em função das dimensões das partículas (Tabela 2).

Tabela 2 Classificação quanto à granulometria dos produtos armazenados

Diâmetro da partícula (D_p) (mm)	Classificação do produto armazenado
$D_p > 0,42$	Produtos granulares
$0,42 \leq D_p < 0,149$	Pulverulentos e/ou pulverulentos coesivos
$0,149 \leq D_p < 0,079$	Produtos pulverulentos coesivos finos
$D_p < 0,079$	Produtos pulverulentos coesivos extrafinos

Fonte: Calil Júnior (1984)

2.4 Pressões em silos verticais

No projeto de uma estrutura, seja ele de concreto armado, aço, madeira ou qualquer outro material, independentemente de sua complexidade arquitetônica ou estrutural, deve-se exigir que a mesma desempenhe as funções para que foi concebida com eficiência, aliando economia, durabilidade e segurança estrutural.

No cálculo das pressões é sempre desejável prever as mais desfavoráveis condições de pressões que o silo estará sujeito durante sua vida útil, por isso a

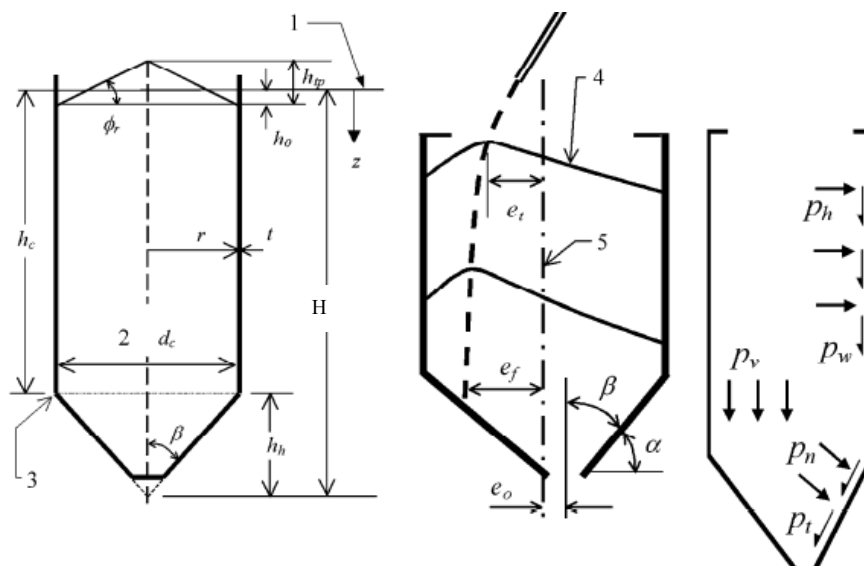
maioria das normas internacionais utilizam faixas de variação (limites superior e inferior) das propriedades do produto, que são: peso específico (γ), ângulo de atrito com a parede (ϕ_w), efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e), relação entre pressões horizontais e verticais (K), conforme Tabela 3.

Tabela 3 Emprego do limite inferior e superior das propriedades físicas dos produtos

Aplicação das propriedades		Peso específico (γ)	Ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w)	Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)	$K=P_h/P_v$
Tipo de fluxo	Funil	Inferior	Superior	Inferior	----
	Massa	Inferior	Inferior	Superior	----
Máxima pressão horizontal (P_h)		Superior	Inferior	Inferior	Superior
Máxima pressão vertical (P_v)		Superior	Inferior	Superior	Inferior
Máxima pressão de atrito (P_w)		Superior	Superior	Inferior	Superior
Máxima pressão vertical na tremonha		Superior	Inferior	Superior	Inferior

Fonte: AS (1996)

No projeto de silos, as principais pressões a serem consideradas são as provenientes dos produtos armazenados que exercem pressões nas paredes verticais e no fundo do silo. Na parede vertical, atuam pressões horizontais (P_h) que são normais às paredes e pressões de atrito vertical do produto com a parede (P_w) que são paralelas às paredes. Na tremonha, atuam as pressões tangenciais às paredes (P_t) e pressões normais (P_n). Na base ou fundo do silo, atuam pressões denominadas pressões verticais (P_v), que são provenientes do peso das camadas superpostas do produto armazenado, conforme é apresentado na Figura 9 (BS EN, 2006).



Legenda:

1 = Superfície equivalente;

2 = Dimensão interior;

3 = Transição;

4 = Perfil de superfície para a plena condição;

5 = Linha central do silo;

β = ângulo da tremonha com a vertical;

α = ângulo da tremonha com a horizontal;

ϕ_r = ângulo de repouso;

e_o = excentricidade da boca de descarga;

e_f = excentricidade máxima de enchimento no topo da superfície;

e_t = excentricidade e enchimento no topo da superfície;

t = espessura da parede do silo;

r = raio da seção transversal do silo;

H = altura efetiva do silo;

d_c = diâmetro inscrito;

z = ordenada com base na superfície equivalente;

h_o = altura equivalente do repouso;

h_c = altura do corpo do silo;

h_h = altura da tremonha, do seu eixo até transição;

h_{wp} = altura do repouso do produto armazenado

P_h = pressão horizontal;

P_v = pressão vertical;

P_w = pressão de atrito vertical;

P_n = pressão normal à parede da tremonha;

P_t = pressão de atrito.

Figura 9 Notação dos parâmetros geométricos de um silo e das pressões

Fonte: BS EN (2006)

Quando o produto está armazenado em repouso no interior do silo, atua o campo de tensões iniciais que difere, significativamente, da condição de descarregamento, no qual atua o campo de tensões dinâmicas. A diferença no campo de tensão entre a situação de carregamento e descarga acarreta um

aumento considerável nas pressões que atuam nas paredes do silo, podendo aparecer picos de pressões quando a situação de fluxo é obtida.

Tradicionalmente, o aumento das pressões foi atribuído à mudança do estado de equilíbrio do produto armazenado, que se encontra no estado ativo de equilíbrio, durante o armazenamento, em repouso, e passa para o estado passivo quando os produtos iniciam seu movimento (JENIKE; JOHANSON, 1968).

O projeto estrutural de um silo necessita do conhecimento da distribuição de pressões e das tensões de cisalhamento sobre as paredes (causadas pelo produto armazenado) e de como esta distribuição varia, durante o carregamento, armazenagem e descarga. As pressões oriundas das operações ocorrem, durante a vida útil da estrutura, que se traduzem em pressões nas paredes dos silos, causadas pelo produto armazenado, nas fases de carregamento, armazenamento e descarga (Figura 10) (PHAM, 1983).



Figura 10 Pressões nas paredes do silo para um ciclo de operação de carga, armazenamento e descarga.

De acordo com Silva (1993), a variabilidade espacial e temporária das pressões devidas aos produtos armazenados em silos, impede que sejam calculadas com certeza e precisão absoluta. Com intuito de caracterizar os

principais fatores que afetam as medições das pressões são apresentados na Tabela 4, aqueles que são mensuráveis.

Tabela 4 Fatores que afetam as pressões nas paredes dos silos

Propriedade dos produtos armazenados	Características dos silos (sistema)	Modos de operação (ações)
Peso específico	Altura de carga	Vazão de carga
Ângulo de atrito interno	Seção transversal	Vazão de descarga
Ângulo de atrito com a parede	Geometria da descarga	Fluxo
Forma, dimensão e distribuição da partícula	Obstruções internas	Carregamento
Resistência elástica e cisalhante	Rigidez na parede	Descarga
Coesão	Rugosidade da parede	Excentricidade de carregamento
Consolidação		Excentricidade de descarga
Umidade		
Temperatura		

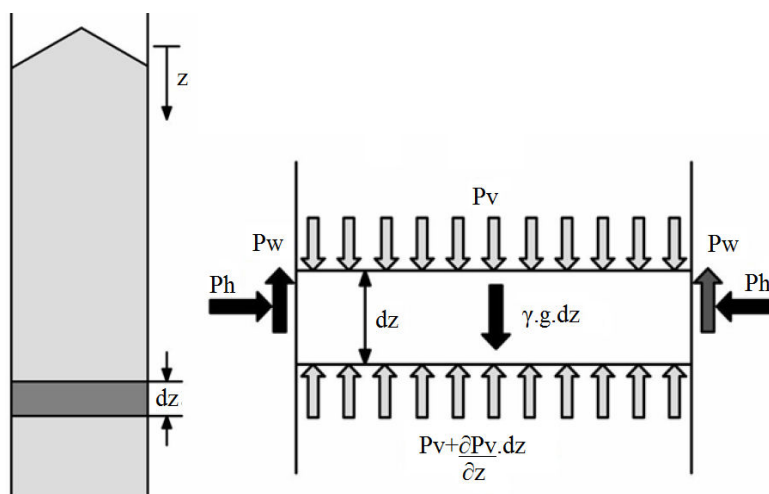
Fonte: Calil Júnior (1989)

As principais teorias desenvolvidas para o cálculo das pressões em silos esbeltos serão apresentadas neste item. A maioria delas constitui a base de cálculo das pressões nas normas vigentes que abordam ações em silos.

2.4.1 Teoria de Janssen (1895)

A teoria de Janssen é a teoria mais utilizada no cálculo das pressões estáticas das normas internacionais de silo, sendo baseada no equilíbrio estático de uma fatia infinitesimal do produto armazenado (Figura 11). A pressão vertical estática (P_{ve}), segundo a teoria de Janssen, é calculada por meio da Equação 1, sendo possível obter a pressão horizontal estática (P_{he}) e a pressão de atrito vertical estática (P_{we}) baseada nesta Equação. As hipóteses nas quais a teoria se baseia:

- As pressões horizontais são constantes em superfícies horizontais.
- Valor do ϕ_w (ângulo de atrito do produto com a parede) é constante.
- Peso específico do produto é constante.
- As paredes dos silos são totalmente rígidas.
- A relação entre as pressões horizontais e verticais, K , é constante em toda a altura do silo.



Legenda:

- P_v = pressão vertical;
- P_h = pressão horizontal;
- P_w = pressão de atrito vertical;
- z = ordenada com base na superfície equivalente;
- γ = peso específico do produto armazenado;
- g = aceleração da gravidade.

Figura 11 Camada elementar adotada por Janssen

Fonte: Madrona (2008)

$$P_{ve}(z) = \frac{\gamma \cdot R}{\mu \cdot K} \left[1 - e^{-\frac{\mu \cdot K \cdot z}{R}} \right] \quad (1)$$

em que:

P_{ve} = pressão vertical estática (kN.m^{-2});

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

K = relação entre pressão horizontal e vertical (adimensional):

$$K = \frac{1 - \text{sen}\phi_i}{1 + \text{sen}\phi_i} \quad (\text{Janssen adotou a equação proposta por Koenen}), \text{ sendo:}$$

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

z = ordenada com base na superfície equivalente (m);

R = raio hidráulico da célula (m), sendo:

. silos circulares: $R = D/4$ e silos com forma de polígonos retangulares: $R = d_c/4$,

em que: d_c = diâmetro inscrito (m);

. silos quadrados: $R = a/4$,

em que: a = comprimento do lado (m);

. silos retangulares: para cálculo da pressão próxima ao menor lado da parede,

aplica-se: $R = a/4$ e para pressão próxima ao maior lado da parede, aplica-se: R

= $a'/4$, em que: a' = comprimento do lado de um silo imaginário (m), sendo: $a' =$

$2.a.b - a^2/b$, sendo: a = comprimento do lado menor (m);

b = comprimento do lado maior (m);

μ = coeficiente de atrito do produto com a parede (adimensional), sendo:

$\mu = \tan\phi_w$, sendo: ϕ_w = ângulo de atrito do produto com a parede ($^\circ$).

$$P_{he}(z) = K.P_{ve}(z) \quad (2)$$

em que:

P_{he} = pressão horizontal estática (kN.m^{-2});

K = relação entre a pressão horizontal e vertical (adimensional);

P_{ve} = pressão vertical estática (kN.m^{-2}).

A existência da pressão lateral entre produto estocado e parede do silo provoca o surgimento de forças de atrito que fazem com que a carga vertical,

provocada pelo peso do produto, seja transmitida, em parte, ao longo da altura da viga e não só pelo apoio do produto no fundo do silo. A expressão a seguir mostra o valor da pressão de atrito entre o silo e o produto estocado.

$$P_{we}(z) = \mu.P_{he}(z) \quad (3)$$

sendo:

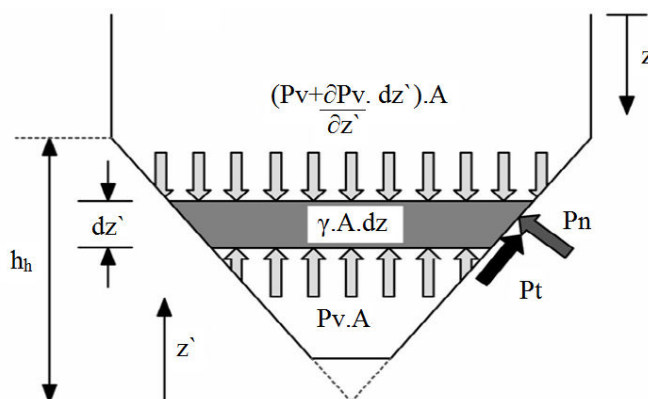
P_{he} = pressão horizontal estática (kN.m^{-2});

P_{we} = pressão de atrito vertical estática (kN.m^{-1});

μ = coeficiente de atrito do produto com a parede (adimensional).

2.4.2 Teoria de Walker (1966) para tremonhas

A teoria de Walker, para o estudo de fluxo, fornece as tensões na massa de um produto granular ou pulverulento em tremonhas e, ainda, os fatores críticos que asseguram a continuidade do fluxo gravitacional. O campo de tensões, durante o fluxo de massa, foi deduzido, considerando que as forças agem numa camada elementar e ao longo da parede da tremonha (Figura 12). Ressalta-se que a teoria é bastante precisa para os cálculos no estado estático e dinâmico nas paredes da tremonha.



Legenda:

P_n = pressão normal à parede da tremonha;

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

P_v = pressão vertical;

z = ordenada com base na superfície equivalente;

z' = ordenada com base no vértice da tremonha;

γ = peso específico do produto armazenado;

h_h = altura da tremonha, do seu eixo até transição;

A = área da seção transversal de uma faixa elementar no interior de uma tremonha.

Figura 12 Equilíbrio estático de uma fatia elementar de uma tremonha

Fonte: Madrona (2008)

Pressão estática na tremonha:

No campo de tensões na tremonha, admite-se que a pressão principal maior está na vertical. Dois casos são considerados:

1º caso: Se $\text{sen}\phi_e \geq \frac{\text{sen}\phi_w}{1-\text{sen}(\phi_w+2\beta)}$, as pressões na tremonha são dadas por:

$$P_{ne} = \gamma \cdot z \cdot \frac{\tan(\beta)}{\tan(\beta) + \tan(\phi_w)} \quad (4)$$

$$P_{te} = P_{ne} \cdot \tan\phi_w = P_{ne} \cdot \mu_h \quad (5)$$

2º caso: Se $\text{sen}\phi_e \leq \frac{\text{sen}\phi_w}{1-\text{sen}(\phi_w+2\beta)}$, as pressões na tremonha são dadas por:

$$P_{ne} = \gamma \cdot z \cdot \frac{1-\text{sen}(\phi_e) \cdot \cos(2\beta)}{1+\text{sen}(\phi_e)} \quad (6)$$

$$P_{te} = \gamma \cdot z \cdot \frac{\text{sen}(\phi_e) \cdot \text{sen}(2\beta)}{1 + \text{sen}(\phi_e)} \quad (7)$$

em que:

ϕ_w = ângulo de atrito do produto com a parede (°);

ϕ_e = efetivo ângulo de atrito interno (°);

β = ângulo da tremonha com a vertical (°);

P_{ne} = pressão normal estática à parede da tremonha ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$);

P_{te} = pressão de atrito vertical estática, por unidade de perímetro da tremonha ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$);

γ = peso específico do produto armazenado ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$);

z = ordenada com base na superfície equivalente (m);

μ_h = coeficiente de atrito com a parede da tremonha (adimensional).

Pressão dinâmica na tremonha:

Walker admitiu que o produto na tremonha estivesse num estado de deslizamento e promovesse as maiores pressões possíveis sobre a parede da tremonha. As pressões dinâmicas: normal (P_{nd}) e tangente (P_{td}) à parede da tremonha são obtidas baseadas na Equação 4 da seguinte forma:

$$P_{nd} = F_d \cdot P_{vn} \quad (8)$$

$$P_{td} = \mu_h \cdot P_{nd} \quad (9)$$

$$F_d = \frac{1 + \text{sen}\phi_e \cdot \cos(\varepsilon_2)}{1 - \text{sen}\phi_e \cdot \cos(2\beta + \varepsilon_2)} \quad (10)$$

$$\varepsilon_2 = \phi_w + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}\phi_w}{\text{sen}\phi_e} \right) \quad (11)$$

sendo:

P_{nd} = pressão normal dinâmica à parede da tremonha ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$);

F_d = relação da pressão normal e vertical na tremonha (adimensional);

P_{vn} = pressão vertical dinâmica na tremonha (kN.m^{-2});

P_{td} = pressão de atrito vertical dinâmica, por unidade de perímetro da tremonha (kN.m^{-1});

μ_h = coeficiente de atrito com a parede da tremonha (adimensional), sendo:

$$\mu_h = \tan\phi_w, \text{ sendo: } \phi_w = \text{ângulo de atrito do produto com a parede } (^\circ);$$

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

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

β = ângulo da tremonha com a vertical ($^\circ$);

ε_2 = ângulo variável ($^\circ$).

Considerando o equilíbrio das forças verticais numa camada horizontal de produto a uma distância z' acima do vértice (ápice) da tremonha e assumindo que a pressão vertical seja uniformemente distribuída, a seguinte equação:

$$P_{vn} = \frac{\gamma \cdot h_h}{(K_w - 1)} \cdot \frac{z'}{h_h} + \left(P_{vet} - \frac{\gamma \cdot h_h}{K_w - 1} \right) \left(\frac{z'}{h_h} \right)^{K_w} \quad (12)$$

sendo:

$$K_w = \frac{1+m}{\tan\beta} \cdot \frac{\text{sen}\phi_e \cdot \text{sen}(2\beta + \varepsilon_2)}{1 - \text{sen}\phi_e \cdot \text{cos}(2\beta + \varepsilon_2)} \quad (13)$$

em que:

P_{vn} = pressão vertical dinâmica na tremonha (kN.m^{-2});

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

h_h = altura da tremonha, do seu eixo até transição (m);

K_w = expoente da tremonha (adimensional);

z' = ordenada com base no vértice da tremonha (m);

P_{vet} = pressão vertical, atuando na transição após enchimento (kN.m^{-2});

m = parâmetro que depende da forma da seção da tremonha (adimensional), sendo:

$m = 0$ para tremonhas em cunha;

$m = 1$ para tremonhas cônicas ou piramidais;

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

β = ângulo da tremonha com a vertical ($^\circ$);

ε_2 = ângulo variável ($^\circ$).

A teoria de Walker (1966) é válida apenas para o cálculo das pressões em tremonhas concêntricas. As normas internacionais AS 3774:1996, DIN 1055-6:2005, e BS EN 1991-4:2006 (AS, 1996; BS EN, 2006; DIN, 2005) utilizam a teoria de Walker (1966) para predição das pressões nas tremonhas.

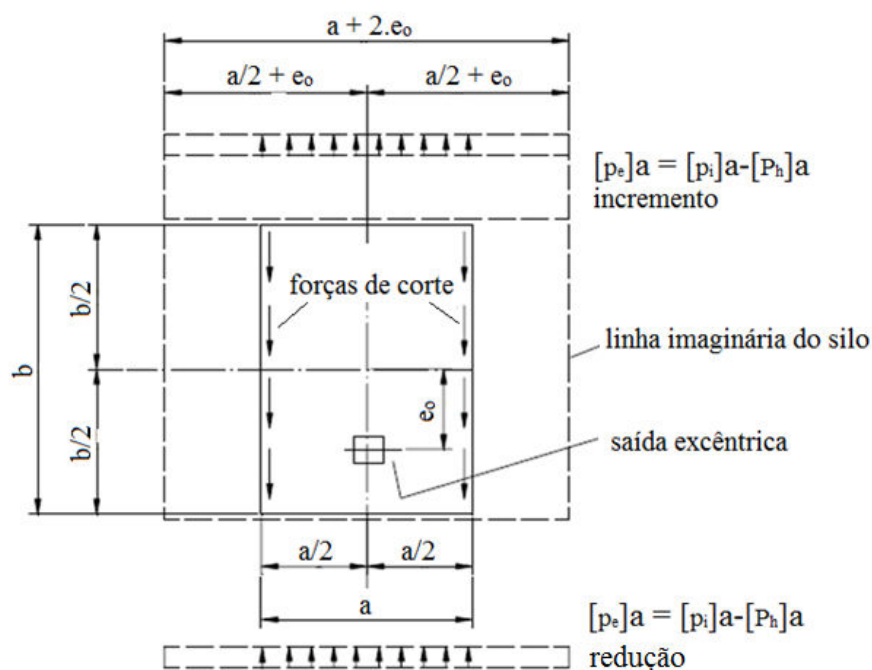
2.4.3 Método de Safarian para silos retangulares com saída excêntrica

As pressões atuantes em paredes de silos, em função de saídas excêntricas, podem ser diferenciadas, sensivelmente, das pressões em silos de saída concêntrica.

As pressões neste tipo de silo podem ser bastante complexas, havendo uma irregular repartição das cargas horizontais recorrendo-se, normalmente, a métodos aproximados para sua estimativa. É recomendado, para o cálculo dessas ações, o método do “silo imaginário” da norma americana ACI 313:1977 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI, 1977).

Safarian (1969) se baseou nos resultados experimentais de Pieper e Wagner (1968), para propor um método de cálculo das pressões em silos com descarga excêntrica. Para silos retangulares, o autor propõe que as pressões de descarga sejam calculadas, inicialmente, com a fórmula de Janssen (1895) multiplicada por um coeficiente de sobrepressão (C_d).

Neste método consideram-se os efeitos resultantes da excentricidade, repartindo as pressões sobre o contorno exterior de forma desigual, sendo estas pressões equilibradas por meio de forças de atrito que se desenvolvem entre o produto e as paredes (Figura 13).



Legenda:

- a = largura da parede da célula do silo;
- b = maior largura da parede da célula do silo retangular;
- e_0 = excentricidade da boca de descarga;
- $[p_e]a$ = pressão incremental em razão da excentricidade do lado a ;
- $[p_i]a$ = pressão horizontal imaginária do lado a ;
- $[P_h]a$ = pressão horizontal do lado a .

Figura 13 Mudança de pressão em razão da descarga excêntrica em silo retangular

Fonte: Safarian (1985)

A pressão de projeto em qualquer altura z é calculada pela seguinte equação:

$$P_{hd} = C_d \cdot P_{he} + p_e \quad (14)$$

sendo:

P_{hd} = pressão horizontal dinâmica (kN.m^{-2});

C_d = coeficiente de sobrepressão (adimensional);

P_{he} = pressão horizontal estática (calculada por Janssen) (kN.m^{-2});

p_e = pressão incremental em razão da excentricidade (kN.m^{-2}).

Para silos retangulares e utilizando a equação de Janssen (1895), pode-se simplificar a Equação 14, resultando em:

$$P_{hd} = C_d \cdot P_{he} + \frac{z}{H-a} \cdot p_e \quad (15)$$

sendo:

z = ordenada com base na superfície equivalente (m);

H = altura efetiva do silo (da boca de saída à superfície equivalente) (m);

a = largura da parede da célula do silo (m).

O incremento de pressão em virtude da excentricidade é obtido pela seguinte equação:

$$p_e = p_i - P_{he} \quad (16)$$

em que:

p_e = pressão incremental em razão da excentricidade (kN.m^{-2});

p_i = pressão horizontal imaginária (kN.m^{-2});

P_{he} = pressão horizontal estática (kN.m^{-2}).

Então, para calcular a pressão horizontal imaginária (p_i), faz-se necessário calcular a pressão horizontal de Janssen (1895) para um silo imaginário que possua a largura da parede aumentada.

Denomina-se largura imaginária ou virtual da parede a variável “ ae ”, sendo:

$$ae = (a + 2 \cdot e_o) \quad (17)$$

em que:

ae = largura imaginária (m);

a = largura da parede da célula do silo (m);

e_o = excentricidade da boca de descarga (m).

Como todas as variáveis são conhecidas, é possível calcular p_i , na qual é a mesma que calcula a pressão horizontal estática de Janssen (1895), sendo:

$$p_i = \frac{\gamma \cdot R}{\mu} \left(1 - e^{-\frac{\mu \cdot K \cdot z}{R}} \right) \quad (18)$$

em que:

p_i = pressão horizontal imaginária ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$);

γ = peso específico do produto armazenado ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$);

R = raio hidráulico imaginário (m), sendo: $R = ae/4$;

μ = coeficiente de atrito do produto com a parede (adimensional);

K = relação entre pressão horizontal e vertical (adimensional);

z = ordenada com base na superfície equivalente (m).

Safarian (1969), a partir das pressões estáticas dadas por Janssen e Reimbert, apresentou uma proposta de pressões dinâmicas, empregando coeficientes de sobrepressão (Tabela 5) estabelecidos com base em trabalhos teóricos e experimentais. Para o descarregamento do produto com fluxo de massa, os valores obtidos na Tabela 5 devem ser acrescidos entre 10% a 25%.

Tabela 5 Coeficientes de sobrepressão (C_d)

Descrição da área de aplicação	Silo de aço
	Janssen
a) Silos unicelulares e multicelulares quadrados ou retangulares.	
TRECHO SUP. COM EXTENSÃO H_1	1,50
	$H/(a \text{ ou } b) = 1,50$
	1,65
	$H/(a \text{ ou } b) > 4,50$
TRECHO INFERIOR COM EXTENSÃO $2/3H$	$H_1 = D \cdot \tan\phi < H/3$
	$(H_1) a = b \cdot \tan\phi < H/3$
	$(H_1) b = a \cdot \tan\phi < H/3$
	1,65
b) Tremonhas e vigas curvas de aço; vigas de aço em silos metálicos ou de concreto armado.	
(A) PARA AVEIA E FARINHA	1,50
(B) PARA TODOS OS TIPOS DE CEREAIS	1,25
(C) TODOS OS TIPOS DE MATERIAIS GRANULARES EXCETO OS DOS ITENS (A) E (B) ACIMA	2,25
Observação: os valores do coeficiente C_d para $H/(a \text{ ou } b)$ entre 1,50 e 4,50, para a teoria de Reimbert, podem ser determinados por interpolação.	

Fonte: Adaptado de Safarian (1969)

Baseado em várias curvas experimentais de pressão horizontais, obtidas durante a descarga de produto armazenado, as quais indicavam que grandes sobrepressões podem ocorrer nos dois terços inferiores da célula, enquanto, relativamente, pequenas sobrepressões ocorrem na parte superior da célula, Safarian (1969), então, estabeleceu uma curva simplificada para as pressões horizontais dinâmicas (Figura 14).

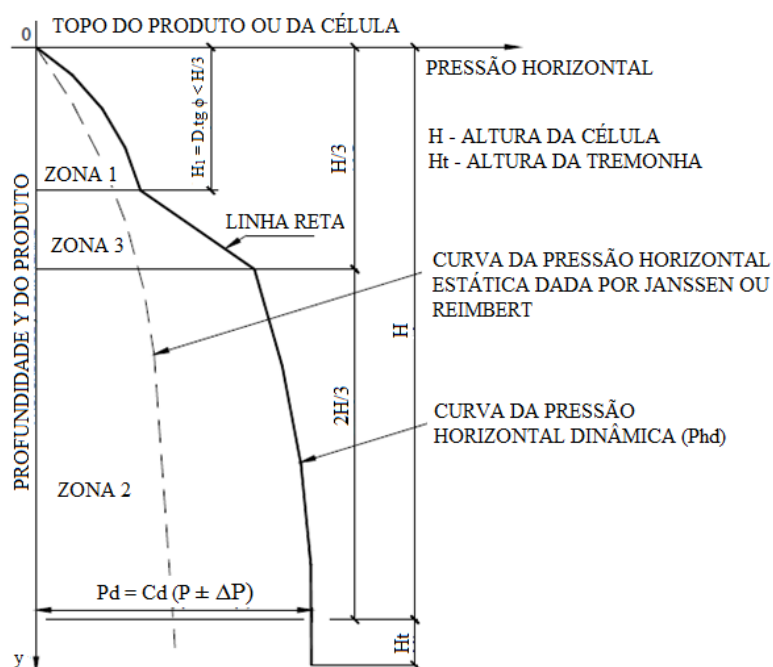


Figura 14 Variação da pressão horizontal dinâmica com a profundidade proposta por Safarian (1969)

Fonte: Safarian (1969)

2.5 Normas internacionais

As normas, de modo geral, propõem equações para pressões exercidas pelos produtos armazenados nas paredes e tremonhas, bem como pressões adicionais para levar em conta o efeito de pressões assimétricas, inevitáveis mesmo em silos com carregamento concêntrico e de eixo simétrico e que são dependentes das características do produto e imperfeições na geometria do silo construído (HEZEL, 2007).

Conforme as normas, os silos podem ser classificados, geralmente, de acordo com as seguintes características: geometria do silo, tipo de fluxo e tipo de fundo (plano ou elevado).

Em relação à geometria, os silos são classificados segundo a relação entre a altura efetiva do silo (H) e o diâmetro inscrito (d_c). Porém, as normas internacionais não são unânimes em relação a essa classificação, de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 Classificação dos silos segundo a relação H/d_c

Norma	Classificação			
	Horizontal	Baixo	Medianamente esbelto	Esbelto
Australiana AS 3774:1996		$H/d_c < 1,0$	$1 \leq H/d_c \leq 3$	$H/d_c > 3$
Europeias BS EN 1991-4:2006 DIN 1055-6:2005	$H/d_c \leq 0,4$	$0,4 \leq H/d_c \leq 1$	$1 \leq H/d_c \leq 2$	$H/d_c \geq 2$

Nota: H = altura efetiva do silo (da boca de saída até a superfície equivalente) e d_c = diâmetro inscrito

Para se determinar as pressões estáticas na parede do silo, todas as normas estudadas se baseiam na teoria de Janssen (1895). Também, em todas elas, as pressões dinâmicas são obtidas multiplicando-se as pressões estáticas por coeficientes de sobrepressão. O modo de determinar esses coeficientes é que difere muito entre as normas e algumas fornecem valores fixos e outras se utilizam das equações empíricas.

Na tremonha, a teoria de Walker (1966) é adotada para a maioria das normas e nenhuma delas propõe um método de cálculo das pressões em tremonhas excêntricas.

2.5.1 Parâmetro K

As pressões verticais e as horizontais podem ser relacionadas por uma constante chamada de K , que depende do movimento horizontal entre o produto armazenado e a parede.

As propriedades físicas, para alguns produtos armazenados, são tabeladas pelas normas, mas devem ser utilizadas em último caso, quando não existir a possibilidade de realizar ensaios para sua determinação.

A norma australiana (AS) e as normas europeias (EUROCODE e DIN), da Classe 2 e 3, utilizam valores limites (inferiores e superiores) das propriedades físicas dos produtos para cada parâmetro do produto como mostrado na Tabela 3. O valor do coeficiente K deve ser calculado, de acordo com a teoria de Walker (1966), limitando $K \geq 0,35$ para garantir que o ângulo de atrito não esteja superestimado. Enquanto para as normas europeias a equação para a obtenção do coeficiente K é o mesmo recomendado por Rotter (2013) (Tabela 7).

Tabela 7 Parâmetro K

Norma	Teoria	Parâmetro K
Australiana AS 3774:1996	Walker (1966)	$\frac{1 + \text{sen}^2\phi_e - 2\sqrt{\text{sen}^2\phi_e - \mu^2\text{cos}^2\phi_e}}{4\mu^2 + \text{cos}^2\phi_e} \geq 0,35$
Europeias BS EN 1991-4:2006 DIN 1055-6:2005	Jaky (1948)	$1,1(1 - \text{sen}\phi_e)$ $1,2(1 - \text{sen}\phi_e)$
ACI 313:1997	Rankine e Koenen (1896)	$\frac{1 - \text{sen}\phi_e}{1 + \text{sen}\phi_e}$

Nota: μ = coeficiente de atrito do produto com a parede e ϕ_e = efetivo ângulo de atrito interno com a parede

Na norma alemã, o fator 1,2 foi escolhido para garantir que, em pequenas alturas do produto armazenado, ou seja, na parte inferior do silo, resultem curvas de pressão mais completas.

2.5.2 Normas europeias: BS EN 1991-4:2006 e DIN 1005-6:2005

Classificação dos silos:

As normas europeias consideram diferentes níveis de exigências para o projeto estrutural de silo e, por isso, deve ser executada de acordo com as exigências de três Classes de Avaliação das Ações (Tabela 8). A classe de Avaliação das Ações para um silo deve ser determinada pelas condições da unidade de armazenamento individual e não sobre uma bateria ou grupo de silos.

Tabela 8 Classificação dos silos em classes de confiabilidade

Classe de Avaliação das Ações	Descrição
Classe 3	Silos com capacidade excedente a 10000 t Silos com capacidade excedente a 1000 t com a ocorrência de qualquer situação a seguir: a) Excentricidade de descarga com $e_o/d_c > 0,25$ b) Silos baixos com o topo da superfície com excentricidade $e_t/d_c > 0,25$
Classe 2	Todos os silos que não pertencem às Classes 1 e 3
Classe 1	Silos com capacidade abaixo de 100 t

Nota: e_o = excentricidade da boca de descarga, d_c = diâmetro inscrito e e_t = excentricidade de enchimento no topo da superfície

Fonte: BS EN (2006)

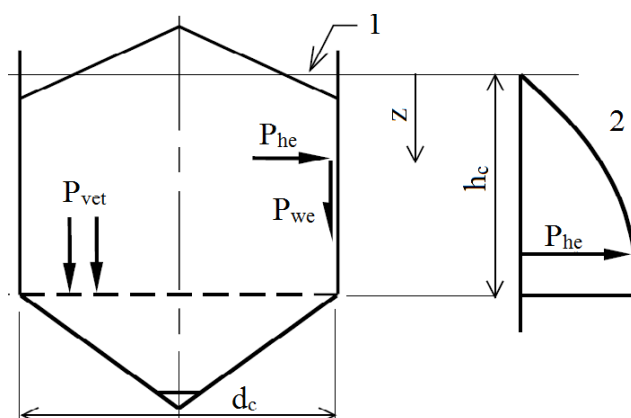
Quanto à excentricidade, as normas, atualmente, podem ser classificadas em silos de pequena excentricidade ($e_o \leq 0,25.d_c$) e de grande excentricidade ($e_o > 0,25.d_c$). É importante destacar que, nas versões anteriores, isso não acontecia nas normas BS EN (EUROCODE) e DIN na qual o valor da excentricidade de descarga era limitado em 25% do diâmetro. Essa limitação foi eliminada após a adoção da teoria de Rotter (1986). Rotter (2013) afirma que sua teoria fornece bons resultados para projeto estrutural de silo e foi validada com sucesso em várias investigações de acidentes em silos excêntricos de fundo plano. Também foi avaliada por muitos experimentos, contidos em Rotter et al. (1995).

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, na Tabela 3.

Pressões estáticas e dinâmicas no corpo do silo esbelto:

a) Pressões estáticas (ou carregamento):

Os silos esbeltos, na norma EUROCODE, são compostos de uma carga fixa conhecida como pressão estática simétrica (*symmetrical load*) (Figura 15) e uma carga variável conhecida como pressão estática adicional (*patch load*) às quais devem ser tomadas como atuando simultaneamente.



Legenda:

1 = superfície equivalente;

2 = pressão no segmento vertical;

z = ordenada com base na superfície equivalente;

d_c = diâmetro inscrito;

h_c = altura do corpo do silo;

P_{he} = pressão horizontal estática;

P_{we} = pressão de atrito vertical estático;

P_{vet} = pressão vertical, atuando na transição após o enchimento.

Figura 15 Pressão estática simétrica no corpo do silo

Fonte: BS EN (2006)

As pressões estáticas simétricas são obtidas pela teoria de Janssen (Equações 1, 2 e 3), utilizando os valores apropriados de μ , γ e K . Para os silos que se enquadram de Classe 1 de confiabilidade, adotam-se os 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 , γ e K , de acordo com a Tabela 3.

Deve ser adotada uma pressão estática adicional (carga variável) com o objetivo de considerar incertezas, provenientes de excentricidades acidentais, durante o processo de enchimento do silo e imperfeições geométricas da parede, além da distribuição de pressão estática calculada por Janssen.

A magnitude da pressão adicional estática de enchimento (P_{pe}) deve ser tomada como:

$$P_{pe} = C_{pe} \cdot P_{he} \quad (19)$$

sendo:

P_{pe} = pressão adicional estática (kN.m^{-2});

C_{pe} = coeficiente de pressão adicional estática (adimensional);

P_{he} = pressão horizontal estática (kN.m^{-2});

$$C_{pe} = 0,21 C_{op} [1+2E^2] (1 - e^{\{-1,5 [(hc/dc) - 1]\}}) \quad (20)$$

$$E = 2 e_f/d_c \quad (21)$$

sendo:

C_{pe} = coeficiente de pressão adicional estática (adimensional);

C_{op} = coeficiente do produto armazenado, variando em função do tipo de produto (adimensional), em que:

$$C_{op}(\text{milho}) = 0,9; C_{op}(\text{milho triturado}) = 0,7 \text{ e } C_{op}(\text{farelo de soja}) = 0,5;$$

E = relação entre a excentricidade do canal de fluxo (e) e o diâmetro inscrito (d_c) (adimensional);

h_c = altura do corpo do silo (m);

d_c = diâmetro inscrito (m);

e_f = excentricidade máxima do topo da superfície (m);

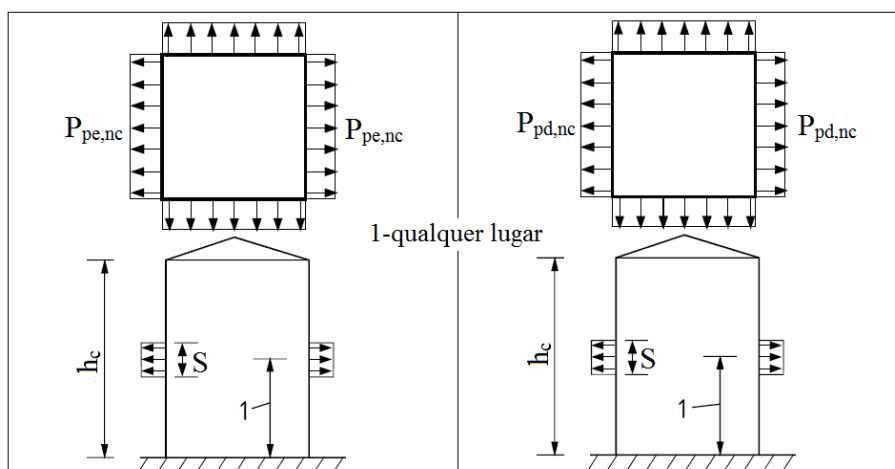
Para silos não circulares (Figura 16) das Classes 2 e 3, a pressão adicional estática, que representa a carga assimétrica, pode ser representada por um aumento na pressão simétrica. A magnitude do aumento da pressão simétrica uniforme sobre a parede não circular deve ser tomada como:

$$P_{pe,nc} = 0,36 P_{pe} \quad (22)$$

sendo:

P_{pe} = pressão adicional estática (kN.m^{-2});

$P_{pe,nc}$ = pressão adicional estática para silos não circulares (kN.m^{-2}).



(a) Pressão adicional no enchimento (b) Pressão adicional na descarga

Legenda:

$P_{pe,nc}$ = pressão adicional estática para silos não circulares;

$P_{pd,nc}$ = pressão adicional dinâmica para silos não circulares;

S = altura da zona afetada pelo carregamento;

h_c = altura do corpo do silo.

Figura 16 Silos não circulares: elevação lateral e vista da distribuição da pressão adicional

Fonte: BS EN (2006)

b) Pressões dinâmicas (ou descarregamento):

Assim como no caso das pressões estáticas, no caso do descarregamento nas paredes do corpo do silo, a pressão dinâmica é composta por pressões dinâmicas simétricas e pressões dinâmicas adicionais.

As pressões dinâmicas simétricas são calculadas baseadas nas pressões estáticas multiplicadas por coeficientes de sobrepressão, sendo eles o C_h e o C_w . Para silos em todas as três Classes de Avaliações das Ações, as pressões simétricas horizontais (P_{hd}) e de atrito (P_{wd}) de descarregamento devem ser determinadas pelas equações:

$$P_{hd} = C_h \cdot P_{he} \quad (23)$$

em que:

P_{hd} = pressão horizontal dinâmica (kN.m^{-2});

C_h = coeficiente de sobrepressão para pressões horizontais (adimensional);

P_{he} = pressão horizontal estática (kN.m^{-2}).

$$P_{wd} = C_w \cdot P_{we} \quad (24)$$

em que:

P_{wd} = pressão de atrito dinâmica (kN.m^{-1});

C_w = coeficiente de sobrepressão para pressões de atrito (adimensional);

P_{we} = pressão de atrito estática (kN.m^{-1}).

Para silos esbeltos em Classes 2 e 3, os coeficientes de sobrepressão devem ser tomados como: $C_h = C_o = 1,15$ e $C_w = 1,1$, sendo: C_o = coeficiente de sobrepressão para todos os sólidos é igual a 1,15.

Para silos esbeltos em Classe 1, onde o valor médio das propriedades do produto de K e μ são usados, o fator de descarga deve ser igual a:

$$C_h = 1,15 + 1,5 (1 + 0,4 e/d_c).C_{op} \quad (25)$$

$$C_w = 1,4 (1 + 0,4 e/d_c) \quad (26)$$

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).

sendo:

$$e = \max (e_f, e_o) \quad (27)$$

A pressão adicional dinâmica deve ser adotada para representar pressões assimétricas acidentais, durante a descarga, bem como a influência da excentricidade na entrada e saída. No caso de silos de Classe 1, deve ser ignorada a pressão adicional dinâmica.

Para silos de Classes 2 e 3, devem ser utilizadas as pressões dinâmicas adicionais na descarga. A magnitude das pressões adicionais dinâmicas de descarga (P_{pd}) deve ser tomada por meio da equação:

$$P_{pd} = C_{pd} \cdot P_{hd} \quad (28)$$

em que:

P_{pd} = pressão adicional dinâmica (kN.m^{-2});

P_{hd} = pressão horizontal dinâmica (kN.m^{-2});

C_{pd} = coeficiente de pressão adicional dinâmica (adimensional).

Para $h_c/d_c > 1,2$, C_{pd} é dado pela equação 29

$$C_{pd} = 0,42 C_{op} [1+2E^2] (1 - \exp\{-1,5 [(h_c/d_c) - 1]\}) \quad (29)$$

Para $h_c/d_c \leq 1,2$, C_{pd} é dada pelo maior dos valores indicados pelas equações 29, 30 e 31

$$C_{pd} = 0,272 C_{op} \{(h_c/d_c) - 1 + E\} \quad (30)$$

$$C_{pd} = 0 \quad (31)$$

sendo:

$$E = 2.e/d_c \quad (32)$$

$$e = \max (e_f, e_o) \quad (33)$$

em que:

E = relação entre a excentricidade do canal de fluxo (e) e o diâmetro inscrito (d_c);

e = maior valor entre e_f e e_o (m);

d_c = diâmetro inscrito (m);

e_f = excentricidade máxima do topo da superfície (m);

e_o = excentricidade da boca de descarga (m).

Para silos não circulares (Figura 16) das Classes 2 e 3, a pressão dinâmica adicional, que representa a carga assimétrica, pode ser representada

por um aumento na pressão simétrica. A magnitude do aumento da pressão simétrica uniforme sobre a parede não circular deve ser tomada como:

$$P_{pd,nc} = 0,36 P_{pd} \quad (34)$$

em que:

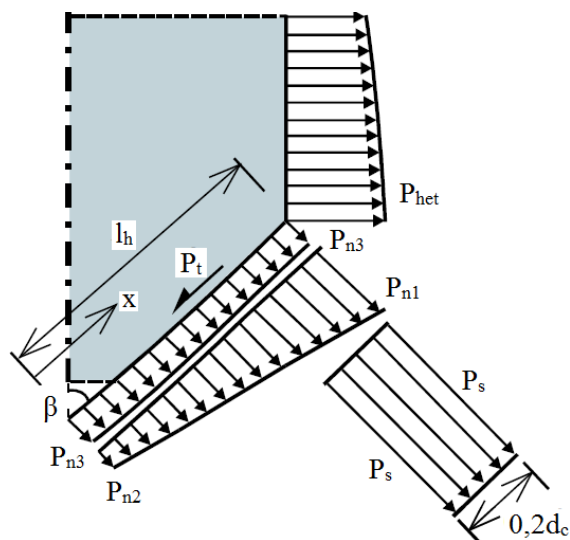
P_{pd} = pressão adicional dinâmica (kN.m^{-2});

$P_{pd,nc}$ = pressão adicional dinâmica para silos não circulares (kN.m^{-2}).

Pressões na tremonha:

As normas europeias não apresentam um método de cálculo para o caso de tremonhas excêntricas.

As regras para a determinação das pressões a aplicar nas paredes da tremonha encontram-se dispostas no Anexo G do BS EN (2006). Este anexo apresenta um método alternativo, que consiste em admitir que a pressão na tremonha seja a soma das componentes ilustradas na Figura 17.



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 17 Distribuição de pressões nas tremonhas pelo método alternativo

Fonte: BS EN (2006)

a) Pressão estática (ou carregamento) da tremonha:

Quando a inclinação da parede da tremonha em relação à horizontal é maior do que 20° a pressão normal para a tremonha (P_n) parede inclinada, a qualquer nível deve ser calculada como se segue:

$$P_n = P_{n3} + P_{n2} + (P_{n1} - P_{n2}) \cdot x / l_h \quad (35)$$

em que:

$$P_{n1} = P_{vet} \cdot (C_b \cdot \text{sen}^2\beta + \text{cos}^2\beta) \quad (36)$$

$$P_{n2} = P_{vet} \cdot C_b \cdot \text{sen}^2\beta \quad (37)$$

$$P_{n3} = 3,0 \cdot R \cdot (\gamma \cdot K / \sqrt{\mu_h}) \cdot \text{cos}^2\beta \quad (38)$$

em que:

P_n = pressão normal à parede da tremonha ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$);

P_{n1} = pressão na tremonha em virtude da pressão vertical causada pelo armazenamento do produto na região da transição ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$);

P_{n2} = pressão na tremonha em virtude da pressão vertical causada pelo armazenamento do produto na saída da tremonha ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$);

P_{n3} = pressão na tremonha em razão do peso do produto na mesma ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$);

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) ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$);

C_b = coeficiente de sobrepressão para tremonha (adimensional), em que:

$$C_b = 1,3 \text{ (produto livre) e } C_b = 1,6 \text{ (produto coesivo);}$$

β = ângulo da tremonha com a vertical ($^\circ$);

R = raio hidráulico da célula (m);

γ = peso específico do produto armazenado ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$);

K = relação entre pressão horizontal e vertical (adimensional);

μ_h = coeficiente de atrito com a parede da tremonha (adimensional).

A pressão de atrito vertical estática na tremonha (P_t) é calculada por:

$$P_t = P_n \cdot \mu_h \quad (39)$$

em que:

P_n = pressão normal à parede da tremonha (kN.m^{-2});

μ_h = coeficiente de atrito com a parede da tremonha (adimensional).

b) Pressão dinâmica (ou descarregamento) 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 (ou enchimento) 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 em redor do seu perímetro:

$$P_s = 2.K.P_{\text{vet}} \quad (40)$$

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 1 de Janssen) (kN.m^{-2}).

2.5.3 Norma australiana AS 3774:1996

Pressões estáticas e dinâmicas no corpo do silo esbelto:

A norma australiana prevê aumentos na pressão estática normal à parede, quando qualquer uma das seguintes situações ocorrer: rápido carregamento, expansão do produto armazenado em virtude da absorção de umidade, carregamento excêntrico, sucção em virtude das mudanças térmicas adiabáticas, entre outras.

As pressões estáticas são calculadas de acordo com a teoria de Janssen e as pressões dinâmicas para a norma australiana são multiplicadas às pressões estáticas por coeficientes de sobrepressão, assim como na EUROCODE e DIN. Somente o modo de determinar os coeficientes de sobrepressão que é diferente entre as outras normas. A pressão horizontal de descarga (P_{hd}) será determinada pela seguinte equação:

$$P_{hd} = C_h \cdot P_{he} \quad (41)$$

na qual C_h é o maior valor de:

$$C_h = \left[7,6 \left(\frac{H}{d_c} \right)^{0,06} - 6,4 \right] \cdot C_c \quad (42)$$

e

$$C_h = 1,2 \cdot C_c \quad (43)$$

sendo:

P_{hd} = pressão horizontal dinâmica (kN.m^{-2});

P_{he} = pressão horizontal estática (kN.m^{-2}) (Equação 2);

C_h = coeficiente de sobrepressão para pressões horizontais (adimensional);

H = altura efetiva do silo (da boca de saída à superfície equivalente) (m);

d_c = diâmetro inscrito (m);

C_c = coeficiente de geometria do fluxo (adimensional), em que:

$C_c = 1,0$ para silos com fluxo simétrico;

$C_c = 1,2$ para silos com fluxo planar.

Em silos com fluxo funil a norma permite uma redução no coeficiente de sobrepressão para pressão horizontal (C_h). No nível da altura da transição efetiva (h_{eft}) (Figura 3(d)) o coeficiente será o maior valor obtido pelas Equações 42 e 43. No nível da boca de descarga será o valor obtido pela Equação 43. Para os

níveis intermediários, poderá ser usada uma interpolação linear entre os dois valores. A posição mais baixa da transição efetiva, baseada na boca de descarga, é dada por:

$$h_{\text{eft}} = 0,4 \cdot d_c \cdot \tan\phi_i \quad (44)$$

em que:

h_{eft} = altura da transição efetiva (m);

d_c = diâmetro inscrito (m);

ϕ_i = ângulo de atrito interno (°).

A pressão de atrito dinâmica (P_{wd}) é dada pela seguinte equação:

$$P_{\text{wd}} = C_w \cdot P_{\text{we}} \quad (45)$$

em que:

P_{we} = pressão de atrito estática ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$) (Equação 3);

C_w = coeficiente de sobrepressão para pressões de atrito (adimensional), em que:

$C_w = 1,2$ para silos com geometria de fluxo simétrico;

$C_w = 1,4$ para silos com geometria de fluxo planar.

Pressões na tremonha:

No cálculo das pressões excêntricas a norma australiana apenas sugere o cálculo da pressão normal dinâmica à parede da tremonha (P_{nd}) sendo dada pela seguinte equação:

$$P_{\text{nd}} = K_n \cdot P_{\text{vn}} \quad (46)$$

$$K_n = \frac{1 + \text{sen}\phi_e \cdot \cos(2\eta)}{1 - \text{sen}\phi_e \cdot \cos[2(\beta + \eta)]} \quad (47)$$

$$P_{vn} = \frac{\gamma z'}{j-1} + \left(P_{vet} - \frac{\gamma h_h}{j-1} \right) \cdot \left(\frac{z'}{h_h} \right)^j \quad (48)$$

$$\eta = 0,5 \cdot [\phi_w + \text{sen}^{-1}(\text{sen}\phi_w / \text{sen}\phi_e)] \leq 90^\circ \quad (49)$$

$$j = C_h [K_n (\mu_h \cdot \cot\beta + 1) - 1] \quad (50)$$

sendo:

P_{nd} = pressão normal dinâmica à parede da tremonha (kN.m^{-2});

K_n = relação entre a pressão normal e vertical na tremonha (adimensional);

P_{vn} = pressão vertical dinâmica na tremonha (kN.m^{-2});

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

η = ângulo variável ($^\circ$);

β = ângulo da tremonha com a vertical ($^\circ$);

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

z' = ordenada com base no vértice da tremonha (m);

j = expoente da tremonha (adimensional);

P_{vet} = pressão vertical, atuando na transição após o enchimento (kN.m^{-2});

h_h = altura da tremonha, do eixo até transição (m);

ϕ_w = ângulo de atrito do produto com a parede ($^\circ$);

μ_h = coeficiente de atrito com a parede da tremonha (adimensional);

C_h = coeficiente de sobrepressão para pressões horizontais (adimensional), em que:

$C_h = 2$ para tremonhas cônicas ou piramidais;

$C_h = 1$ para tremonha em forma de cunha.

$$P_{id} = \mu_h \cdot P_{nd} \quad (51)$$

em que:

P_{id} = pressão de atrito vertical dinâmica, por unidade de perímetro da tremonha (kN.m^{-1});

μ_h = coeficiente de atrito com a parede da tremonha (adimensional);

P_{nd} = pressão normal dinâmica à parede da tremonha (kN.m^{-2}).

2.6 Silos multicelulares metálicos

2.6.1 Introdução

Com o aumento da competitividade, é necessário que as indústrias otimizem seu processo para que o tempo de preparação de seu produto seja o mínimo possível. Neste contexto, os silos multicelulares são uma alternativa viável de projeto.

No caso dos Estados Unidos e Europa, os silos metálicos prismáticos (retangulares ou quadrados) multicelulares são usados para a estocagem de grãos como maneira eficiente e econômica de armazenar vários tipos de produtos dentro de um mesmo silo. Estes silos são compostos por compartimentos internos, isolados por paredes, que permitem a separação de diversos tipos de produtos e facilitam a descarga, já que, por serem elevados, fornecem a dosagem durante o carregamento de caminhões (TIMM, 2002).

2.6.2 Sistema construtivo

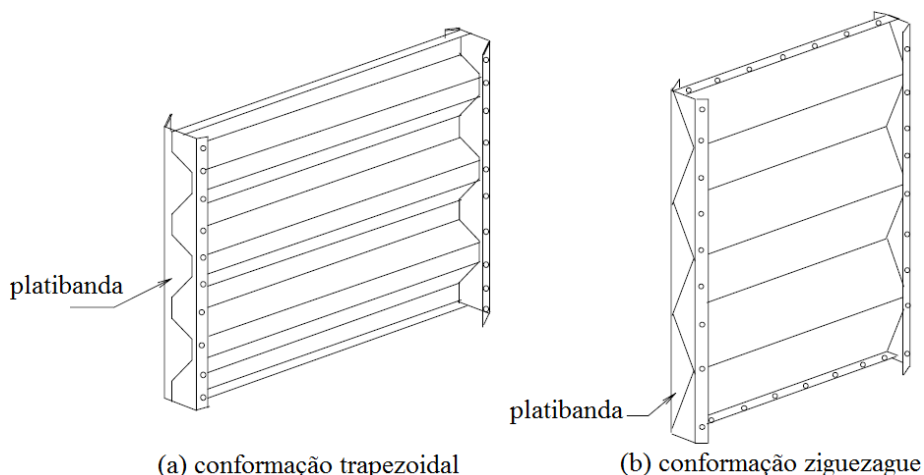
Os silos multicelulares prismáticos são construídos nas indústrias, onde há limitação territorial e se precisa do máximo de capacidade de armazenagem

com o mínimo de terreno. A mecanização é muito simples, basta colocar um transportador superior de carregamento e outro inferior de descarga, unidos por um elevador de canecas (CALIL JÚNIOR; CHEUNG, 2007). No caso de silo com descarga excêntrica nem é necessário o transportador inferior porque o mesmo irá acontecer diretamente em caminhões e trens.

De acordo com Ravenet (1990), o sistema de construção consiste numa pré-fabricação de painéis metálicos para as paredes pela indústria, que, mediante a conformação horizontal, ofereçam resistência suficiente às pressões exercidas pelos produtos armazenados. Não obstante as diversas soluções de conformação das paredes propostas até o momento, somente dois tipos progrediram e são utilizados nas construções de grandes silos:

Conformação trapezoidal: na Figura 18 (a) mostra-se o tipo de conformação com um ângulo na parede inclinada, variando de 45 a 60 graus. Para manter a rigidez da chapa dobrada, colocam-se platibandas soldadas em suas extremidades. Esse tipo de conformação é utilizado em silos para armazenamento de produtos granulares de fácil descarga;

Conformação ziguezague: na Figura 18 (b), tem-se o tipo de conformação com o ângulo da parede inclinada de 70 a 72 graus. Esse tipo de conformação é utilizado em silos para armazenamento de produtos pulverulentos coesivos.






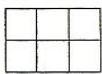

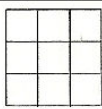
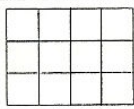



(a) conformação trapezoidal (b) conformação ziguezague
 Figura 18 Painéis utilizados em silos metálicos prismáticos industriais
 Fonte: Nascimento e Calil Júnior (1998)

Segundo Nascimento e Calil Júnior (1998), os painéis com conformação ziguezague apresentam uma série de vantagens construtivas e funcionais. A conformação dada aos painéis aumenta o momento de inércia e há diminuição da quantidade de material usado na fabricação. Também, oferece a possibilidade de construção modular. A principal vantagem de silos com paredes conformadas é a não utilização de enrijecedores horizontais, pois, em silos multicelulares, tal uso provocaria obstrução do fluxo do produto próximo às paredes. As obstruções favorecem a formação do fluxo de funil, que, em seu estado-limite último, provocaria a formação de arcos instáveis, produzindo impacto de grande massa de produto nas paredes e no fundo do silo.

Na Tabela 9, observa-se cada tipo de célula e seu respectivo coeficiente C , que é a relação entre o número de paredes e o número de células. Deve-se levar em consideração que uma parede interna é comum a duas células e, quanto maior o número de paredes internas, maior será a economia e menor o coeficiente C . O coeficiente é máximo para célula do tipo 1-1 (CALIL JÚNIOR; NASCIMENTO; ARAÚJO, 1997).

Tabela 9 Disposições construtivas dos silos multicelulares prismáticos

	1	2	3	4
1	 C=4	 C=3,5	 C=3,33	 C=3,25
2		 C=3	 C=2,83	 C=2,75
3			 C=2,67	 C=2,58
4				 C=2,5

Fonte: Calil Júnior, Nascimento e Araújo (1997)

As diversas vantagens de silos metálicos prismáticos multicelulares são: a praticidade na montagem de vários módulos em uma única estrutura; economia de espaço, já que uma única parede divide duas células (pois nos silos cilíndricos não tem o mesmo aproveitamento); pode-se realizar uma transilagem do produto armazenado no caso de existir problemas de aquecimento do produto; pode-se selecionar o produto a armazenar em célula específica em função das suas propriedades e a descarga de um silo multicelular efetua-se por gravidade. Cabe salientar que silos prismáticos multicelulares de paredes conformadas apresentam facilidade de construção já que suas paredes são dobradas e não curvadas como em outros modelos não exigindo, portanto, equipamentos industriais específicos para sua confecção.

Apesar das vantagens apresentadas, silos metálicos prismáticos multicelulares, ainda, são pouco utilizados no Brasil, parte em razão do simples desconhecimento de suas vantagens, parte em razão da escassez de conhecimento técnico necessário ao seu projeto e construção.

Segundo Brown e Nielsen (1998), o projeto e comportamento de silos retangulares ou quadrados são muito diferentes dos silos cilíndricos. A relação pressão-deslocamento, sua interação e importância no comportamento de silos prismáticos, ainda, são pouco compreendidas. Características as quais podem ser significantes para um projeto adequado de silos prismáticos são, frequentemente, negligenciadas em favor de projetos mais conservadores.

2.6.3 Sistema estrutural dos silos prismáticos

O comportamento estrutural de um silo prismático é muito distinto de um silo circular. A relação entre as pressões e os deslocamentos é, ainda, pouco conhecida, levando-se a dimensionamento algo conservativo dos silos prismáticos. Os silos prismáticos são apropriados até dimensões para d_c (diâmetro inscrito) de 4 a 5 metros (silos prismáticos com reforços). Assim, não se justifica a sua utilização, sendo melhor a opção pelos silos circulares.

Para uma mesma espessura das paredes, um silo prismático e um circular não apresentam a mesma capacidade resistente. Daí a necessidade de aumentar a rigidez da estrutura (prismática) por meio de reforços (ou nervuras de rigidez) (Figura 19). Neste tipo de silos se colocam as questões relativas ao tipo de fluxo do material (em massa ou em funil), bem como as da instabilidade (formação em arco ou em tubo). O tipo de fluxo preferível para os silos prismáticos é o de massa: existe uma maior probabilidade da retenção de material nos cantos, onde os fenômenos de corrosão seriam amplificados, caso tal acontecesse. Garantindo o fluxo em massa, o fenômeno de corrosão dos

cantos fica minimizado. Pela Figura 20 pode-se observar a seção que deve ser utilizada para evitar o fenômeno de corrosão nos cantos.

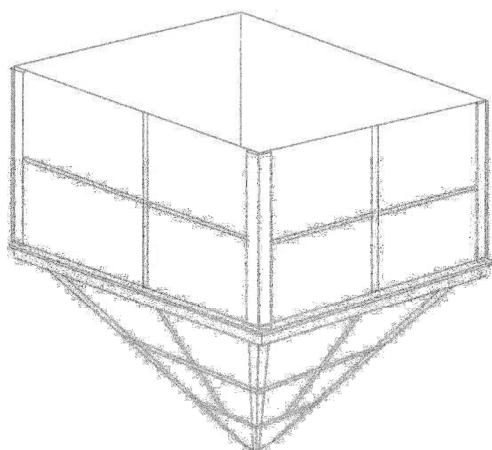


Figura 19 Silo prismático com reforços verticais e horizontais
Fonte: Brown e Nielsen (1998)

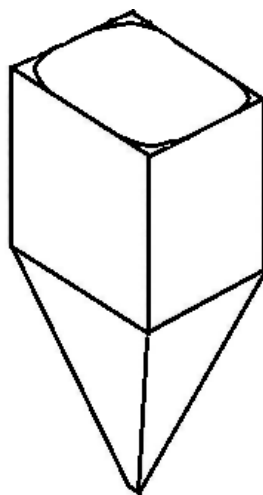
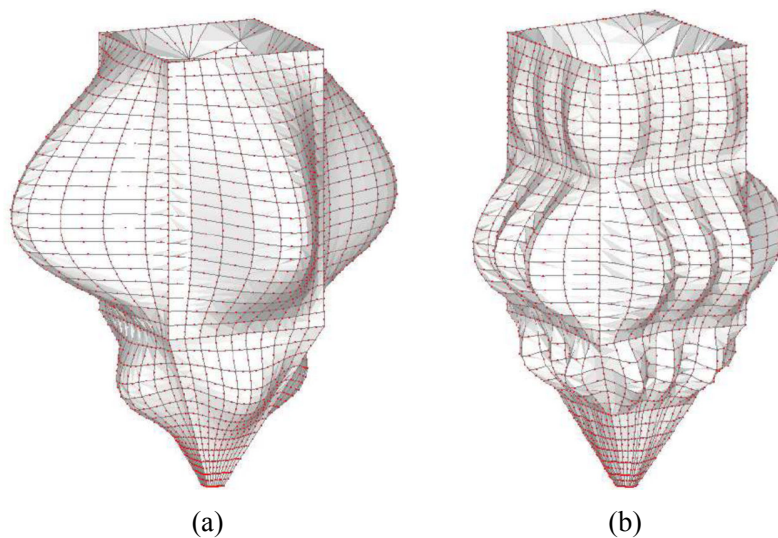


Figura 20 Silo retangular de cantos arredondados

Conforme Leite (2008), estudando silos de seção quadrada (3m x 3m), utilizando elementos finitos com uma malha quadrada de dimensão de 30 cm no

software ROBOT, considerando a mesma espessura dos painéis, foi visível a importância dos reforços para este tipo de estrutura, pois permitiu a redução significativa dos deslocamentos (Figura 21). A importância do reforço no silo prismático foi constatada na Figura 22, comparando os valores de tensão principais máximas (para as mesmas paredes do silo com a mesma combinação) no silo com reforços e sem reforço, representado para cada um dos nós da estrutura, no silo com paredes de 15 mm de espessura.



(a) (b)
Figura 21 Deformação no silo prismático, de seção quadrada: (a) silo sem reforço e (b) silo com reforço
Fonte: Leite (2008)

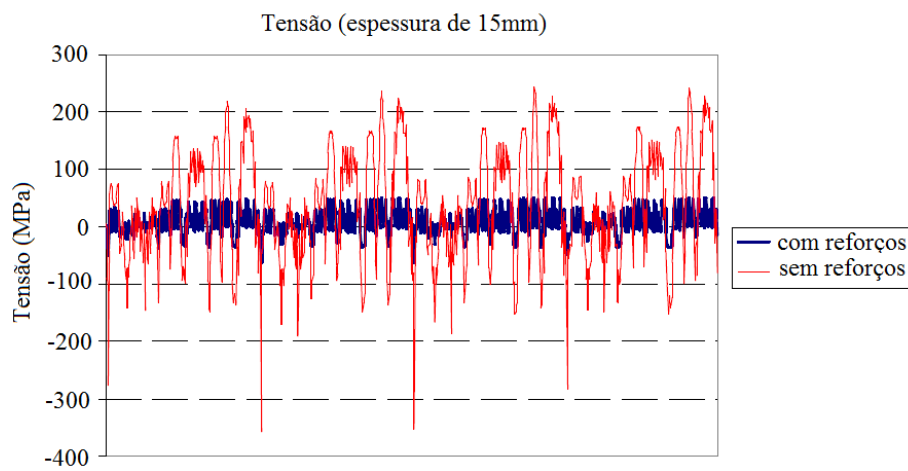


Figura 22 Tensões principais máximas em silo quadrado com e sem reforço (vertical e horizontal)

Fonte: Leite (2008)

3 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi estruturada em etapas:

1) Determinação da geometria para cinco silos com tremonha de formato tronco-piramidal considerando as seguintes excentricidades: 25%, 30%, 35% e 43% e concêntrico. Além das diferentes geometrias, para descarga excêntrica e concêntrica, foi simulado o fluxo de massa para milho, milho triturado e farelo de soja por se tratar de produtos com propriedades diferenciadas. Sendo o milho classificado como produto granular, o milho triturado como produto pulverulento coesivo, enquanto o farelo de soja é um produto pulverulento.

2) Cálculo das pressões em silos esbeltos prismáticos com descarga excêntrica conforme a formulação das principais normas (AS, 1996; BS EN, 2006; DIN, 2005) e teorias de Safarian (1969) e Walker (1966).

3) Desenvolvimento do programa computacional, em linguagem Delphi, para determinação das pressões em silos verticais esbeltos com tremonha excêntrica, segundo as normas analisadas e teorias de Safarian (1969) e Walker (1966).

3.1 Determinação da geometria do silo

3.1.1 Caracterização do produto

Para a avaliação das pressões, em razão do produto armazenado, foram utilizados os valores das propriedades físicas (Tabela 10), obtidos por Lopes Neto e Nascimento (2013). Os autores determinaram as propriedades físicas, utilizando o aparelho de cisalhamento direto translacional e metodologia descrita pela British Materials Handling Board - BMHB (1985), visando à obtenção das

propriedades instantâneas de fluxo em condição de temperatura ambiente (24°C) e umidade relativa do ar de 67%.

Tabela 10 Propriedades física dos produtos

Produto	Peso específico		Ângulo de atrito interno		Efetivo ângulo de atrito interno		Ângulo de atrito do produto com a parede (aço rugoso)		Fluidez <i>ff</i>	Teor de umidade T.U. (%)
	γ_i (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	ϕ_{ii} (°)	ϕ_{is} (°)	ϕ_{ei} (°)	ϕ_{es} (°)	ϕ_{wi} (°)	ϕ_{ws} (°)		
Milho	7,40	7,41	21,10	22,90	23,90	25,00	13,20	15,80	13,6	8,5
Milho triturado	7,44	7,64	25,30	33,30	34,30	38,80	23,00	23,90	3,8	6,6
Farelo de soja	6,56	6,64	32,80	35,10	34,10	35,50	23,40	25,00	54,3	6,5

Nota: γ_i = peso específico do produto armazenado inferior, γ_s = peso específico do produto armazenado superior, ϕ_{ii} = ângulo de atrito interno inferior, ϕ_{is} = ângulo de atrito interno superior, ϕ_{ei} = efetivo ângulo de atrito interno inferior, ϕ_{es} = efetivo ângulo de atrito interno superior, ϕ_{wi} = ângulo de atrito com a parede inferior, ϕ_{ws} = ângulo de atrito com a parede superior, *ff* = fluidez e T.U. = teor de umidade.

Fonte: Lopes Neto e Nascimento (2013)

Tomando como base os valores do coeficiente de atrito com a parede da tremonha (μ_h), recomendados pelas normas internacionais, adotou-se $\mu_{h(\text{milho})} = 0,36$, $\mu_{h(\text{milho triturado})} = 0,28$ e $\mu_{h(\text{farelo de soja})} = 0,33$ e o ângulo de repouso (ϕ_r) adotando-se $\phi_{r(\text{milho})} = 30^\circ$, $\phi_{r(\text{milho triturado})} = 28^\circ$ e $\phi_{r(\text{farelo de soja})} = 25^\circ$.

3.1.2 Geometria do silo

A estrutura do silo analisada é prismática quadrada, confeccionada em aço e composta por chapas corrugadas nas paredes e lisas nas tremonhas. Nas situações estudadas, foram consideradas as excentricidades com base em uma tremonha tronco piramidal.

Os silos prismáticos, estudados neste trabalho, normalmente, são empregados em silos multicelulares que, por sua vez, podem armazenar um produto diferente em cada célula. Para o cálculo dimensional dos cinco silos prismáticos, foi adotada uma capacidade de 100 t de produto. A capacidade da célula adotada trata do limite entre a classe de avaliação das ações para as normas EUROCODE e DIN, podendo, assim, ser observado o comportamento das pressões nas classes 1 ou 2 e 3 (Tabela 8).

Para o cálculo das pressões, foi adotada uma inclinação de tremonha determinada pela equação sugerida por McLean (1986), para garantir o fluxo de massa nos cinco silos com tremonha (milho, milho triturado e farelo de soja):

$$\beta_{\text{crit}} = 0,5 \cdot \left[180 - \cos^{-1} \left(\frac{1 - \text{sen} \phi_e}{2 \cdot \text{sen} \phi_e} \right) - \left(\phi_w + \text{sen}^{-1} \frac{\text{sen} \phi_w}{\text{sen} \phi_e} \right) \right] \quad (52)$$

sendo:

β_{crit} = ângulo crítico da tremonha com a vertical ($^\circ$);

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

ϕ_w = ângulo de atrito do produto com a parede (°).

Os ângulos críticos calculados entre a parede da tremonha com a vertical (β_{crit}) para cada produto foram de: $\beta_{crit}(\text{milho}) = 34^\circ$, $\beta_{crit}(\text{milho triturado}) = 27^\circ$ e $\beta_{crit}(\text{farelo de soja}) = 25^\circ$. Como se trata de células quadradas, utilizadas em silos multicelulares, adotou-se a situação mais desfavorável de 25° . Essa escolha atende aos três produtos, dada a maior inclinação da parede da tremonha, o que possibilita garantir o fluxo de massa.

Em função dos diferentes pesos específicos apresentados pelos produtos na Tabela 10, foram determinadas as dimensões para cada produto estudado, tomando como referência o farelo de soja (Tabelas 11 a 15).

Para fins de análise, foram adotadas cinco geometrias: silo com tremonha concêntrica e silos com tremonha excêntrica. Para o silo com tremonha concêntrica, aplicaram-se as metodologias de cálculo propostas pelas normas analisadas. A segunda geometria corresponde a um silo com tremonha excêntrica, ou seja, são tremonhas com a relação e_0/a (excentricidade da boca de descarga/largura da parede do corpo do silo) de 25%, 30%, 35% e 43% de excentricidade (Figuras 23 e 24). A escolha da geometria excêntrica permite o estudo de Safarian (1969), abordado no item 2.3.3, adotada pela norma ACI (1977).

A altura efetiva do silo (H) foi determinada, considerando a norma AS 3774, onde está prescrita que para silos prismáticos a altura equivalente é resultante da soma da metade da altura do repouso (h_{tp}), a altura do corpo do silo (h_c) e a altura da tremonha (h_i).

Os cinco silos estudados são classificados como esbeltos, de acordo com as três normas analisadas cuja relação H/a é dada nas Tabelas de 11 a 15. A Tabela 11 contém as dimensões do silo com tremonha concêntrica, cuja ilustração está na Figura 23.

Tabela 11 Dimensões do silo com tremonha concêntrica

	a (m)	H (m)	h_t (m)	h_h (m)	h_{tp} (m)	e_o (m)	b_f (m)	β_{crit} (°)	h_c (m)	H/a
Milho	3,0	17,05	2,8	3,2	0,9	0,0	0,4	25	13,8	5,7
Milho Triturado	3,0	16,70	2,8	3,2	0,8	0,0	0,4	25	13,5	5,6
Farelo de soja	3,0	18,75	2,8	3,2	0,7	0,0	0,4	25	15,6	6,3

Nota: a = largura da parede da célula do silo, H = altura efetiva do silo (da boca de saída à superfície equivalente), h_t = altura da tremonha, h_h = altura da tremonha (do seu eixo até a transição), h_{tp} = altura do repouso do produto armazenado, e_o = excentricidade da boca de descarga, b_f = largura da boca de saída, β_{crit} = ângulo crítico da tremonha com a vertical, h_c = altura do corpo do silo.

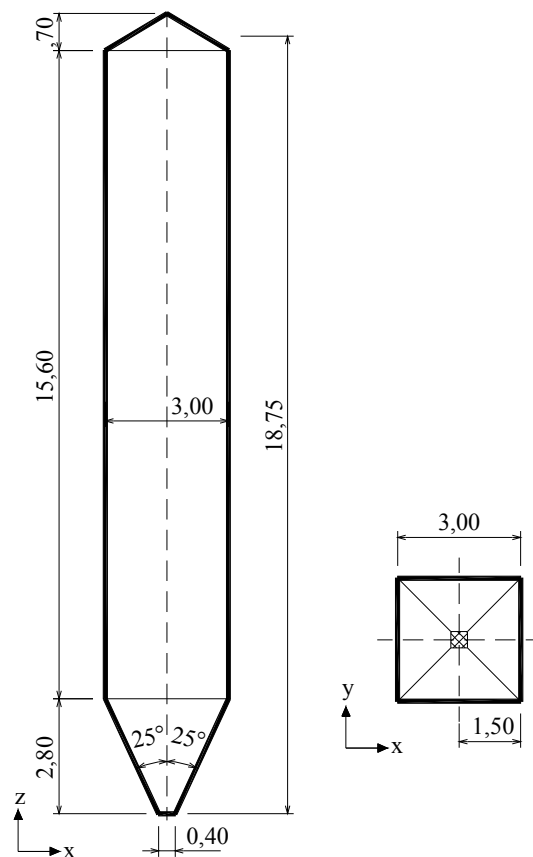


Figura 23 Desenho esquemático e dimensões, em metros, do silo com tremonha concêntrica. Unidade: metros

Nas Tabelas de 12 a 15 são apresentadas as dimensões dos silos com tremonha excêntrica, cujo desenho esquemático está ilustrado nas Figuras 24 e 25.

Tabela 12. Dimensões do silo com 25% de excentricidade na tremonha

	a (m)	H (m)	h_t (m)	h_h (m)	h_{tp} (m)	e_o (m)	b_f (m)	β_{crit} (°)	β (°)	h_c (m)	H/a
Milho	3,0	18,05	4,4	5,1	0,9	0,75	0,4	25	7	13,2	6,0
Milho Triturado	3,0	17,80	4,4	5,1	0,8	0,75	0,4	25	7	13,0	5,9
Farelo de soja	3,0	19,85	4,4	5,1	0,7	0,75	0,4	25	7	15,1	6,6

Nota: a = largura da parede da célula do silo, H = altura efetiva do silo (da boca de saída à superfície equivalente), h_t = altura da tremonha, h_h = altura da tremonha (do seu eixo até a transição), h_{tp} = altura do repouso do produto armazenado, e_o = excentricidade da boca de descarga, b_f = largura da boca de saída, β_{crit} = ângulo crítico da tremonha com a vertical, β = ângulo da tremonha com a vertical, h_c = altura do corpo do silo.

Tabela 13 Dimensões do silo com 30% de excentricidade na tremonha

	a (m)	H (m)	h_t (m)	h_h (m)	h_{tp} (m)	e_o (m)	b_f (m)	β_{crit} (°)	β (°)	h_c (m)	H/a
Milho	3,0	18,25	4,7	5,43	0,9	0,90	0,4	25	5	13,1	6,1
Milho Triturado	3,0	18,00	4,7	5,43	0,8	0,90	0,4	25	5	12,9	6,0
Farelo de soja	3,0	20,05	4,7	5,43	0,7	0,90	0,4	25	5	15,0	6,7

Nota: a = largura da parede da célula do silo, H = altura efetiva do silo (da boca de saída à superfície equivalente), h_t = altura da tremonha, h_h = altura da tremonha (do seu eixo até a transição), h_{tp} = altura do repouso do produto armazenado, e_o = excentricidade da boca de descarga, b_f = largura da boca de saída, β_{crit} = ângulo crítico da tremonha com a vertical, β = ângulo da tremonha com a vertical, h_c = altura do corpo do silo.

Tabela 14 Dimensões do silo com 35% de excentricidade na tremonha

	a (m)	H (m)	h_t (m)	h_h (m)	h_{tp} (m)	e_o (m)	b_f (m)	β_{crit} (°)	β (°)	h_c (m)	H/a
Milho	3,0	18,65	5,3	6,1	0,9	1,05	0,4	25	3	12,9	6,2
Milho Triturado	3,0	18,40	5,3	6,1	0,8	1,05	0,4	25	3	12,7	6,1
Farelo de soja	3,0	20,45	5,3	6,1	0,7	1,05	0,4	25	3	14,8	6,8

Nota: a = largura da parede da célula do silo, H = altura efetiva do silo (da boca de saída à superfície equivalente), h_t = altura da tremonha, h_h = altura da tremonha (do seu eixo até a transição), h_{tp} = altura do repouso do produto armazenado, e_o = excentricidade da boca de descarga, b_f = largura da boca de saída, β_{crit} = ângulo crítico da tremonha com a vertical, β = ângulo da tremonha com a vertical, h_c = altura do corpo do silo.

Tabela 15 Dimensões do silo com 43% de excentricidade na tremonha

	a (m)	H (m)	h_t (m)	h_h (m)	h_{tp} (m)	e_o (m)	b_f (m)	β_{crit} (°)	h_c (m)	H/a
Milho	3,0	18,95	5,6	6,5	0,9	1,3	0,4	25	12,9	6,3
Milho Triturado	3,0	18,60	5,6	6,5	0,8	1,3	0,4	25	12,6	6,2
Farelo de soja	3,0	20,65	5,6	6,5	0,7	1,3	0,4	25	14,7	6,9

Nota: a = largura da parede da célula do silo, H = altura efetiva do silo (da boca de saída à superfície equivalente), h_t = altura da tremonha, h_h = altura da tremonha (do seu eixo até a transição), h_{tp} = altura do repouso do produto armazenado, e_o = excentricidade da boca de descarga, b_f = largura da boca de saída, β_{crit} = ângulo crítico da tremonha com a vertical, h_c = altura do corpo do silo.

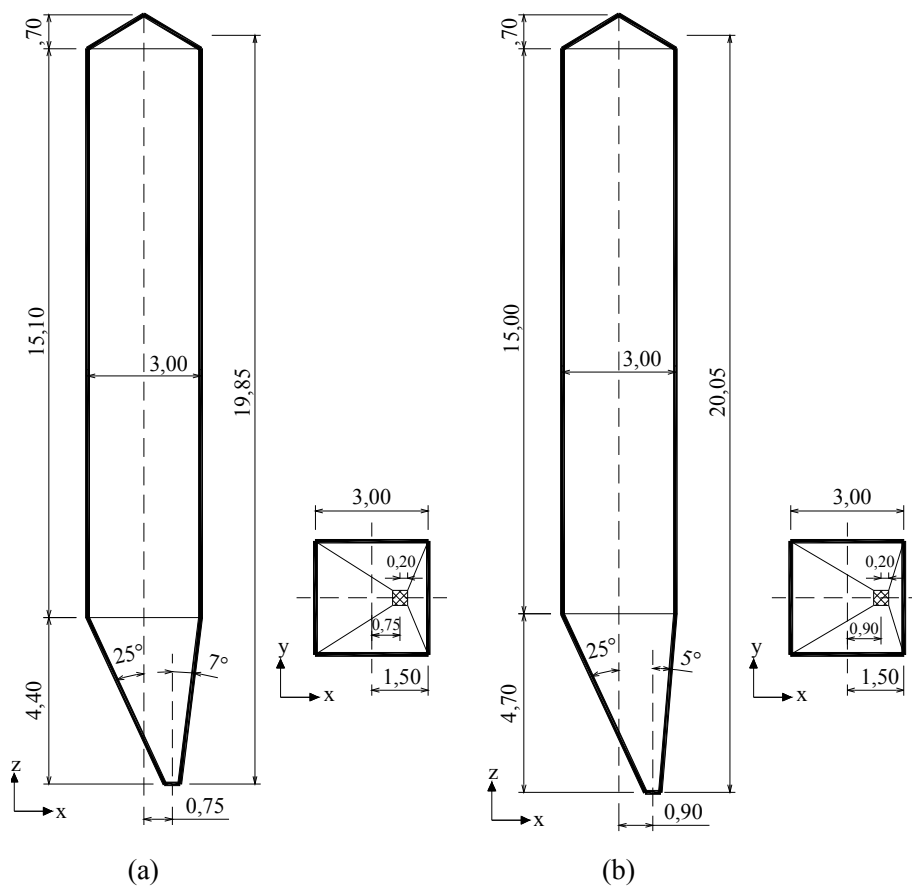


Figura 24 Desenho esquemático e dimensões, em metros, dos silos com tremonha excêntrica: (a) 25% de excentricidade e (b) 30% de excentricidade. Unidade: metros

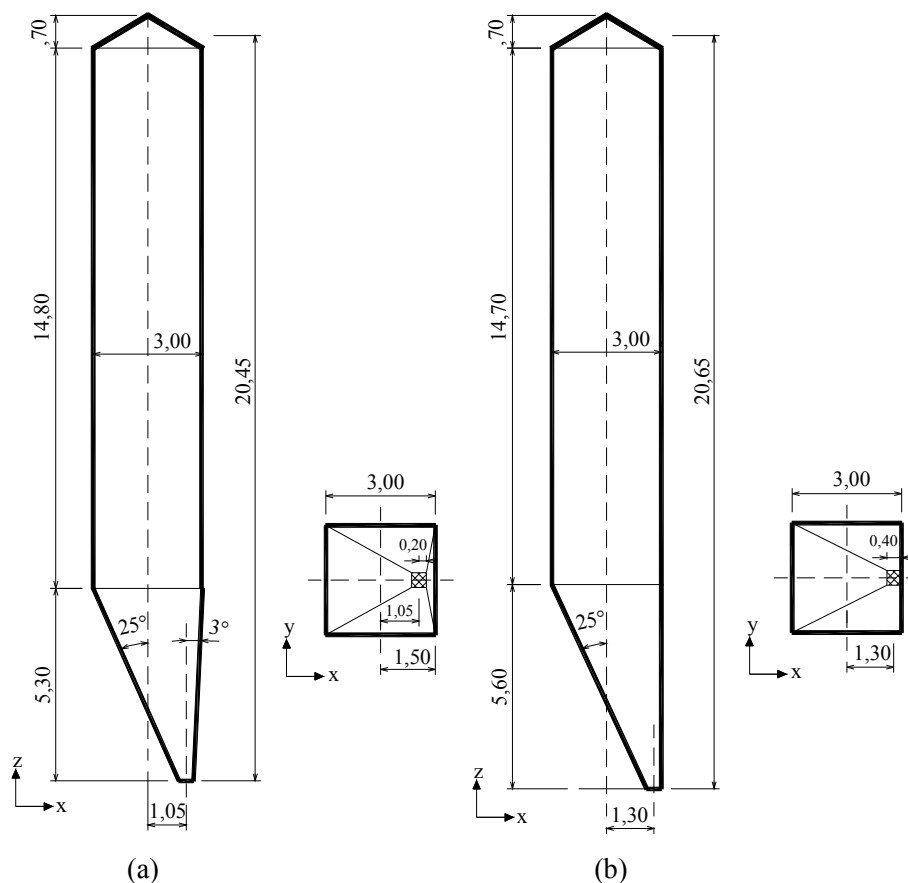


Figura 25 Desenho esquemático e dimensões, em metros, dos silos com tremonha excêntrica: (a) 35% de excentricidade e (b) 43% de excentricidade. Unidade: metros

3.2 Cálculo das pressões

Foram calculadas as pressões horizontais e de atrito em silos esbeltos prismáticos (quadrados) com descarga excêntrica conforme a formulação das principais normas (AS, 1996; BS EN, 2006; DIN, 2005) e teorias de Safarian (1969) e Walker (1966), possibilitando compará-las.

3.2.1 Pressão no corpo do silo

a) Pressão estática (ou carregamento)

As normas analisadas adotam as equações propostas por Janssen (1895) para cálculo das pressões estáticas apresentada na Tabela 16.

b) Pressão dinâmica (ou descarregamento)

As normas, de uma forma geral, utilizam coeficientes de sobrepressão (ou majoração), aplicados às pressões estáticas para a determinação das pressões dinâmicas apresentada na Tabela 17.

Tabela 16 Pressões estáticas (ou carregamento)

Normas	Pressões estáticas (P_e)			P_e (simétrica) μ, γ e K^{*1}		P_e adicional (excêntrica)				Silo não circular
	P_{ve}	P_{he}	P_{we}	Médio	Inf. e Sup.*2	P_{pe}	C_{pe}	E	C_{op}	$P_{pe,nc}$
Classe 1: EUROCODE DIN				x		$P_{pe} = C_{pe} \cdot P_{he}$ $C_{pe} = 0,21 C_{op} [1+2E^2] (1 - e^{\{-1.5 [(hc/dc)-1]\}})$ $E = 2 e_l/d_c$ C_{op} = varia em função do tipo de produto				
Classe 2 e 3: EUROCODE DIN	$P_{ve}(z) = \frac{\gamma \cdot R}{\mu \cdot K} \left[1 - e^{-\frac{\mu \cdot K \cdot z}{R}} \right]$				x					0,36 P_{pe}
	$P_{he}(z) = K \cdot P_{ve}(z)$									
AS	$P_{we}(z) = \mu \cdot P_{he}(z)$				x					
Safarian				x						

*1 Tabela 7 (Parâmetro K).

*2 Conforme Tabela 3.

Nota: P_{ve} = pressão vertical estática, P_{he} = pressão horizontal estática, P_{we} = pressão de atrito vertical estática, μ = coeficiente de atrito do produto com a parede, γ = peso específico do produto armazenado, K = relação entre pressão horizontal e vertical, P_{pe} = pressão adicional estática, C_{pe} = coeficiente de pressão adicional estática, E = relação entre a excentricidade do canal de fluxo (e) e o diâmetro inscrito (d_c), C_{op} = coeficiente do produto armazenado, $P_{pe,nc}$ = pressão adicional estática para silos não circulares.

Tabela 17 Pressões dinâmicas (ou descarregamento)

Normas	Pressões dinâmicas simétricas (P_d)		Coeficiente de sobrepressão		Coef. de geometria do fluxo	P_d adicional (excêntrica)			Silo não circular	
	P_{hd}	P_{wd}	C_h	C_w	C_c	P_{pd}	C_{pd}	E	C_{op}	$P_{pd,nc}$
Classe 1: EUROCODE DIN			$C_h = 1,15 + 1,5 (1 + 0,4 e/d_c) \cdot C_{op}$ $C_w = 1,4 (1 + 0,4 e/d_c)$							
Classe 2 e 3: EUROCODE DIN	$P_{hd}(z) = C_h \cdot P_{he}(z)$	$P_{wd}(z) = C_w \cdot P_{we}(z)$	1,15	1,1		$P_{pd} = C_{pd} \cdot P_{hd}$ Para $h_c/d_c > 1,2$, C_{pd} é dado pela equação (29) $C_{pd} = 0,42 C_{op} [1 + 2E^2] (1 - \exp\{-1,5 [(h_c/d_c) - 1]\})$ Para $h_c/d_c \leq 1,2$, C_{pd} é dada pelo maior dos valores indicados pelas equações 29, 30 e 31				0,36 P_{pd}
						$C_{pd} = 0,272 C_{op} \{(h_c/d_c) - 1 + E\}$ (30) $C_{pd} = 0$ (31) $E = 2 \cdot e/d_c$ C_{op} = varia em função do tipo de produto				
AS			Eq. (42 ou 43)	1,2 ou 1,4	1,0 ou 1,2					
Safarian	$P_{hd} = C_d \cdot P_{he} + \frac{Z}{H-a} \cdot p$		Tabela 5 (C_d)*							
	$P_{wd}(z) = \mu \cdot P_{hd}(z)$									

* Para descarregamento com fluxo de massa os valores da Tabela 5 deverão ser acrescidos de 10 a 25%.

Nota: P_{hd} = pressão horizontal dinâmica, P_{wd} = pressão de atrito vertical dinâmica, C_h = coeficiente de sobrepressão para pressões horizontais, C_w = coeficiente de sobrepressão para pressão de atrito, C_c = coeficiente de geometria do produto, P_{pd} = pressão adicional dinâmica, C_{pd} = coeficiente de pressão adicional dinâmica, E = relação entre a excentricidade do canal de fluxo (e) e o diâmetro inscrito (d_c), C_{op} = coeficiente do produto armazenado, $P_{pd,nc}$ = pressão adicional dinâmica para silos não circulares.

3.2.2 Pressão na tremonha

Nas normas EUROCODE e DIN (método alternativo), as pressões normais à tremonha foram calculadas pela soma dos carregamentos, considere, então, o carregamento da tremonha e os carregamentos resultantes da sobrecarga vertical diretamente acima da transição. Em silos com fluxo de massa, uma pressão normal adicional (P_s) foi aplicada na transição do corpo do silo com a tremonha. São apresentadas na Tabela 18, de forma resumida, as prescrições, conforme as normas analisadas e teoria que foram analisadas.

Tabela 18 Pressões sobre a parede da tremonha

Normas	Pressões estáticas (P_e)					Pressão de atrito	Pressão na transição
	P_{n1}	P_{n2}	P_{n3}	P_n	C_b ou C_h	P_t	P_s
Classe 1: EUROCODE DIN	$P_{n1} = P_{vet} \cdot (C_b \cdot \text{sen}^2\beta + \text{cos}^2\beta)$				C_b 1,3 (livre) ou 1,6 (coesivo)	$P_t = \mu_h \cdot P_n$ $P_s = 2 \cdot K \cdot P_{vet}$ (Silos com fluxo de massa)	
Classe 2 e 3: EUROCODE DIN	$P_{n2} = P_{vet} \cdot C_b \cdot \text{sen}^2\beta$	$P_{n3} = 3,0 \cdot R \cdot (\gamma \cdot K / \sqrt{\mu_h}) \cdot \text{cos}^2\beta$	$P_n = P_{n3} + P_{n2} + (P_{n1} - P_{n2}) \cdot x/l_h$				
AS		$P_n = K_n \cdot P_{vn}$		C_h 2 (cônica ou piramidal) ou 1 (forma de cunha)		$P_t = \mu_h \cdot P_n$	
Pressão estática:							
Walker	<u>1º caso:</u> Se $\text{sen}\phi_e \geq \frac{\text{sen}\phi_w}{1 - \text{sen}(\phi_w + 2\beta)}$, as pressões na tremonha são dadas por:						Pressão dinâmica:
	$P_{ne} = \gamma \cdot z \cdot \frac{\tan(\beta)}{\tan(\beta) + \tan(\phi_w)}$ e $P_{te} = P_{ne} \cdot \tan\phi_w = P_{ne} \cdot \mu_h$					$P_{nd} = F_d \cdot P_{vn}$	
	<u>2º caso:</u> Se $\text{sen}\phi_e \leq \frac{\text{sen}\phi_w}{1 - \text{sen}(\phi_w + 2\beta)}$, as pressões na tremonha são dadas por:						
	$P_{ne} = \gamma \cdot z \cdot \frac{1 - \text{sen}(\phi_e) \cdot \text{cos}(2\beta)}{1 + \text{sen}(\phi_e)}$ e $P_{te} = \gamma \cdot z \cdot \frac{\text{sen}(\phi_e) \cdot \text{sen}(2\beta)}{1 + \text{sen}(\phi_e)}$						

Nota: 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, C_b = coeficiente de sobrepressão para tremonha, C_h = coeficiente de sobrepressão para pressões horizontais, P_t = pressão de atrito vertical, por unidade de perímetro da tremonha, P_s = pressão aplicada na transição em silos com fluxo de massa.

3.3 Desenvolvimento do programa computacional

Um programa computacional foi desenvolvido para sistematizar os procedimentos de cálculos das pressões em silos esbeltos, de seção quadrada, com tremonha excêntrica, conforme o fluxograma ilustrado na Figura 26.

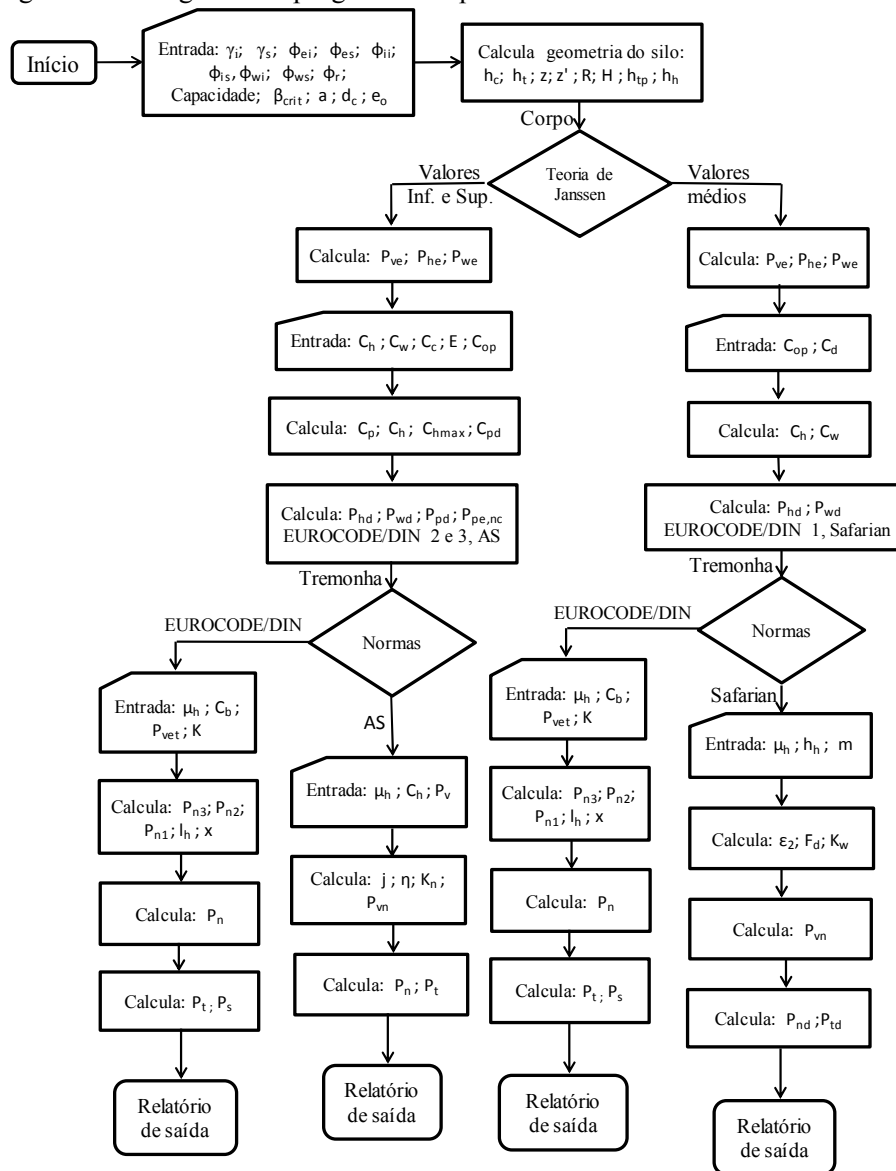
Para a determinação das pressões em razão do produto armazenado, tomaram-se como base as formulações das normas estudadas e teorias de Safarian (1969) e Walker (1966). Foi desenvolvido um programa computacional escrito no Ambiente de Desenvolvimento Delphi, denominado de SILOEXCENTRIC.

A estrutura do programa baseia-se em uma primeira tela com a entrada de dados das propriedades físicas dos produtos armazenados; na segunda tela com a entrada de dados da capacidade e as características geométricas do silo. A terceira tela tem-se a entrada de dados dos coeficientes para o corpo do silo e tremonha, de acordo com as normas estudadas e a teoria de Safarian (1969).

Na quarta tela do programa são apresentados os cálculos das pressões em função do produto armazenado para silos com tremonha concêntrica e excêntrica (25%, 30%, 35% e 43%) com fluxo de massa. A estimativa do padrão de fluxo foi realizada pelo equacionamento proposto por McLean (1986).

A saída de dados é realizada por meio da apresentação dos resultados (pressões) na forma de tabelas e, também, na forma gráfica.

Figura 26 Fluxograma do programa computacional



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Pressão horizontal estática no silo

Para análise conjunta das Figuras 27 a 31, observa-se que a pressão horizontal estática média para o milho é superior à pressão horizontal para o milho triturado, que, por sua vez, é maior que a pressão horizontal do farelo de soja, tanto para o corpo do silo quanto para a tremonha, conforme listado na Tabela 19. Isso se deve, principalmente, ao produto milho apresentar ângulo de atrito mais baixo e peso próprio maior, o que acarreta maiores pressões horizontais.

Tabela 19 Diferenças (%) das pressões horizontais estáticas médias entre os produtos analisados para o corpo do silo e a tremonha

Partes do silo	Produtos	Diferença de pressão (%)
Corpo do silo	Milho/Milho triturado	13%
	Milho triturado/Farelo de soja	20%
	Milho/Farelo de soja	31%
EUROCODE/ DIN	Milho/Milho triturado	13%
	Milho triturado/Farelo de soja	20%
	Milho/Farelo de soja	31%
Tremonha	Milho/Milho triturado	18%
	Walker Milho triturado/Farelo de soja	14%
	Milho/Farelo de soja	29%

No corpo do silo, as pressões horizontais estáticas são coincidentes entre as normas EUROCODE e DIN para a Classe 1 e a Classe 2 e 3. As normas EUROCODE e DIN não apresentaram pressões maiores por se considerar o

carregamento simétrico, o que propicia a não adoção de coeficientes de sobrepressão.

As três normas utilizadas e a teoria de Safarian se baseiam nas deduções de Janssen para a predição da pressão estática no corpo do silo. As normas resultam, na maioria das vezes, em valores superiores em razão do emprego de fatores como formulação utilizada no cálculo do parâmetro K , combinações com as propriedades físicas, para obter os carregamentos máximos e adoção de pressões adicionais em alguns casos (PALMA; CALIL JÚNIOR, 2008).

Com as pressões horizontais estáticas calculadas no fundo do corpo do silo com saída excêntrica, observam-se valores médios iguais a 21,11 kN.m^{-2} para o milho, 13,33 kN.m^{-2} para o milho triturado e 11,00 kN.m^{-2} para o farelo de soja. Esses valores foram em média 1% inferiores aos valores observados nos silos com saída concêntrica cujos valores médios são iguais a 21,39 kN.m^{-2} para o milho, 13,53 kN.m^{-2} para o milho triturado e 11,13 kN.m^{-2} para o farelo de soja, pelas normas e teoria de Safarian (1969).

Para as pressões horizontais estáticas calculadas na transição das tremonhas excêntricas observam-se valores médios iguais a 45,32 kN.m^{-2} para o milho, 39,36 kN.m^{-2} para o milho triturado e 31,56 kN.m^{-2} para o farelo de soja. Esses valores foram em média 12% superiores à tremonha concêntrica com valores médios iguais a 40,02 kN.m^{-2} para o milho, 34,57 kN.m^{-2} para o milho triturado e 27,71 kN.m^{-2} para o farelo de soja, pelas normas EUROCODE e DIN.

A comparação realizada entre os silos com saída concêntrica e excêntrica se deve ao fato de não ter nenhuma pesquisa com silos prismáticos com saída excêntrica.

A teoria de Safarian é a que apresentou menores valores de pressões, em média, para todos os produtos, seguido das normas AS 3774 e EUROCODE/DIN da Classe 1, que é menor à pressão média da

EUROCODE/DIN da Classe 2 e 3, conforme apresentado na Tabela 20, localizada no fundo do corpo do silo.

Tabela 20 Diferenças (%) das pressões horizontais estáticas médias entre as normas, com saída concêntrica e excêntrica, para os produtos analisados

Concêntrica					
Produtos	Normas (kN.m⁻²)				
	Safarian	AS		EUROCODE/DIN	
			EUROCODE/DIN (Classe 1)		(Classe 2 e 3)
Milho	18,96	9%	20,81	11%	23,32
Milho triturado	11,73	9%	12,85	17%	15,43
Farelo de soja	10,17	7%	10,91	8%	11,90
Excêntrica					
Produtos	Normas (kN.m⁻²)				
	Safarian	AS		EUROCODE/DIN	
			EUROCODE/DIN (Classe 1)		(Classe 2 e 3)
Milho	18,57	10%	20,64	11%	23,07
Milho triturado	11,36	11%	12,71	17%	15,25
Farelo de soja	9,90	9%	10,83	8%	11,81

Madrona e Calil Júnior (2009), no cálculo para silos cilíndricos com tremonha concêntrica, obtiveram pressão horizontal estática para a soja superior à pressão horizontal estática com o farelo de soja, tanto no corpo quanto na tremonha do silo. Na transição, as pressões dadas pelas normas (EUROCODE, DIN, AS e ISO) são em média iguais a 28 kN.m⁻² para o farelo de milho e 32 kN.m⁻² para a soja.

Com o emprego da teoria de Walker (1966), as tremonhas excêntricas apresentaram, em média, valores de pressões horizontais estáticas iguais a 71,08 kN.m⁻² para o milho, 58,27 kN.m⁻² para o milho triturado e 50,14 kN.m⁻² para o

farelo de soja. Esses valores foram em média 5% menores em relação à tremonha concêntrica que apresentou valores médios iguais a 74,57 kN.m⁻² para o milho, 61,14 kN.m⁻² para o milho triturado e 52,60 kN.m⁻² para o farelo de soja. Entre as diferentes excentricidades para um mesmo produto não se constatou diferença na pressão horizontal estática.

No cálculo das pressões horizontais estáticas na tremonha são foram observados valores superiores, quando adotada a teoria de Walker (1966), por adotar a profundidade com base na superfície equivalente do silo. Conforme constatado por Gaylord Junior e Gaylord (1984), a teoria de Walker (1966) superestima as pressões iniciais na tremonha. Palma (2005) obteve, utilizando a teoria de Walker (1966), valores superiores em torno de 50% à teoria de Jenike, para as pressões horizontais em silos cilíndricos, em aço, com tremonha cônica para os produtos painço e soja.

Na Tabela 21 são comparadas as pressões horizontais estáticas médias na transição da tremonha, obtidas com a teoria de Walker (1966), em relação às normas EUROCODE e DIN.

Tabela 21 Diferenças (%) das pressões horizontais estáticas na transição da tremonha: teoria de Walker (1966) *versus* EUROCODE/DIN

Tremonhas		Produtos	Diferença de pressão (%)
Concêntricas		Milho	46%
		Milho triturado	43%
		Farelo de soja	48%
Excêntricas	Excentricidades: 25% e 30%	Milho	37%
		Milho triturado	33%
		Farelo de soja	38%
	Excentricidades: 35% e 43%	Milho	35%
		Milho triturado	32%
		Farelo de soja	36%

Nas Figuras 27 a 31, são apresentadas as curvas de pressões horizontais estáticas conforme as normas e teorias para os três produtos analisados.

a) Silo com tremonha concêntrica

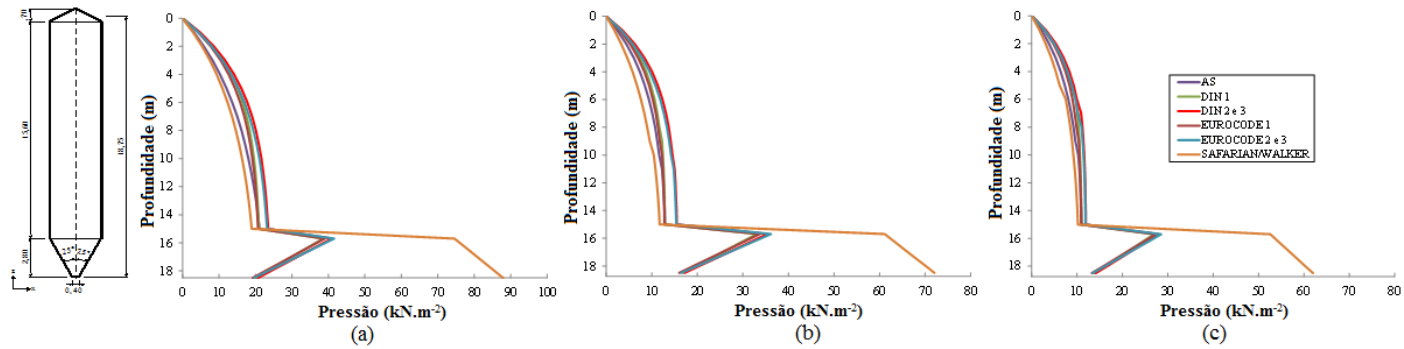


Figura 27 Pressão horizontal estática (ou carregamento) no silo com tremonha concêntrica para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja

b) Silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 25\%$)

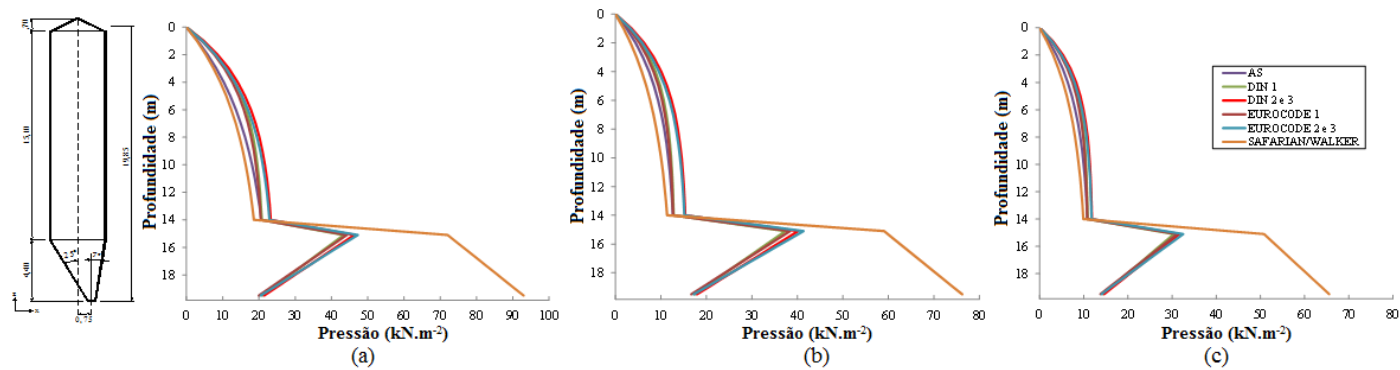


Figura 28 Pressão horizontal estática (ou carregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 25\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja

c) Silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 30\%$)

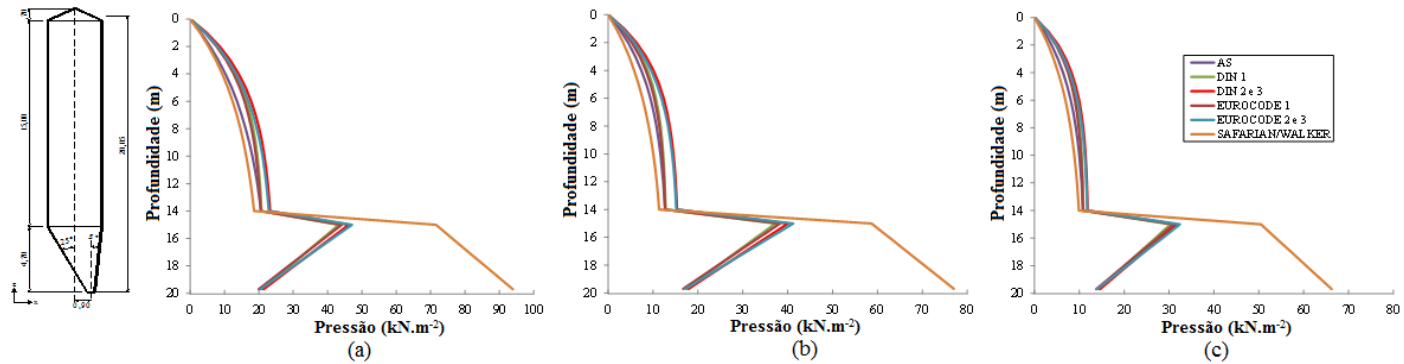


Figura 29 Pressão horizontal estática (ou carregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 30\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja

d) Silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 35\%$)

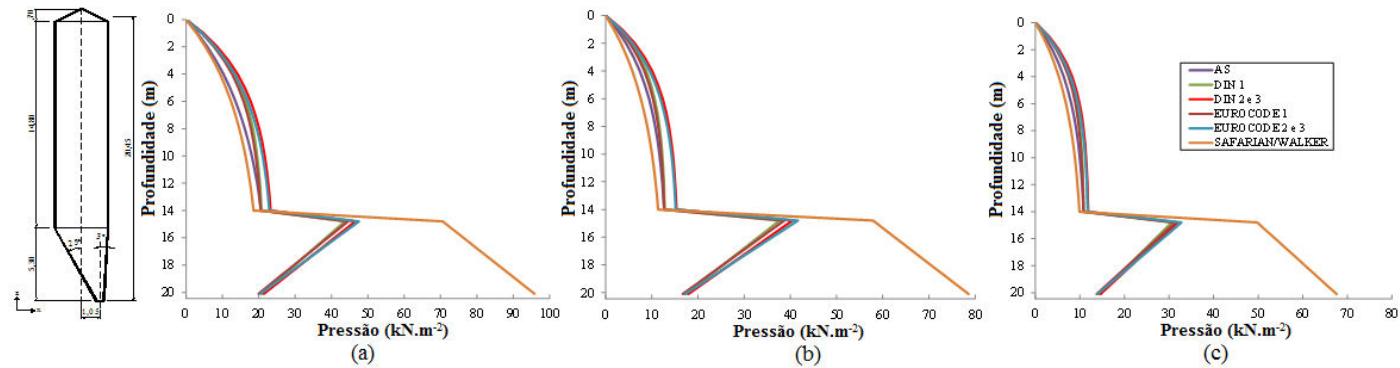


Figura 30 Pressão horizontal estática (ou carregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 35\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja

e) Silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 43\%$)

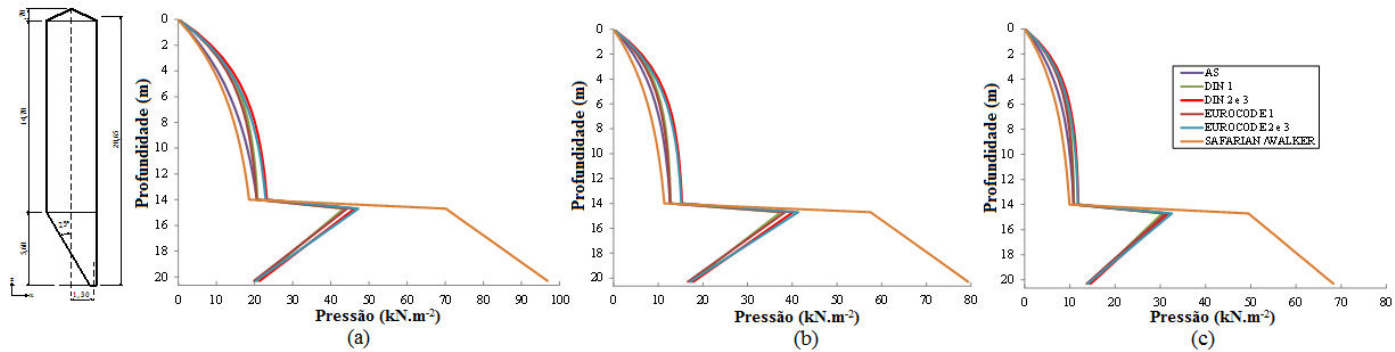


Figura 31 Pressão horizontal estática (ou carregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 43\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja

4.2 Pressão horizontal dinâmica no silo

Nas Figuras 32 a 36 são apresentadas as curvas de pressões horizontais dinâmicas conforme as normas e teorias para os três produtos analisados.

As três normas e a teoria de Safarian utilizadas como comparativo se baseiam nas deduções de Janssen para a predição da pressão estática em silos. Como ponto de diferenciação adota-se diferentes coeficientes de sobrepressão às pressões de carregamento, para obter os valores de descarga, o que, inevitavelmente, tende a gerar diferentes resultados de pressão para o mesmo silo. Observadas as condições de carregamento, as pressões horizontais dinâmicas (ou de descarga) são, em média, maiores quando se armazena milho, comparadas com o milho triturado e, respectivamente, com o farelo de soja (Tabela 22).

Tabela 22 Diferenças (%) das pressões horizontais dinâmicas médias entre os produtos analisados para o corpo do silo e a tremonha

Partes do silo	Produtos	Diferença de pressão (%)
Corpo do silo	Milho/Milho triturado	45%
	Milho triturado/Farelo de soja	21%
	Milho/Farelo de soja	57%
Tremonha	Milho/Milho triturado	27%
	Milho triturado/Farelo de soja	20%
	Milho/Farelo de soja	41%

Nas pressões horizontais dinâmicas, calculadas no fundo do corpo do silo com saída excêntrica, observam-se valores médios iguais a 45,20 kN.m⁻² para o milho, 26,50 kN.m⁻² para o milho triturado e 20,93 kN.m⁻² para o farelo

de soja. Comparando-se com as mesmas pressões de saída concêntrica, observam-se valores médios são iguais a 39,70 kN.m⁻² para o milho, 23,24 kN.m⁻² para o milho triturado e 18,34 kN.m⁻² para o farelo de soja, pelas normas e teoria de Safarian o que representa a diferença de 12% entre os valores.

Para as pressões horizontais dinâmicas, calculadas na transição das tremonhas excêntricas e concêntrica, observam-se valores médios iguais a 77,81 kN.m⁻² para o milho. Constatou-se que, para as tremonhas excêntricas, os valores médios são iguais a 58,53 kN.m⁻² para o milho triturado e 46,88 kN.m⁻² para o farelo de soja. Esses valores foram em média 5% superiores à tremonha concêntrica com valores médios são iguais a 55,45 kN.m⁻² para o milho triturado e 44,46 kN.m⁻² para o farelo de soja, pelas normas e teoria de Walker.

As normas EUROCODE/DIN da Classe 2 e 3 são as que apresentaram menores pressões médias para os produtos, seguido da teoria de Safarian, que é menor às pressões médias da AS 3774 e seguida das normas EUROCODE/DIN da Classe 1, conforme Tabela 23, no fundo do corpo do silo. Para o farelo de soja com descarga concêntrica, observou-se que a maior pressão média foi calculada pela norma AS 3774 e, para o milho triturado e o farelo de soja com descarga excêntrica, observaram-se as maiores pressões médias foram calculadas pela norma AS 3774.

Tabela 23 Diferenças (%) das pressões horizontais dinâmicas médias entre as normas, com saída concêntrica e excêntrica, para os produtos analisados

Concêntrica							
Produtos	Normas (kN.m ⁻²)						
	EUROCODE /DIN (Classe 2 e 3)		Safarian		AS		EUROCODE /DIN (Classe 1)
	Milho	26,33	27%	35,84	17%	43,05	17%
Milho triturado	17,54	20%	21,93	17%	26,39	6%	28,01
Farelo de soja	13,58	29%	19,11	15%	22,58	9%	20,59
Excêntrica							
Produtos	Normas (kN.m ⁻²)						
	EUROCODE /DIN (Classe 2 e 3)		Safarian		AS		EUROCODE /DIN (Classe 1)
	Milho	33,49	18%	41,01	22%	52,61	5%
Milho triturado	21,11	15%	24,94	23%	32,25	8%	29,80
Farelo de soja	15,55	34%	23,53	15%	27,54	21%	21,68

Nota: Estão em negrito as maiores pressões médias horizontais dinâmicas para cada produto com descarga concêntrica e excêntrica.

As normas EUROCODE e DIN (Classe 2 e 3) são as que apresentam em média menores pressões horizontais dinâmicas no fundo do corpo do silo para ambos os produtos. Isso ocorre em função do menor valor do coeficiente de sobrepressão ser 1,15. Madrona (2008) apresentou o mesmo resultado para silos cilíndricos com tremonha excêntrica. Enquanto para as normas EUROCODE e DIN (Classe 1) apresentam os valores que variam entre 1,98 até 2,73 para o coeficiente de sobrepressão, calculado em função do tipo de produto e da excentricidade (Tabela 24). Palma (2005) calculou as pressões em silo cilíndrico concêntrico tendo obtido os valores de 1,47 para o produto soja e de 1,35 para o

produto painço para as normas EUROCODE e DIN. O coeficiente de sobrepressão calculado por Madrona (2008), para o armazenamento de soja, em silos cilíndricos com tremonha excêntrica (25% de excentricidade) da Classe 1, foi inferior a 1, sendo adotados 1,15, mas em compensação, a norma AS 3774 para soja e milho triturado apresentou as maiores pressões usando um coeficiente de sobrepressão igual a 1,9.

Lopes Neto (2005) encontrou os valores de coeficientes de sobrepressão de 1,5 (DIN), 1,55 (EUROCODE) e 1,72 (AS) e, também, valores de K iguais a 0,53 (DIN), 0,49 (EUROCODE) e 0,35 (AS) ao utilizar silo prismático de seção retangular, com paredes em conformação zigzague com 70° de inclinação com a horizontal, usando a soja peletizada. Esses valores de coeficientes de sobrepressão são inferiores aos calculados e para valores de K houve semelhança aos valores obtidos para milho triturado e farelo de soja.

Cheung (2007) apresenta valores do coeficiente de sobrepressão horizontal médio diferente entre os produtos analisados (soja, milho e ração de frango) e entre os tipos de paredes (chapa lisa e ondulada) para silo cilíndrico esbelto concêntrico. Pelos estudos e ensaios realizados indicam-se, para o coeficiente de sobrepressão horizontal, os seguintes valores: $C_{h(\text{soja, lisa})} = 1,426$, $C_{h(\text{soja, ondulada})} = 1,418$, $C_{h(\text{milho, lisa})} = 1,608$, $C_{h(\text{milho, ondulada})} = 1,536$, $C_{h(\text{ração de frango, lisa})} = 1,227$, $C_{h(\text{ração de frango, ondulada})} = 1,270$.

Tabela 24 Coeficiente de sobrepressão para pressões horizontais (C_h) e parâmetro K

Norma/Teoria	Coeficiente de sobrepressão para pressão horizontal (C_h)			Parâmetro K		
	Milho	Milho triturado	Farelo de soja	Milho	Milho triturado	Farelo de soja
Classe 1: EUROCODE/ DIN	Corpo	Corpo	Corpo	EUROCODE	EUROCODE	EUROCODE
	Conc. - 2,50	Conc. - 2,20	Conc. - 1,90			
	43% - 2,73	43% - 2,38	43% - 2,03			
	35% - 2,69	35% - 2,35	35% - 2,01	0,64	0,44	0,47
	30% - 2,66	30% - 2,33	30% - 1,99	DIN	DIN	DIN
	25% - 2,64	25% - 2,31	25% - 1,98			
Tremonha	Tremonha	Tremonha	0,70	0,49	0,52	
	1,30	1,60	1,30			
Classe 2 e 3: EUROCODE/ DIN	Corpo	Corpo	Corpo	EUROCODE	EUROCODE	EUROCODE
	1,15	1,15	1,15	0,65-0,64	0,48-0,41	0,48-0,46
	Tremonha	Tremonha	Tremonha	DIN	DIN	DIN
	1,30	1,60	1,30	0,71-0,69	0,52-0,45	0,53-0,50
AS*	Corpo	Corpo	Corpo	0,45-0,44	0,35	0,35
	Conc. - 2,09	Conc. - 2,09	Conc. - 2,09			
	43% e 35%: 2,56	43% e 35%: 2,56	43% e 35%: 2,56			
	30% e 25%: 2,54	30% e 25%: 2,54	30% e 25%: 2,54			
Tremonha	Tremonha	Tremonha				
	2,00	2,00	2,00			
Safarian/ Walker	Corpo	Corpo	Corpo	0,41	0,25	0,27
	$\frac{1}{3}H = 1,76$	$\frac{1}{3}H = 1,76$	$\frac{1}{3}H = 1,76$			
	$\frac{2}{3}H = 1,93$	$\frac{2}{3}H = 1,93$	$\frac{2}{3}H = 1,93$			

* Para o cálculo do coeficiente de sobrepressão para pressões horizontais (C_h) é preciso do coeficiente de geometria do produto (C_c), sendo 1 para fluxo simétrico e 1,2 para fluxo planar.

No corpo do silo, entretanto, com a excentricidade variando de 25% a 43%, para as normas EUROCODE e DIN (Classe 1), resulta em maiores pressões horizontais dinâmicas para o produto milho. Isso é em virtude, principalmente, do alto valor calculado para o parâmetro K, assim como o coeficiente de sobrepressão horizontal que varia entre 2,64 até 2,73 (Tabela 24). Para o milho triturado, as maiores pressões médias horizontais dinâmicas são das normas EUROCODE e DIN (Classe 1) para descarga concêntrica e da norma AS 3774 para descarga excêntrica, enquanto isso, para o farelo de soja, o comportamento das pressões médias horizontais dinâmicas maiores são da norma AS 3774, isso em razão do coeficiente de sobrepressão.

Observou-se que a norma AS 3774 apresentou valores de pressões horizontais dinâmicas maiores que a norma EUROCODE/DIN da Classe 1, por causa do alto valor do coeficiente de sobrepressão. Tal constatação é verificada na seguinte condição: para descarga concêntrica do produto farelo de soja na profundidade de oito metros (Figura 32c) e para descarga excêntrica do produto milho triturado na profundidade de oito metros com 25% de excentricidade (Figura 33b) e 30% de excentricidade (Figura 34b) e na profundidade de nove metros com 35% de excentricidade (Figura 35b) e 43% de excentricidade (Figura 36b).

Analisando-se os coeficientes de sobrepressão, observa-se, que para silo concêntrico, o coeficiente de sobrepressão é menor para todos os produtos em comparação com silo excêntrico. A fórmula empírica para determinação do coeficiente de sobrepressão leva em conta a excentricidade e quanto maior a excentricidade maior será o coeficiente.

A teoria de Safarian emprega coeficientes de sobrepressão (Tabela 5) e considera que, para fluxo de massa, deve ser acrescido de 10 a 25% o valor do coeficiente de sobrepressão.

Outra constatação diz respeito ao pico de pressão na transição que, para as normas EUROCODE e DIN, tem pressões médias bem maiores que as outras analisadas, isso se deve à pressão adicional para fluxo de massa. Ao se comparar o comportamento dos três produtos quanto à variação de pressão horizontal dinâmica na transição, observou-se que não houve variação para as diferentes tremonhas com o mesmo produto.

Na Tabela 25 apresenta-se a comparação entre as pressões de pico dadas pelas normas EUROCODE e DIN em relação às demais.

Tabela 25 Diferenças (%) das pressões horizontais dinâmicas na transição da tremonha: EUROCODE/DIN *versus* AS e teoria de Walker (1966)

Normas	Produtos	Diferença de pressão (%)
EUROCODE/DIN - AS	Milho	33%
	Milho triturado	38%
	Farelo de soja	40%
EUROCODE/DIN - Walker	Milho	38%
	Milho triturado	29%
	Farelo de soja	34%

Observa-se na Tabela 25 a constatação do aumento da pressão na transição das normas EUROCODE e DIN em relação à norma AS 3774 foram próximas de 33% para milho, 38% para milho triturado e 40% para farelo de soja. Com relação à teoria de Walker, esse aumento foi de 38% para milho, 29% para milho triturado e 34% para farelo de soja. Isso verifica a variabilidade nas recomendações para a determinação das pressões na transição do corpo do silo com a tremonha tanto para pesquisadores como pelas normas analisadas.

Contatou-se que as normas EUROCODE e DIN foram as que apresentam valores maiores em relação à determinação das pressões horizontais

dinâmicas na tremonha. Nos cálculos das pressões foi utilizado o método de aproximação por meio dos diagramas de cargas P_{n1} , P_{n2} e P_{n3} (Figura 17).

a) Silo com tremonha concêntrica

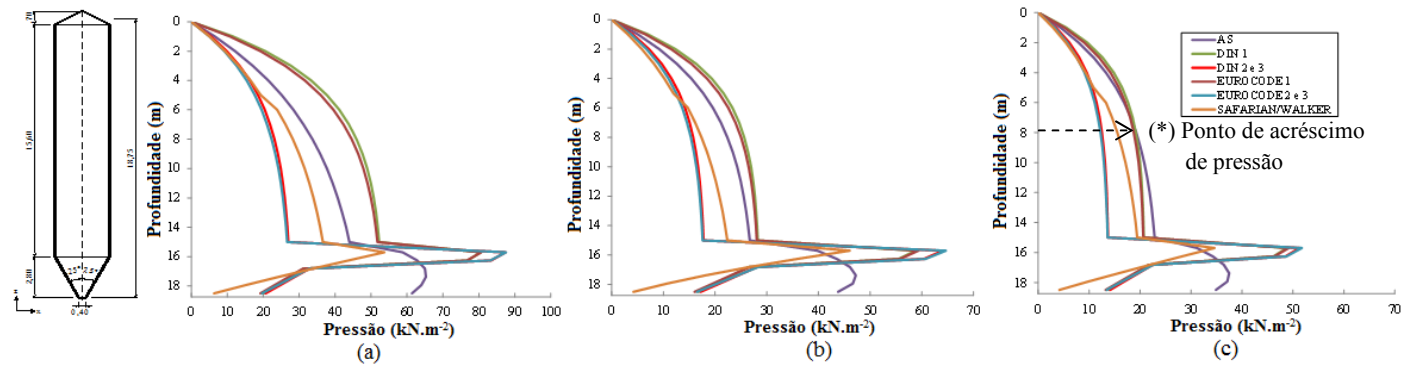


Figura 32 Pressão horizontal dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha concêntrica para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja

b) Silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 25\%$)

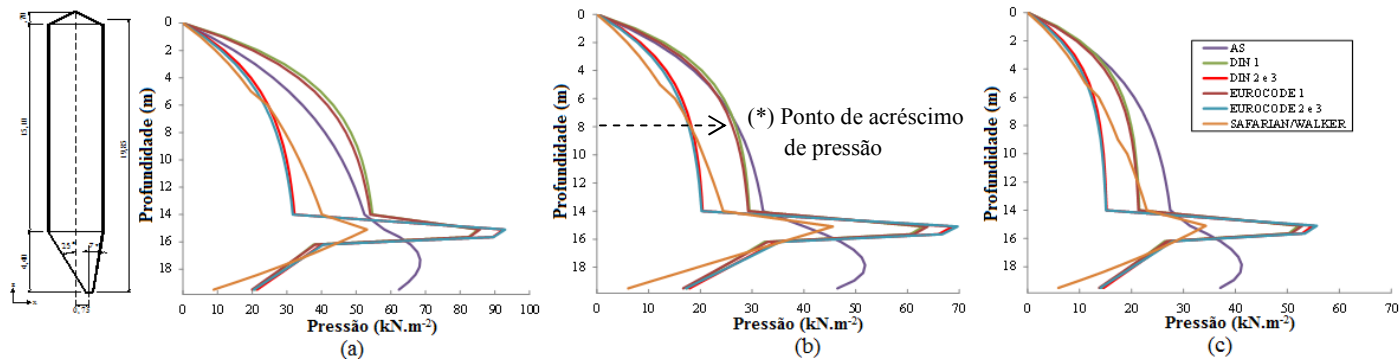


Figura 33 Pressão horizontal dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 25\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja

c) Silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 30\%$)

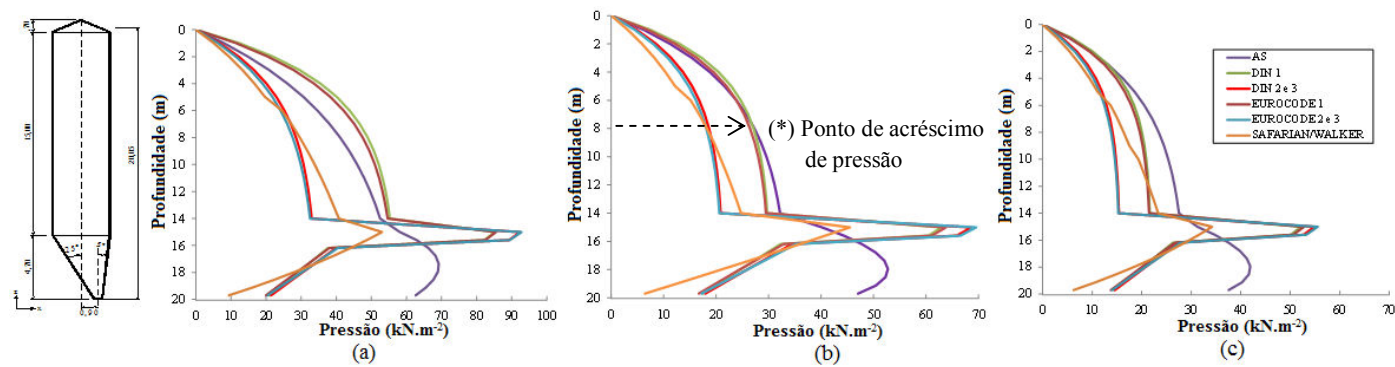


Figura 34 Pressão horizontal dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 30\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja

d) Silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 35\%$)

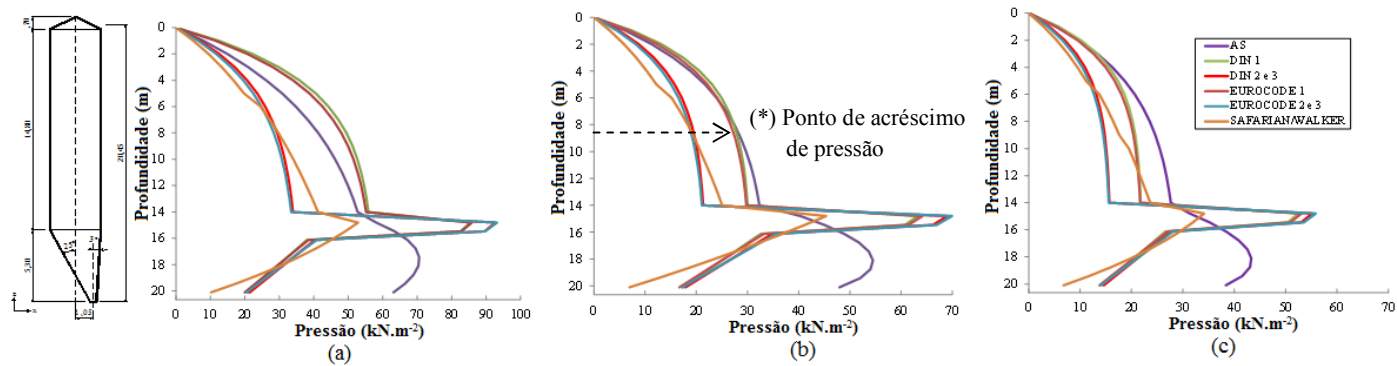


Figura 35 Pressão horizontal dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 35\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja

e) Silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 43\%$)

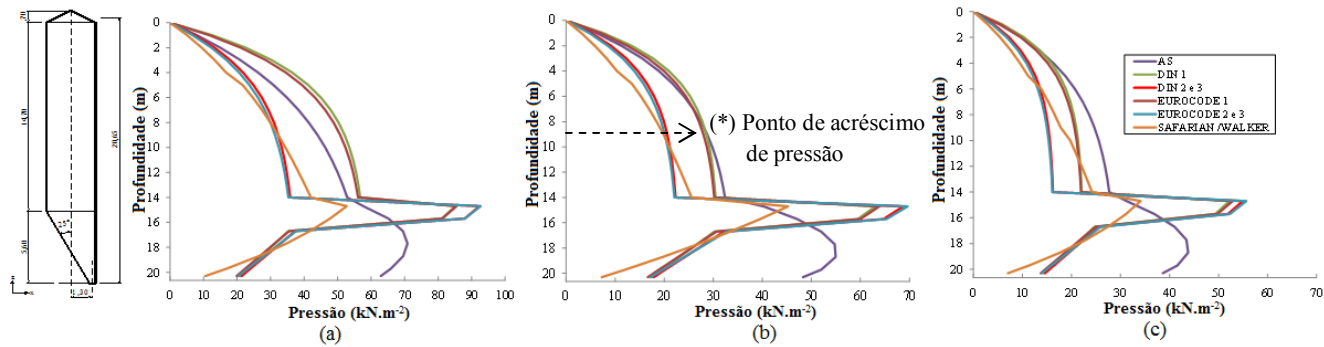


Figura 36 Pressão horizontal dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 43\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja

4.3 Pressão de atrito vertical dinâmica no silo

Nas Figuras 37 a 41 são apresentadas as curvas de pressões de atrito dinâmicas conforme as normas e teorias de Safarian (1969) e Walker (1966) para os três produtos analisados.

Para os três produtos, o coeficiente de sobrepressão aplicado à pressão de atrito estática nos silos de Classe 1 (EUROCODE e DIN) varia de 1,40 até 1,64 e para Classe 2 e 3 este valor é constante de 1,10. Para o Safarian o coeficiente de sobrepressão é de 1,76 ($\frac{1}{3}H$) e 1,93 ($\frac{2}{3}H$). Enquanto a norma AS 3774 adota 1,4 (fluxo planar) e 1,2 (fluxo de funil). Na pesquisa realizada por Cheung (2007), em silo cilíndrico esbelto concêntrico, para diferentes produtos (soja, milho e ração de frango) e tipos de paredes, foram encontrados valores médios de 1,07 a 1,076 para parede lisa e de 1,098 a 1,134 para parede ondulada, sendo esses valores semelhantes aos calculados pela EUROCODE e DIN (Classe 2 e 3), mas inferior às demais.

Madrona (2008) ressalta que os coeficientes de sobrepressão para descarga das normas foi 1,54 (EUROCODE/DIN da Classe 1), 1,10 (EUROCODE/DIN da Classe 2 e 3) e 1,20 (AS) para silo cilíndrico com 25% de excentricidade para o produto farelo de milho e soja. Lopes Neto, Nascimento e Fank (2014) adotaram o mesmo valor para a norma AS 3774, 1,15 para a norma EUROCODE e 1,10 para a norma DIN para silo cilíndrico de fundo plano com descarga concêntrica e excêntrica.

Para as pressões de atrito dinâmicas, calculadas nas paredes próximas à transição do silo com saída excêntrica, observam-se valores médios são iguais a 8,40 kN.m⁻¹ para o milho, 8,46 kN.m⁻¹ para o milho triturado e 7,50 kN.m⁻¹ para o farelo de soja. Esses valores foram em média 9% superior aos valores observados nos silos com saída concêntrica com valores médios são iguais a

7,70 kN.m⁻¹ para o milho, 7,74 kN.m⁻¹ para o milho triturado e 6,79 kN.m⁻¹ para o farelo de soja, pelas normas e teoria de Safarian.

Com as pressões de atrito dinâmicas, calculadas no fundo do corpo do silo das tremonhas excêntricas, observam-se valores médios são iguais a 17,70 kN.m⁻¹ para o milho, 11,35 kN.m⁻¹ para o milho triturado e 10,53 kN.m⁻¹ para o farelo de soja. Esses valores foram em média 8% superiores à tremonha concêntrica com valores médios são iguais a 16,35 kN.m⁻¹ para o milho, 10,46 kN.m⁻¹ para o milho triturado e 9,71 kN.m⁻¹ para o farelo de soja, pelas normas e teoria de Walker.

Na determinação do coeficiente de sobrepressão para silos da Classe 1 (EUROCODE e DIN), a excentricidade da tremonha é considerada no cálculo. Observam-se no corpo do silo as pressões médias de atrito da teoria de Safarian apresentam valores superiores a uma determinada profundidade em relação às normas, tendo o maior valor de coeficientes de sobrepressão que foi de 1,93, apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 Coeficiente de sobrepressão para pressão de atrito no corpo do silo

Norma/Teoria	Coeficiente de sobrepressão para pressão de atrito (C _w)
Classe 1: EUROCODE/ DIN	Conc. – 1,40
	43% – 1,64
	35% – 1,60
	30% – 1,57
	25% – 1,54
Classe 2 e 3: EUROCODE/ DIN	1,10
AS	1,40 – fluxo planar
	1,20 – fluxo simétrico
Safarian/Walker	1/3H = 1,76
	2/3H = 1,93

Madrona (2008), pesquisando silos cilíndricos com tremonha cônica com 25% de excentricidade, observou que o lado próximo à boca de saída tem pressões de atrito menores na tremonha do que o lado oposto. As pressões de atrito calculadas pelas normas são maiores do que as obtidas em simulação numérica usando o processo de elementos finitos. Este tipo de comportamento. Também, foi observado por Guaita, Couto e Ayuga (2003).

A pressão de atrito dinâmica média para o produto milho com 43% de excentricidade, utilizando a teoria de Safarian, foi de $10,87 \text{ kN.m}^{-1}$ nas paredes próximas à transição do silo, sendo este valor semelhante ao Timm (2002) que, também, utilizou a teoria de Safarian para silo prismático multicelular com tremonha excêntrica para o produto milho.

As normas EUROCODE/DIN da Classe 2 e 3 são as que apresentaram menores pressões médias de atrito para os produtos, seguido da AS 3774, que é menor às pressões médias da EUROCODE/DIN da Classe 1 e seguida da teoria de Safarian, apresentada na Tabela 27, no fundo do corpo do silo. Com exceção da norma AS 3774, com saída concêntrica para o milho (Figura 37a) e o milho triturado (Figura 37b) que apresentaram as menores pressões de atrito médias, apresentada na Tabela 27 em negrito.

Tabela 27 Diferenças (%) das pressões de atrito dinâmicas médias entre as normas, com saída concêntrica e excêntrica, para os produtos analisados

Concêntrica							
Produtos	Normas (kN.m⁻¹)						
	EUROCODE /DIN (Classe 2 e 3)		AS	EUROCODE /DIN (Classe 1)		Safarian	
	Milho	7,26	1%	7,16	5%	7,54	25%
Milho triturado	7,49	10%	6,81	14%	7,78	25%	9,70
Farelo de soja	6,09	1%	6,13	12%	6,85	27%	8,73

Excêntrica							
Produtos	Normas (kN.m⁻¹)						
	EUROCODE /DIN (Classe 2 e 3)		AS	EUROCODE /DIN (Classe 1)		Safarian	
	Milho	7,18	12%	8,18	4%	8,47	20%
Milho triturado	7,43	2%	7,57	16%	8,77	23%	10,82
Farelo de soja	6,06	11%	6,82	13%	7,73	37%	10,57

a) Silo com tremonha concêntrica

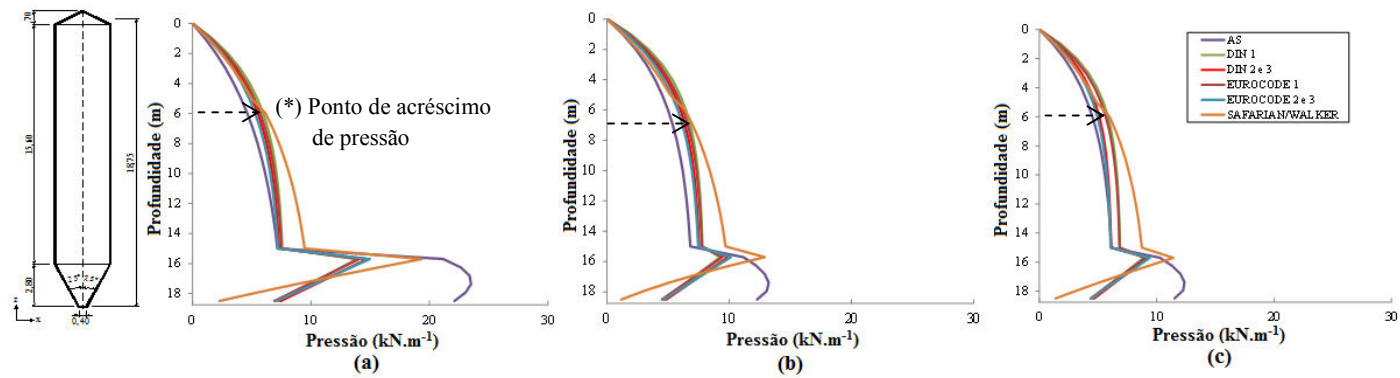


Figura 37 Pressão de atrito dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha concêntrica para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja

b) Silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 25\%$)

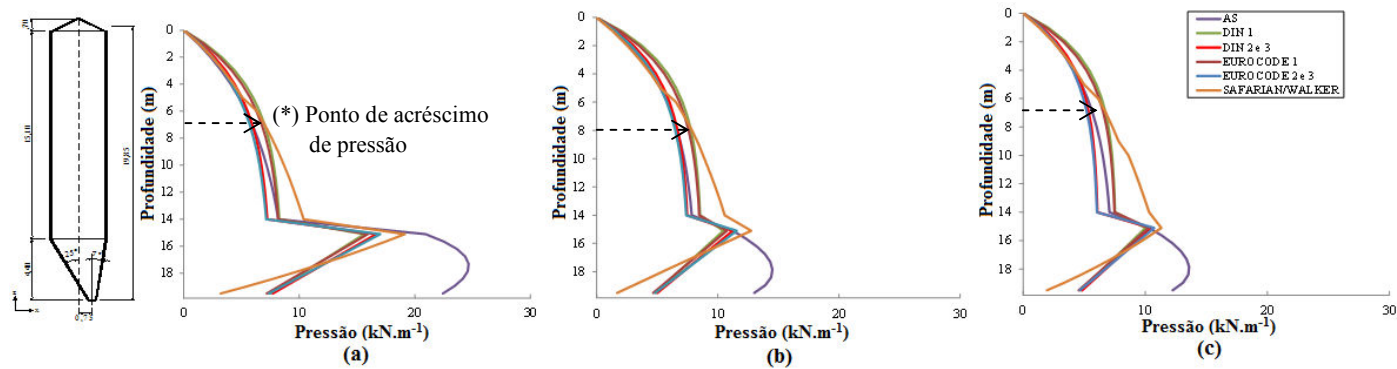


Figura 38 Pressão de atrito dinâmico (ou descarregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 25\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja

c) Silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 30\%$)

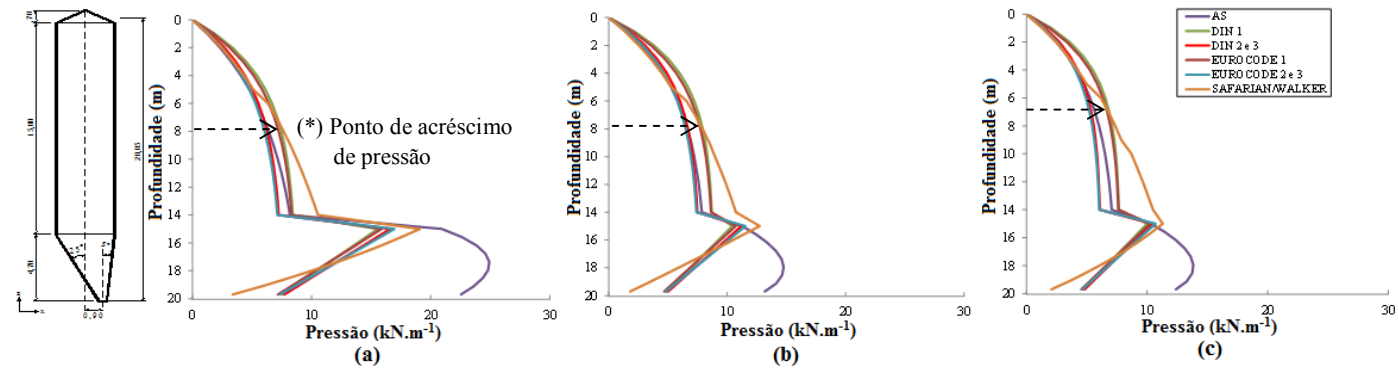


Figura 39 Pressão de atrito dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 30\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja

d) Silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 35\%$)

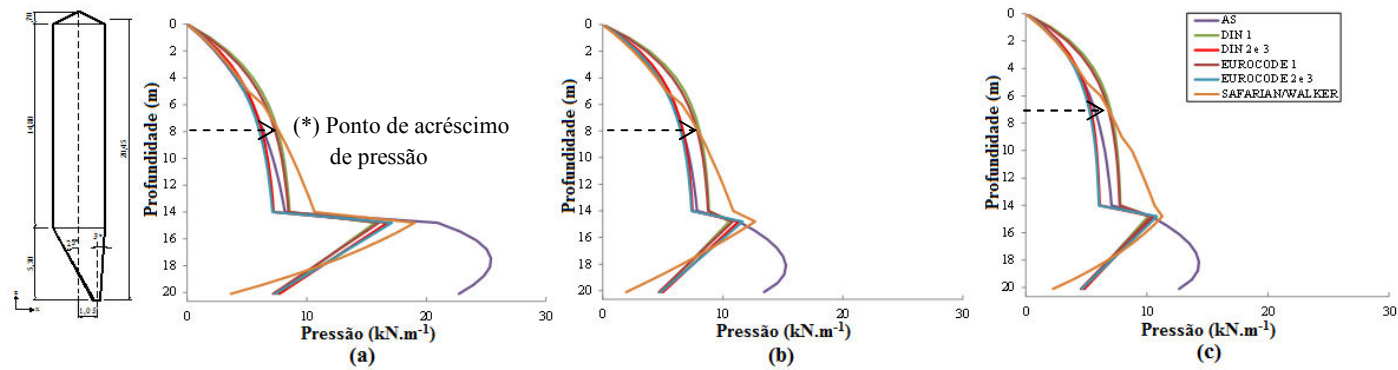


Figura 40 Pressão de atrito dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 35\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja

e) Silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 43\%$)

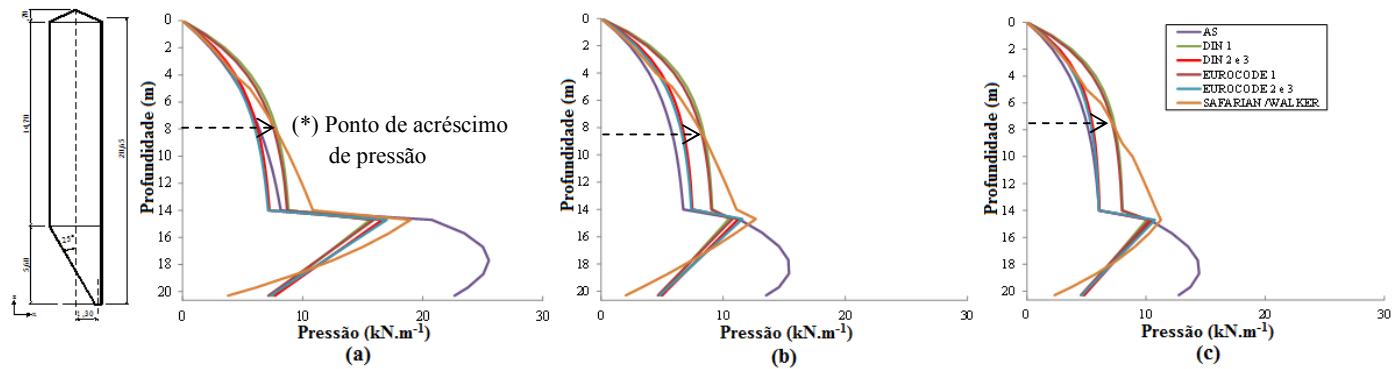


Figura 41 Pressão de atrito dinâmica (ou descarregamento) no silo com tremonha excêntrica ($e_0/a = 43\%$) para: (a) milho, (b) milho triturado e (c) farelo de soja

5 CONCLUSÃO

1) As pressões horizontais e de atrito, em silos esbeltos prismáticos com tremonha excêntrica e de fluxo de massa, não apresentaram variações para as excentricidades de 25%, 30%, 35% e 43% para a mesma norma ou teoria analisada.

2) Os valores das pressões horizontais e de atrito apresentam variações quanto à granulometria dos produtos armazenados. Os produtos milho, milho triturado e farelo de soja apresentaram as maiores pressões, respectivamente.

3) O coeficiente de sobrepressão para pressões horizontais apresentou valores diferentes entre os produtos analisados e os tipos de excentricidades, o que indica que na avaliação das cargas atuantes é necessária a determinação das propriedades físicas dos produtos.

4) Os valores de pressões nas paredes dos silos foram adequados para o produto pulverulento, quando calculados pela teoria de Safarian.

5) Recomenda-se adotar a norma AS 3774 para o cálculo das pressões horizontais e de atrito para alturas medianas nas paredes das tremonhas atendendo às hipóteses básicas de segurança.

6) Na determinação das pressões em silos esbeltos prismáticos com o fluxo de massa recomenda-se adotar as normas EUROCODE e DIN, atentando para as combinações com as propriedades físicas para obter os carregamentos máximos e adoção de pressões adicionais para silos prismáticos.

7) O programa SILOEXCENTRIC se mostrou aplicável para silos esbeltos prismáticos e geometria das tremonhas concêntrica e excêntrica. Pelos resultados de pressões horizontais e de atrito se mostraram adequados às normas internacionais, considerados os Estados Limites.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 313**: standard practice for the design and construction of concrete silos and stacking tubes for storing granular materials. Detroit, 1977. 38 p.

ARAÚJO, E. C.; CALIL JÚNIOR, C. Critérios de dimensionamento de tremonhas piramidais para silos metálicos elevados. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, n. 20, p. 33-42, 2002.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3774**: loads on bulk containers. Sydney, 1996. 78 p.

BANDEIRA, I. S. A. **Análise de fluxo de ração e farelo de trigo em silos prismáticos industriais**. 1997. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 1997.

BRASIL. **Decreto nº 3.855**, de 3 de julho de 2001. Regulamenta a Lei nº 9.973, de 29 de maio de 2000, que dispõe sobre o sistema de armazenagem dos produtos agropecuários e dá outras providências. Brasília, 2001. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2001/decreto-3855-3-julho-2001-334788-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: 18 ago. 2014.

BRITISH MATERIALS HANDLING BOARD. **Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers**. Berkshire, 1985. 143 p.

BRITISH STANDARD EUROCODE. **BS EN 1991-4**: actions on silos and tanks: part 4: silos and tanks. Brussels, 2006. 107 p.

BROWN, C. J.; NIELSEN, J. **Silos**: fundamentals of theory, behaviour and design. London: E & FN Spon, 1998. 836 p.

CALIL JÚNIOR, C. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais**. 1989. 198 p. Tese (Livre Docência em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

CALIL JÚNIOR, C. **Sobrepresiones em las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos**. 1984. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) - Escola Politécnica de Barcelona, Barcelona, 1984.

CALIL JÚNIOR, C.; CHEUNG, A. B. **Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo**. São Carlos: USP, 2007. 232 p.

CALIL JÚNIOR, C.; NASCIMENTO, J. W. B.; ARAÚJO, E. C. **Silos metálicos multicelulares**. São Carlos: USP, 1997. 175 p.

CHEUNG, A. B. **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos**. 2007. 305 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2013/14: décimo primeiro levantamento, agosto/2014**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 18 ago. 2014.

DEUTSCHE NORM. **DIN 1055-6: basis of design and actions on structures, part 6: design loads for buildings and loads in silos bins**. Berlin: Verlaz, 2005. 112 p.

FERRAZ MÁQUINAS. Disponível em: <<http://www.ferrazmaquinas.com.br/informes/11/60/Fluxograma%20de%20Produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20Ra%C3%A7%C3%A3o%20Extrusada>>. Acesso em: 17 jul. 2014.

FREITAS, E. G. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano**. 2001. 175 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

GAYLORD JUNIOR, E. H.; GAYLORG, C. N. **Design of steel bins for storage of bulk solids**. New Jersey: Prentice-Hall, 1984. 359 p.

GUAITA, M.; COUTO, A.; AYUGA, F. Numerical simulation of wall pressure during discharge of granular material from cylindrical silos with eccentric Hoppers. **Biosystems Engineering**, London, v. 85, n. 1, p. 101-109, May 2003.

HEZEL, C. R. **Avaliação das pressões em silos verticais conforme diferentes normas internacionais**. 2007. 193 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2007.

JAKY, J. Pressure in silos. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 2., 1948, Rotterdam. **Proceedings...** Rotterdam: MFE, 1948. p. 103-107.

JANSSEN, H. A. Versuche über getriededruck in silozellen. **Verein Deutscher Ingenieure**, Stuttgart, v. 39, p. 1045-1049, Aug. 1895.

JENIKE, A. W.; JOHANSON, J. R. Bin loads. **Journal of Structural Division**, New York, v. 94, p. 1011-1041, 1968.

LEITE, L. M. O. **Silos metálicos**. 2008. 194 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, Porto, 2008.

LOPES NETO, J. P. **Análise estrutural de silos metálicos prismáticos**. 2005. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B. Características de fluxo e projeto de tremonhas cônicas em silos verticais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 3, p. 339-345, 2013.

LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B.; CALIL JÚNIOR, C. Análise estrutural de silos metálicos prismáticos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 4, p. 1252-1258, jul./ago. 2008.

LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B.; FANK, M. Z. Forças verticais e de atrito em silos cilíndricos com fundo plano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 6, p. 652-657, 2014.

LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B.; LOPES, F. F. M. Modelos de previsão do fluxo e vazão de descarga de produtos agrícolas. **Revista Educação Agrícola Superior**, Brasília, v. 27, n. 1, p. 54-58, 2012.

MADRONA, F. S. **Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica**. 2008. 177 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MADRONA, F. S.; CALIL JÚNIOR, C. Análise das pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 11, n. 49, p. 37-56, 2009.

MCLEAN, A. G. Empirical 4 critical flow factor equations. **Bulk Solids Handling**, Nuremberg, v. 6, n. 4, p. 407-411, 1986.

MOLEND, M. et al. Bin loads induced by eccentric filling and discharge of grain. **Structures & Environment Division of ASAE**, Saint Joseph, v. 45, n. 3, p. 781-785, 2001.

NASCIMENTO, J. W. B. **Estudo de silos metálicos prismáticos para fábricas de ração**. 1996. 152 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

NASCIMENTO, J. W. B.; CALIL JÚNIOR, C. Painéis estruturais para paredes de silos verticais prismáticos. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, n. 20, p. 1-21, 1998.

NÓBREGA, M. V. **Análise de vazão e fluxo de ração avícola em silos prismáticos com descarga excêntrica**. 2003. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2003.

NÓBREGA, M. V.; NASCIMENTO, J. W. B. Fluxo de ração avícola em silos prismáticos com tremonha excêntrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 3, p. 413-419, 2005.

PALMA, G. **Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d \geq 1,5$)**. 2005. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PALMA, G.; CALIL JÚNIOR, C. Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d \geq 1,5$). **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 10, n. 42, p. 129-150, 2008.

PHAM, L. Variability of bin loads due to bulk solids for structural design. **Civil Engineering Transactions**, Sydney, v. 27, n. 1, p. 73-78, 1983.

PIEPER, K.; WAGNER, K. Der einfluss verschiedener auslaufarten auf die seitendrucke in silozellen. **Aufbereitungs Technik**, Wiesbaden, v. 10, p. 542-546, Oct. 1968.

RANKINE, W. J. M.; KOENEN, M. Calculation of side and floor pressure in silo walls. **Zentralblatt der Bauverwalyung**, Berlin, p. 446-449, 1895.

RAVENET, J. **Silos**. Barcelona: Técnicos Associados, 1990. 330 p.

RAVENET, J. **Silos**. Barcelona: Técnicos Associados, 1992. 508 p.

ROBERTS, A. W. **Storage, flow and handling of bulk solids**. Newcastle: University of Newcastle, 1987. 612 p.

ROTTER, J. M. The analysis of steel bins subject to eccentric discharge. In: INTERNATIONAL CONFERENCE BULK MATERIALS STORAGE HANDLING AND TRANSPORTATION, 2., 1986, Wollongong. **Proceedings...** Wollongong: IEAust, 1986. p. 264-271.

ROTTER, J. M. **Pressures, stresses and buckling in metal silos containing eccentrically discharging solids**. Disponível em: <file:///C:/Users/M%C3%A1rcio/Downloads/Rotter%20-%20excentricidade.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2013.

ROTTER, J. M. et al. **Flow pattern measurement in full scale silos**. London: British Materials Handling Board, 1995. 230 p.

SAFARIAN, S. S. **Design and construction of silos and bunkers**. New York: V. N. Reinhold, 1985. 468 p.

SAFARIAN, S. S. Design pressures of granular materials in silos. **Journal of the American Concrete Institute**, New York, v. 66, n. 8, p. 647-655, 1969.

SCHULZE, D. Flowability and time consolidation measurements using a ring shear tester. **Powder Handling & Processing**, Clausthal-Zellerfeld, v. 8, n. 3, p. 221-226, 1996.

SILVA, M. C. A. T. **Estudo da variabilidade pressões em silos**. 1993. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

TIMM, M. W. **Estudo crítico da metodologia de cálculo para silos prismáticos multicelulares**. 2002. 109 p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

VIEIRA, L. H. S. **Estudo teórico e experimental das pressões em tremonhas cônicas e piramidais de silos metálicos esbeltos**. 2009. 110 p. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

WALKER, D. M. An approximate theory for pressures and arching in hoppers. **Chemical Engineering Science**, New York, v. 21, p. 975-997, 1966.

APÊNDICE**APÊNDICE A**

Figuras		Páginas
Figura 1A	Tela principal do programa SILOEXCENTRIC	138
Figura 2A	Entrada de dados das propriedades físicas dos produtos armazenados	139
Figura 3A	Entrada de dados da capacidade e as características geométricas do silo	140
Figura 4A	Entrada de dados dos coeficientes para o corpo do silo e tremonha	141
Figura 5A	Cálculos das pressões, selecionando a opção do produto armazenado e, também, o tipo de tremonha concêntrica e excêntrica (25%, 30%, 35% e 43%) para fluxo de massa	142
Figura 6A	Relatório do cálculo das pressões para as normas e teoria de Safarian e Walker	143
Figura 7A	Plotagem e visualização do gráfico da pressão horizontal estática	144
Figura 8A	Plotagem e visualização do gráfico da pressão horizontal dinâmica	145
Figura 9A	Plotagem e visualização do gráfico da pressão de atrito dinâmica	146

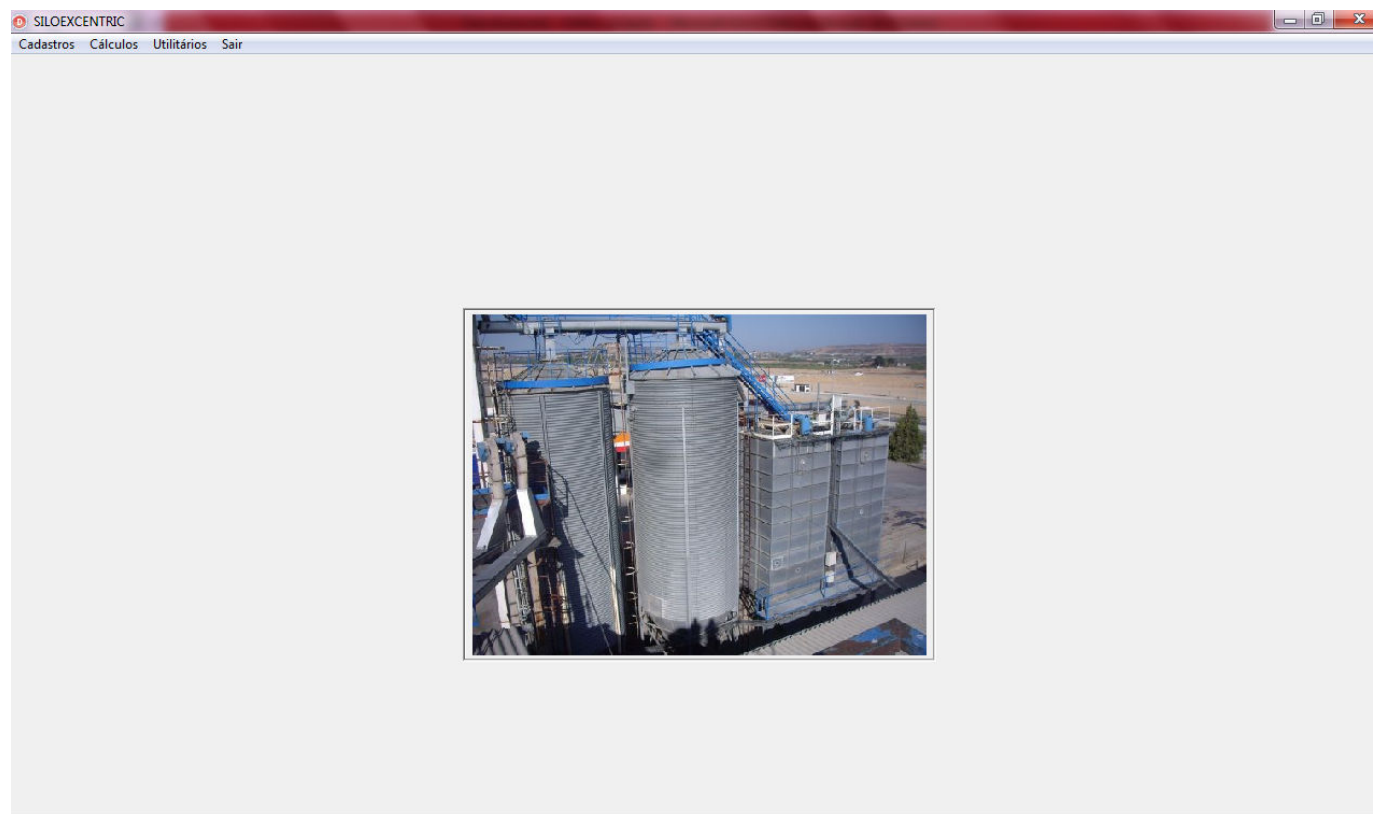


Figura 1A Tela principal do programa SILOEXCENTRIC

Cadastro de Produtos

Pesquisa: Procurar Fechar

Código	Nome	Característica				
1	Milho	Produtos Granulares				
01) Peso Específico		02) Âng. Atr. Interno	03) Efe. Âng. Atr. Interno	04) Âng. Atr. Parede	05) Ângulo Repouso	06) Corpo do Silo
γ_i (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	Pii (°)	Pei (°)	Pwi (°)	Pr (°)	EUROCODE/DIN 1
7,40	7,41	21,10	23,90	13,20	30,00	Cop
		Pis (°)	Pes (°)	Pws (°)		0,90
		22,90	25,00	15,80		
γ_m (kN/m ³)		Pim (°)	Pem (°)	Pwm (°)		
7,41		22,00	24,45	14,50		

Código	Nome	Característica	γ_i (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)
1	Milho	Produtos Granulares	7,40	7,44
2	Milho Triturado	Produtos Pulverulentos		
3	Farelo de Soja	Produtos Pulverulentos	6,56	

Figura 2A Entrada de dados das propriedades físicas dos produtos armazenados

Geometria do Silo

Pesquisa: Procurar

Excentricidade: 4 EX35% Produto: 1 Milho

Cap. Armazenamento
Capacidade Celula (kN) 1.000,0
Volume Total (m³) 151,5

Relação
H/a 6,9

Geometria da Tremonha
Ângulo Inclinação (°) 25,0
Largura (m) 3,0
Largura Boca (m) 0,4
Altura Apice (m) 0,9
Altura (m) 5,6
Volume (m³) 16,8

Geometria Repouso
Ângulo Repouso (°) 30,0
Altura (m) 0,9
Volume (m³) 2,6

Geometria Corpo Silo
Volume (m³) 132,1
Altura Util Corpo (m) 14,7

Resumo das Alturas
Altura Tremonha (m) 5,6
Altura Repouso (m) 0,9
Altura Util Corpo (m) 14,7
Altura Corpo (m) 15,5
Altura Total (m) 20,7

Excentricidade
Boca de Descarga (m) 1,05
eo/a (m) 0,35
Hipotenusa (m) 5,62

Código	Excentricidade	Produto	Cap.Total Celula (kN)	Volume Total	Ângulo Inclinação (°)	Largura (m)	Largura Boca (m)	Altura Apice (m)	Altura (m)
1	4	1	1.000,0	151,5	25,0	3,0	0,4	0,9	
2	5	2	1.000,0	151,5	25,0	3,0	0,4	0,9	
3	5	3	1.000,0	151,5	25,0	3,0	0,4	0,9	
7	2	1	1.000,0	151,5	25,0	3,0	0,4	0,7	
8	2	2	1.000,0	151,5	25,0	3,0	0,4	0,7	
9	2	3	1.000,0	151,5	25,0	3,0	0,4	0,7	

Figura 3A Entrada de dados da capacidade e as características geométricas do silo

Cadastro de Coeficientes

Pesquisa: Procurar Fechar

Produto: 1 Milho

EUROCODE 1	EUROCODE 2 e 3	DIN 1	DIN 2 e 3	AS	Safarian/Walker
---CORPO DO SILO---	---CORPO DO SILO---	---CORPO DO SILO---	---CORPO DO SILO---	---CORPO DO SILO---	---CORPO DO SILO---
Cop	Ch	Cop	Ch	Cc	1/3 H
<input type="text" value="0,90"/>	<input type="text" value="1,15"/>	<input type="text" value="0,90"/>	<input type="text" value="1,15"/>	<input type="text" value="1,20"/>	<input type="text" value="1,76"/>
	Cw		Cw	Cw	2/3 H
	<input type="text" value="1,10"/>		<input type="text" value="1,10"/>	<input type="text" value="1,40"/>	<input type="text" value="1,93"/>
-----TREMONHA-----	-----TREMONHA-----	-----TREMONHA-----	-----TREMONHA-----	-----TREMONHA-----	-----TREMONHA-----
Cb	Cb	Cb	Cb	Ch	m
<input type="text" value="1,30"/>	<input type="text" value="1,30"/>	<input type="text" value="1,30"/>	<input type="text" value="1,30"/>	<input type="text" value="2,00"/>	<input type="text" value="1,00"/>
Mh	Mh	Mh	Mh		
<input type="text" value="0,36"/>	<input type="text" value="0,36"/>	<input type="text" value="0,36"/>	<input type="text" value="0,36"/>		

Produto	Cop	Cb	Mh	Ch	Cw	Cb	Mh	Cop	Cb	Mh	Ch
1	0,90	1,30	0,36	1,15	1,10	1,30	0,36	0,90	1,30	0,36	1,15
2	0,70	1,60	0,28	1,15	1,10	1,30	0,28	0,70	1,30	0,28	1,15
3	0,50	1,30	0,33	1,15	1,10	1,30	0,33	0,50	1,30	0,33	1,15

Figura 4A Entrada de dados dos coeficientes para o corpo do silo e tremonha

Cálculos das Pressões

Fechar

Parâmetros de Cálculo

PRODUTO

1 | 1 | Milho

EXCENTRICIDADE

4 | 4 | EX35%

Normas Utilizadas

Eurocode 1 | 1

Eurocode 2 e 3 | 2

DIN 1 | 3

DIN 2 e 3 | 4

AS | 5

Sarañan/Walker | 6

Ação a Executar

Calcular | Imprimir

Aqui serão gerados os cálculos que serão fonte de informações para a construção da tabela que irá resultar no gráfico de pressões.

Selecione os parâmetros na coluna do lado esquerdo e click no botão CALCULAR.

IdCalculo	CodMaterial	CodExcentricidade	CodPressao	TipoPressao	Parte	Profundida
1	1	4	4	PVE	SILO	
2	1	4	4	PVE	SILO	
3	1	4	4	PVE	SILO	
4	1	4	4	PVE	SILO	
5	1	4	4	PVE	SILO	
6	1	4	4	PVE	SILO	
7	1	4	4	PVE	SILO	
8	1	4	4	PVE	SILO	
9	1	4	4	PVE	SILO	
10	1	4	4	PVE	SILO	
11	1	4	4	PVE	SILO	1
12	1	4	4	PVE	SILO	1
13	1	4	4	PVE	SILO	1
14	1	4	4	PVE	SILO	1
15	1	4	4	PVE	SILO	1
16	1	4	4	PVE	SILO	1
17	1	4	4	PVE	TREMONHA	
18	1	4	4	PVE	TREMONHA	
19	1	4	4	PVE	TREMONHA	

Figura 5A Cálculos das pressões, selecionando a opção do produto armazenado e, também, o tipo de tremonha concêntrica e excêntrica (25%, 30%, 35% e 43%) para fluxo de massa

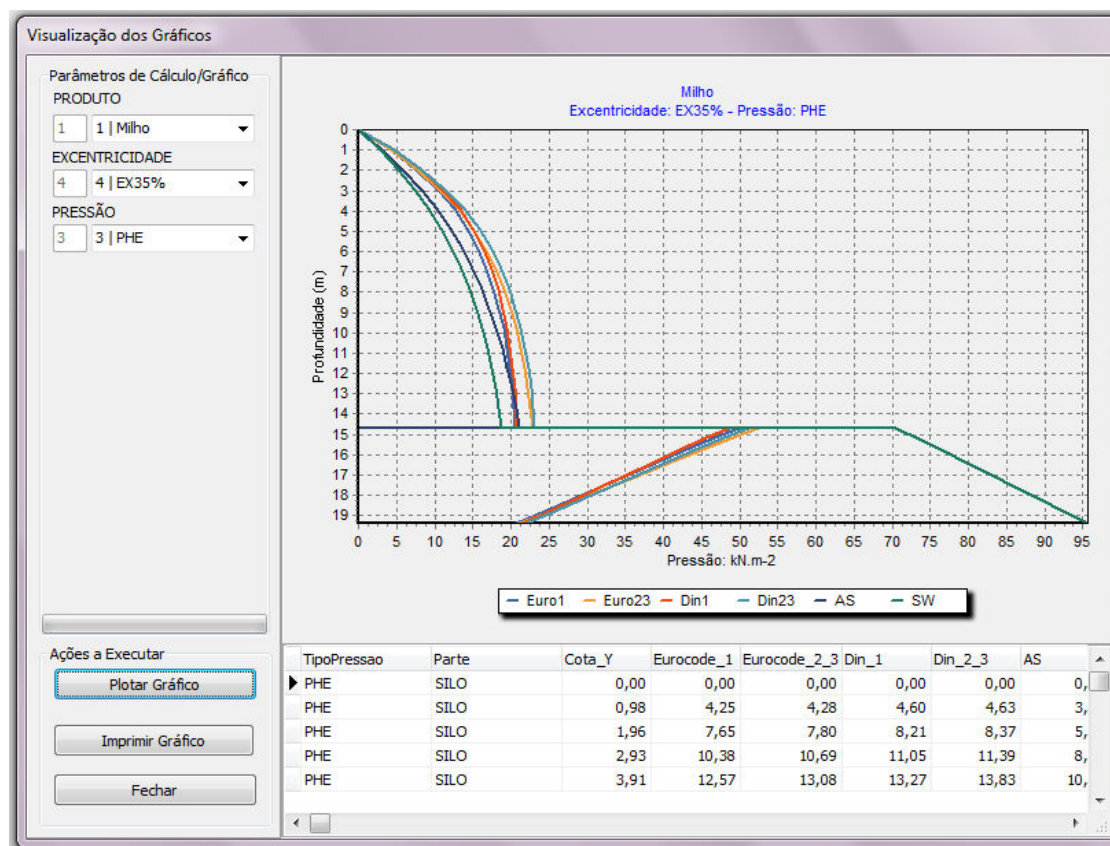


Figura 7A Plotagem e visualização do gráfico da pressão horizontal estática

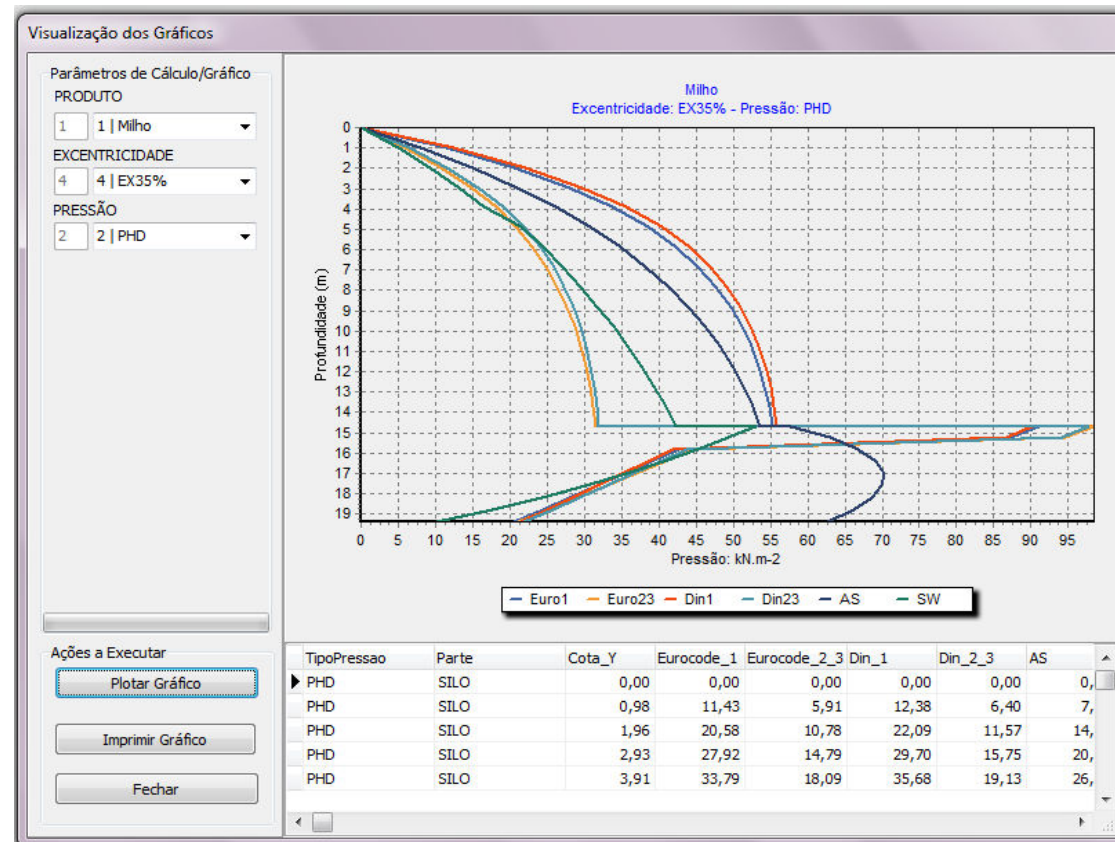


Figura 8A Plotagem e visualização do gráfico da pressão horizontal dinâmica

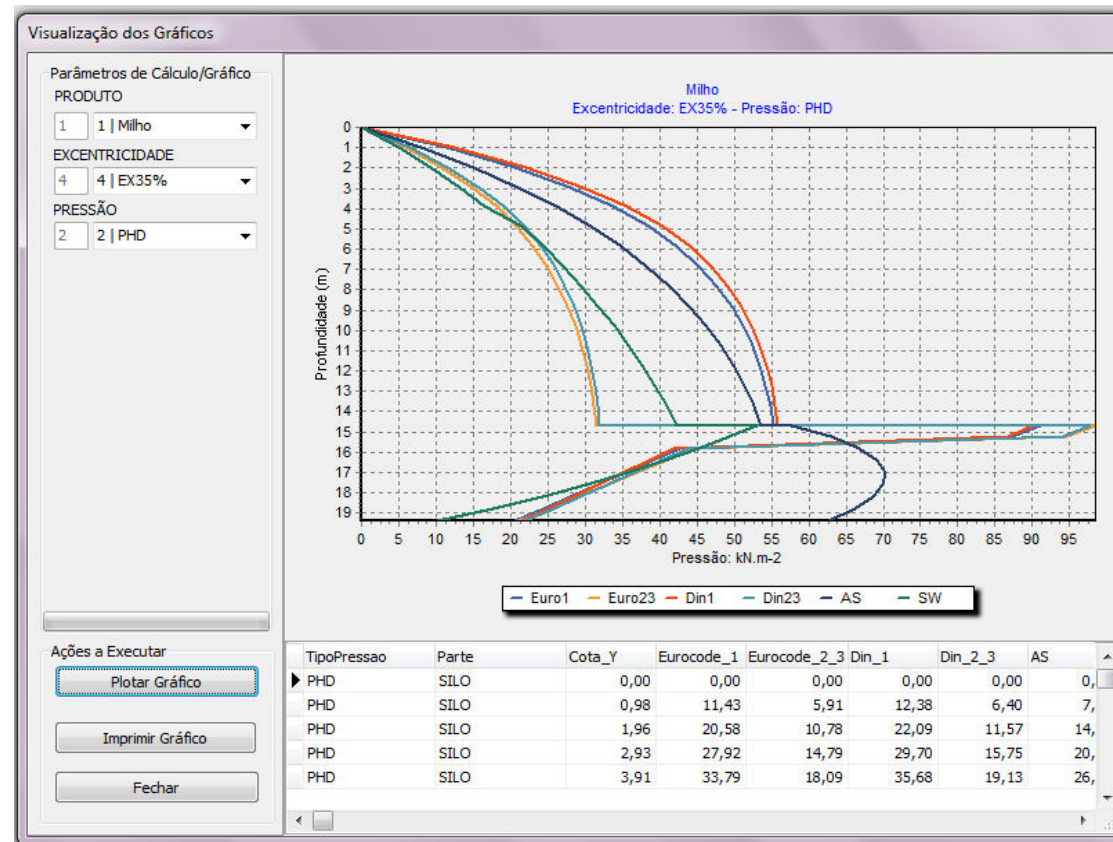


Figura 9A Plotagem e visualização do gráfico da pressão de atrito dinâmica