



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

CURSO DE Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade

INFLUÊNCIA DA EXCÊNTRICIDADE E MÚLTIPLAS SAÍDAS NA GEOMETRIA DO CANAL DE FLUXO EM SILOS BAIXOS

Diógenes Ferreira Resende Gomes

2025

CAMPO GRANDE | MS

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E
SUSTENTABILIDADE

INFLUÊNCIA DA EXCÊNTRICIDADE E MÚLTIPLAS SAÍDAS NA
GEOMETRIA DO CANAL DE FLUXO EM SILOS BAIXOS

DIÓGENES FERREIRA RESENDE GOMES

Trabalho de Conclusão Final de Curso do Mestrado Profissional, pela Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. ANDRÉS BATISTA CHEUNG

Campo Grande – MS

AGOSTO/2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e irmão, Humberto, Alessandra e Christopher por todo o apoio e força; às minhas queridas avós Francisca e Marlene (*in memoriam*), por me ensinarem a aproveitar o momento presente e ter calma durante os momentos difíceis; e à minha noiva Cecília, que com carinho, me apoiou e incentivou constantemente, durante todo o tempo, inclusive nos momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Andrés Batista Cheung, expresso a minha mais sincera gratidão por sua dedicação com cada etapa deste trabalho, pela orientação segura, pela paciência, por todo o ensinamento compartilhado. A experiência e a disponibilidade para o diálogo foram fundamentais para que este trabalho tomasse forma, contribuindo não apenas para o resultado, mas para o meu próprio crescimento acadêmico e individual.

Agradeço também ao programa de pós-graduação stricto sensu em Eficiência Energética e Sustentabilidade (PPGEES), ao corpo docente pelas contribuições valiosas ao longo do tempo, à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo incentivo à educação e ao desenvolvimento profissional.

Ainda, agradeço aos meus amigos Ronnie Saiar e Charles Silva pela contribuição valiosa durante os ensaios experimentais.

Deixo os meus mais sinceros agradecimentos aos membros da banca de qualificação e defesa, Prof.^a Dra. Ana Paula da Silva Milani e Prof. Dr. Carlito Calil Junior, por suas valiosas sugestões, que contribuíram para o aperfeiçoamento deste trabalho.

“Nenhum homem entra duas vezes no mesmo rio, pois não é o mesmo rio e ele não é o mesmo homem.”

- Heráclito de Éfeso, 470 a.C.

RESUMO

A busca por maior eficiência no armazenamento e segurança de produtos a granel tem motivado estudos sobre o fenômeno do descarregamento excêntrico em silos. No Brasil, silos baixos são amplamente empregados por apresentarem menor custo de implantação em relação aos silos esbeltos. Contudo, suas características geométricas e a configuração do canal de fluxo influenciam o descarregamento, podendo provocar estagnação do produto nas paredes e aumento das pressões laterais, com risco de colapso estrutural. O objetivo desta pesquisa foi analisar o comportamento geométrico do produto durante o descarregamento em um modelo de silo baixo, considerando três configurações de saída, e relacionar os resultados à ODS 9 (infraestruturas resilientes e industrialização sustentável), baseado em um protótipo que colapsou. O estudo confirma que a configuração das saídas determina se o silo seguirá um descarregamento próximo ao esperado ou se apresentará pressões excêntricas que comprometem a segurança estrutural. Portanto, seguindo como base os resultados do modelo 1:50, a Condição 2 (saídas unilaterais) mostrou-se a mais crítica, seguida pela Condição 3 (saídas inferiores), sendo a Condição 1 a mais favorável, pois apresenta maior simetria no descarregamento. Foi identificado que nos quadrantes “E e G” do perímetro da circunferência do silo foram os pontos recorrentes de maior solicitação de esforços. Como contribuição prática, este estudo propõe ao projetista a aplicação da teoria de Coulomb associada aos padrões de produto estagnado observados, de modo a estimar os empuxos ativos E_a e as pressões p_h em taludes inclinados variando ao longo do perímetro do silo. A análise do canal de fluxo e da configuração do material estagnado nas paredes permite representar de forma mais realista a distribuição assimétrica dos empuxos, fornecendo parâmetros de projeto mais seguros para o dimensionamento estrutural.

Palavras-chave: geometria de funil de saída, ângulo do canal de fluxo, descarga assimétrica, modelo em escala reduzida, empuxo ativo.

ABSTRACT

The search of greater efficiency in the storage and safety of bulk products has motivated studies on the phenomenon of eccentric discharge in silos. In Brazil, squat silos are widely employed because they have a lower implementation cost compared to slender and tall silos. However, their geometric characteristics and the configuration of the flow channel influence discharge, potentially causing material stagnation on the walls and an increase in lateral pressures, with a risk of structural collapse. The objective of this research was to analyze the geometric behavior of the material during discharge in a squat silo model, considering three outlet configurations, and to relate the results to SDG 9 (resilient infrastructure and sustainable industrialization) based on a prototype that collapsed. The study confirms that the outlet configuration determines whether the silo will follow an expected discharge pattern or will develop eccentric pressures that compromise structural safety. Thus, based on the results of the 1:50 model, Condition 2 (unilateral outlets) proved to be the most critical, followed by Condition 3 (bottom outlets), while Condition 1 (all outlets) was the most favorable because it exhibited more symmetric discharge. It was identified that quadrants “E and G” of the silo circumference were the recurring locations of greatest stress. As a practical contribution, this study proposes that designers apply Coulomb’s theory combined with the observed patterns of stagnant material to estimate active thrusts E_a and horizontal pressures p_h on inclined wedges varying around the silo perimeter. Analysis of the flow channel and the configuration of stagnant material on the walls allows a more realistic representation of the asymmetric distribution of thrusts, providing safer design parameters for structural sizing.

Keywords: outlet funnel geometry, angle of repose, asymmetric discharge, scaled-down model, active thrust.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Silo baixo à esquerda da imagem, em Vista Alegre - MS.	12
Figura 2 - (a) Silo esbelto, com relação $HD = 3,26$; (b) silo $HD = 0,91$	12
Figura 3 - Pressões assimétricas devido ao talude.	14
Figura 4 - Pressões oriundas do produto armazenado.	15
Figura 5 - (a) Ruptura de um silo baixo em São Luis - MA.	16
Figura 6 - Padrão para a distribuição circunferencial de pressões normais na parede de um silo com descarga excêntrica.	17
Figura 7 - Deformação na parede do silo metálico em estágio inicial devido ao descarregamento excêntrico.	21
Figura 8 - Colapso de silo devido a falha estrutural.	21
Figura 9 - Ruptura por instabilidade devido ao descarregamento excêntrico.	22
Figura 10 - O fluxo excêntrico de sementes de linho que se preenche da esquerda e se descarrega pela direita, com o modelo de modo de fluxo e o modelo de contornos de velocidade, respectivamente.	23
Figura 11 - Fluxos de funil e em massa respectivamente	24
Figura 12 - Silo baixo a esquerda e silo esbelto à direita.	25
Figura 13 - Disposição dos manômetros em silo de escala reduzida.	26
Figura 14 - Parede lateral da saída do canal principal (MR).	27
Figura 15 - Distribuição de pressão	29
Figura 16 - Gráfico ilustrando a interpretação de Taylor com relação a Teoria de Coulomb.	31
Figura 17 - Coulomb pode ser aplicado em ambos os cenários: parede inclinada ou nivelada na vertical.	33
Figura 18 - Representação gráfica da pilha inclinada simples.	34
Figura 19 - Representação gráfica da pilha inclinada com talude duplo.	36
Figura 20 - Silo real utilizado como objeto de estudo.	40
Figura 21 - Fluxograma de atividades realizadas	42
Figura 22 - Modelo de silo baixo em escala pouco reduzida.	43
Figura 23 - Segundo modelo de silo baixo em escala pouco reduzida.	44
Figura 24 - Aparato de verificação de ângulo de repouso.	45
Figura 25 - Aparelho granulométrico Solotest.	46
Figura 26 - Aparelho de cisalhamento direto TSG 70–140 AVT.	47

Figura 27 - (a) Elementos deslizantes para abertura das saídas. (b) Estrutura de régua graduada no topo. (c) Vista da base fixa. (d) Distribuição dos relógios comparadores.	48
Figura 28 - Representação do posicionamento dos instrumentos de medição.	48
Figura 29 - Projeto inicial dos acessórios de medição: elementos deslizantes para abertura das saídas, régua de suporte da trena, suporte para fixação dos elementos deslizantes.	49
Figura 30 - (a) Plataforma de compensado naval. (b) Estrutura de suporte da régua. (c) Régua de suporte da trena laser. (d) Elementos deslizantes para abertura das saídas. (e) Fixação dos elementos deslizantes.	50
Figura 31 - Representação do posicionamento dos relógios comparadores e instrumentos de medição de altura do produto e deslocamento da parede.	51
Figura 32 - Silo 1:120 - (a) Todas as saídas abertas; (b) Apenas uma das saídas laterais abertas; (c) Apenas quatro das saídas inferiores abertas.	52
Figura 33 - Silo 1:50 - (a) Todas as saídas abertas; (b) Apenas uma das saídas laterais abertas; (c) Apenas quatro das saídas inferiores abertas.	53
Figura 34 - Esquema geométrico para obtenção do ângulo de repouso.	53
Figura 35 - Curva granulométrica da areia.	54
Figura 36 - Ângulo de atrito com a parede: (a) aço liso e (b) rugoso.	55
Figura 37 - Gráfico da altura do produto em diferentes estágios, vista frontal (a) e lateral (b) em relação às saídas.	56
Figura 38 - Ângulos formados pelo produto na condição 1, da carga total à 20% do produto armazenado, da esquerda à direita respectivamente.	57
Figura 39 - Curvas de nível da condição 1, da carga total à 20% do produto armazenado, da esquerda à direita respectivamente.	57
Figura 40 - Gráfico da altura do produto em diferentes estágios, vista frontal (a) e lateral (b) em relação às saídas.	58
Figura 41 - Ângulos formados pelo produto na condição 2, da carga total à 20% do produto armazenado, da esquerda à direita respectivamente.	59
Figura 42 - Curvas de nível da condição 2, da carga total à 20% do produto armazenado da esquerda à direita respectivamente.	59
Figura 43 - Gráfico da altura do produto em diferentes estágios, vista frontal (a) e lateral (b) em relação às saídas.	60
Figura 44 - Ângulos formados pelo produto na condição 3, da carga total à 20% do produto armazenado, da esquerda à direita respectivamente.	61

Figura 45 - Curvas de nível da condição 3, da carga total à 20% do produto armazenado da esquerda à direita respectivamente.	61
Figura 46 - Deslocamento em milímetros da parede do silo, registrado pelos relógios comparadores na condição 1.....	63
Figura 47 - Deslocamento em milímetros da parede do silo, registrado pelos relógios comparadores na condição 2.....	63
Figura 48 - Deslocamento em milímetros da parede do silo, registrado pelos relógios comparadores na condição 3.....	64
Figura 49 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos ϕ_r , d(c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e dr(f), com carga total à 100% do produto armazenado.	65
Figura 50 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos ϕ_r , d(c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e dr(f), com carga total à 80% do produto armazenado.	67
Figura 51 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos ϕ_r , d(c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e dr(f), com carga total à 60% do produto armazenado.	68
Figura 52 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos ϕ_r , d(c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e dr(f), com carga total à 40% do produto armazenado.	70
Figura 53 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos ϕ_r , d(c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e dr(f), com carga total à 20% do produto armazenado.	71
Figura 54 - Representação da evolução do fluxo no processo de descarregamento entre as zonas de limites: (a) Descarregamento em 80 % (b) Descarregamento em 60 %, (c) Descarregamento em 40 %, (d) Descarregamento em 20 %.	73
Figura 55 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos ϕ_r , d(c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e dr(f), com carga total à 100% do produto armazenado.	74
Figura 56 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos ϕ_r , d(c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e dr(f), com carga total à 80% do produto armazenado.	75
Figura 57 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos ϕ_r , d(c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e dr(f), com carga total à 60% do produto armazenado.	76
Figura 58 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos ϕ_r , d(c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e dr(f), com carga total à 40% do produto armazenado.	78
Figura 59 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos ϕ_r , d(c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e dr(f), com carga total à 20% do produto armazenado.	79

Figura 60 - Representação da evolução do fluxo no processo de descarregamento entre as zonas de limites: (a) Descarregamento em 80 % (b) Descarregamento em 60 %, (c) Descarregamento em 40 %, (d) Descarregamento em 20 %.	81
Figura 61 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos ϕ_r , d(c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e dr(f), com carga total à 100% do produto armazenado.	82
Figura 62 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos ϕ_r , d(c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e dr(f), com carga total à 80% do produto armazenado.	83
Figura 63 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos ϕ_r , d(c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e dr(f), com carga total à 60% do produto armazenado.	84
Figura 64 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos ϕ_r , d(c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e dr(f), com carga total à 40% do produto armazenado.	86
Figura 65 - Representação da evolução do fluxo no processo de descarregamento entre as zonas de limites: (a) Descarregamento em 80 % (b) Descarregamento em 60 %, (c) Descarregamento em 40 %, (d) Produto estagnado.	87
Figura 66 - Ângulos obtidos em leitura no cenário 1 a 80% da carga total.	89
Figura 67 - Resultados do cálculo da pilha inclinada com talude simples e duplo talude no cenário 1 a 80% da carga total.	91
Figura 68 - Ângulos obtidos em leitura no cenário 1 a 40% da carga total.	94
Figura 69 - Resultados do cálculo da pilha inclinada com talude simples e duplo talude no cenário 1 a 40% da carga total.	95
Figura 70 - Ângulos obtidos em leitura no cenário 2 a 80% da carga total.	98
Figura 71 - Resultados do cálculo da pilha inclinada com talude simples e duplo talude no cenário 2 a 80% da carga total.	99
Figura 72 - Ângulos obtidos em leitura no cenário 2 a 40% da carga total.	102
Figura 73 - Resultado do cálculo da pilha inclinada com duplo talude no cenário 2 a 40% da carga total.	103
Figura 74 - Ângulos obtidos em leitura no cenário 3 a 80% da carga total.	106
Figura 75 - Resultados do cálculo da pilha inclinada com talude simples e duplo talude no cenário 3 a 80% da carga total.	107
Figura 76 - Ângulos obtidos em leitura no cenário 3 a 40% da carga total.	110
Figura 77 - Resultados do cálculo da pilha inclinada com talude simples e duplo talude no cenário 3 a 40% da carga total.	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos silos de acordo com o aspecto HD.	13
Tabela 2 – Resultados das propriedades da areia obtidas no ensaio de cisalhamento direto.	55
Tabela 3 – Deslocamento dos relógios do ensaio 1.	72
Tabela 4 – Deslocamento dos relógios do ensaio 2.	80
Tabela 5 – Deslocamento dos relógios do ensaio 3.	87
Tabela 6 – Alturas obtidas em leitura no cenário 1 a 80% da carga total (cm).	89
Tabela 7 – Alturas obtidas em leitura no cenário 1 a 40% da carga total (cm).	93
Tabela 8 – Alturas obtidas em leitura no cenário 2 a 80% da carga total (cm).	97
Tabela 9 – Alturas obtidas em leitura no cenário 2 a 40% da carga total (cm).	101
Tabela 10 – Alturas obtidas em leitura no cenário 3 a 80% da carga total (cm).	105
Tabela 11 – Alturas obtidas em leitura no cenário 3 a 40% da carga total (cm).	109
Tabela 12 – Os maiores e menores resultados de pressão, empuxo ativo e K_a de 80% e 40% para cada cenário.	113

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	31
Equação 2	32
Equação 3	33
Equação 4	34
Equação 5	34
Equação 6	34
Equação 7	34
Equação 8	35
Equação 9	35
Equação 10	35
Equação 11	35
Equação 12	35
Equação 13	35
Equação 14	36
Equação 15	36
Equação 16	36
Equação 17	37
Equação 18	37
Equação 19	37
Equação 20	37
Equação 21	37
Equação 22	37
Equação 23	37
Equação 24	37
Equação 25	43
Equação 26	44
Equação 27	114

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

ASCE – American Society of Civil Engineers

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

DEM – Discrete Element Method

EN / Eurocode – European Norm / Eurocode

et al. – e outros

ISO – International Organization for Standardization

NBR – Norma Brasileira

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Solotest – Aparelho granulométrico (nome comercial)

TSG 70–140 AVT – Aparelho de cisalhamento direto

UFMS – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

- % – Percentual de carga ou descarga
- \pm – Mais ou menos (tolerância)
- \approx – Aproximadamente
- α – Ângulo de obliquidade
- c – Coesão aparente
- D – Diâmetro do corpo do silo (m)
- γ – Peso específico do produto / do solo (kN/m^3)
- H – Altura total do silo / altura do silo (m)
- H/D – Relação altura/diâmetro (adimensional)
- $K_a / K_a / K$ – Coeficiente de empuxo ativo (adimensional)
- p – Pressão vertical nas paredes laterais / pressão local
- p_0 – Pressão vertical no centro do silo
- p_h – Pressão horizontal na parede vertical (kN/m^2)
- p_n – Pressão normal nas paredes da tremonha
- p_t – Pressão de atrito nas paredes da tremonha
- p_v – Tensão vertical no produto armazenado
- p_w – Pressão de atrito nas paredes verticais
- p_{max} – Pressão máxima na base da parede (kN/m^2)
- X – Altura medida pelo instrumento
- Y – Altura real do produto
- θ – Ângulo genérico (ex.: inclinação do talude) / Ângulo do plano de ruptura
- A_1, A_2 – Áreas auxiliares na pilha inclinada com talude duplo
- AT – Área total da cunha triangular
- $Ac(\theta)$ – Área da cunha de ruptura inclinada (função de θ)
- H_{proj} – Altura projetada na pilha inclinada com duplo talude (m)

E_a – Empuxo ativo (kN/m)

$E_a(\theta)$ – Empuxo ativo em função do ângulo de ruptura (kN/m)

W – Peso da cunha (kN)

$W(\theta)$ – Peso da cunha em função do ângulo de ruptura (kN)

$l(\theta)$ – Comprimento do plano de ruptura (função de θ)

x_p – Distância horizontal da parede até o pico do talude (m)

x_{proj} – Projeção horizontal do talude (m)

x_i – Valor individual de cada ensaio

\bar{x} – Média amostral

$y(\theta)$ – Altura projetada da cunha em função do ângulo θ

$y_1(x), y_2(x)$ – Alturas auxiliares na geometria do talude duplo

y_p – Altura do pico da pilha

β – Ângulo de inclinação da superfície do talude em relação à horizontal

θ_{rup} – Ângulo crítico de ruptura

λ_ϕ – Fator de escala do ângulo de repouso de descarregamento entre modelos

ϕ_e – Ângulo efetivo de atrito interno (°)

$\phi_{r,d}$ – Ângulo de repouso de descarregamento ou canal de fluxo (°)

$\phi_{r,s}$ – Ângulo de repouso superficial (°)

ϕ_w – Ângulo de atrito solo–parede (°)

δ – Ângulo de atrito solo–parede / interface

ρ – Massa específica

Sumário

DEDICATÓRIA	3
AGRADECIMENTOS.....	4
RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE EQUAÇÕES	13
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS	15
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 <i>Justificativa.....</i>	<i>19</i>
2 OBJETIVOS	20
2.1 <i>Objetivos gerais</i>	<i>20</i>
2.2 <i>Objetivos específicos.....</i>	<i>20</i>
3 REVISÃO LITERÁRIA	20
3.1 <i>Os indícios iniciais do descarregamento excêntrico.....</i>	<i>20</i>
3.2 <i>O tipo de fluxo.....</i>	<i>23</i>
3.3 <i>As normas que abrangem o tema</i>	<i>28</i>
3.4 <i>A teoria de Coulomb aplicada em taludes de silos</i>	<i>30</i>
3.5 <i>O cálculo do empuxo ativo E_a para pilha inclinada e talude duplo</i>	<i>33</i>
3.5.1 <i>Cálculo do modelo da pilha inclinada simples</i>	<i>34</i>
3.5.2 <i>Cálculo da pilha inclinada com talude duplo.....</i>	<i>36</i>
3.6 <i>Comparações entre estudos de outros autores.....</i>	<i>37</i>
4 MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1 <i>Considerações iniciais.....</i>	<i>38</i>
4.2 <i>A origem do material de estudo</i>	<i>42</i>

4.2.1	Modelo de escala 1:120.....	43
4.2.2	Modelo de escala 1:50.....	43
4.3	<i>Origem do produto</i>	45
4.4	<i>Ensaio do ângulo de repouso</i>	45
4.5	<i>Ensaio de granulometria</i>	45
4.6	<i>Ensaio de cisalhamento direto</i>	46
4.7	<i>Ensaio de cisalhamento com as paredes</i>	46
4.8	<i>Ensaio nos silos modelos</i>	47
4.8.1	Modelo 1:120.....	47
4.8.2	Modelo 1:50.....	49
4.9	<i>As condições de descarregamento dos silos</i>	52
5	RESULTADOS	53
5.1	<i>Ângulo de repouso</i>	53
5.2	<i>Teor de umidade</i>	54
5.3	<i>Ensaio de granulometria</i>	54
5.4	<i>Cisalhamento direto e nas paredes</i>	54
5.5	<i>Resultados da geometria dos canais de fluxo do modelo 1:120</i>	56
5.5.1	Condição 1 - Simulação com todas as saídas abertas.....	56
5.5.2	Condição 2 - Simulação com as saídas de uma lateral aberta.....	57
5.5.3	Condição 3 - Simulação com as saídas inferiores abertas.....	60
5.6	<i>Resultados da geometria dos canais de fluxo do modelo 1:50</i>	64
5.6.1	Condição 1 - Simulação com todas as saídas abertas.....	64
5.6.2	Condição 2 - Simulação com as saídas de uma lateral aberta.....	73
5.6.3	Condição 3 - Simulação com as saídas inferiores abertas.....	81
5.7	<i>Aplicação da teoria de Coulomb – Uma análise do empuxo ativo máximo, das pressões máximas e do coeficiente de empuxo do modelo 1:50</i>	88
5.7.1	Condição 1 – Variações em 80%.....	88
5.7.2	Condição 1 – Variações em 40%.....	93
5.7.1	Condição 2 – Variações em 80%.....	97
5.7.2	Condição 2 – Variações em 40%.....	101
5.7.3	Condição 3 – Variações em 80%.....	104
5.7.4	Condição 3 – Variações em 40%.....	109
5.8	<i>Fator de escala dos modelos 1:120 e 1:50</i>	113
5.9	<i>Proposta para projetistas e proprietários de silos</i>	114

6	CONCLUSÕES.....	115
7	REFERÊNCIAS.....	118
	APÊNDICE	123

1 INTRODUÇÃO

Os silos são estruturas projetadas para o armazenamento de uma variedade de grãos, rações, fertilizantes e entre outros. São fundamentais para o auxílio da preservação de produtos agrícolas e industriais, protegendo contra animais, insetos e as variações climáticas. De acordo com Palma (2005), o uso de silos para armazenar produtos é tido como uma solução exequível a favor da economia de espaço físico, redução de mão de obra e logística, sendo eficiente no armazenamento.

Tendo em vista que o Brasil passa por um déficit em armazenagem, é demasiadamente importante que algumas soluções sejam encontradas com o viés de otimizar a grande demanda por estocagem. Portanto, a maioria dos pequenos e grandes produtores brasileiros tem uma preferência pela construção de silos de menor capacidade de armazenamento, pois se beneficiam pelo fator econômico. De acordo com Madrona (2008), a necessidade de armazenar grandes volumes de produtos em espaços reduzidos impulsiona a demanda por silos entre cooperativas, produtores e indústrias e conseqüentemente, o armazenamento proporciona vantagens econômicas ao permitir a gestão do escoamento das safras e do abastecimento, reduzindo a dependência de importações.

Entre os tipos de silos mais conhecidos, estão os de concreto armado, madeira, estruturas metálicas, de alvenaria e argamassa armada. Os silos também podem ser classificados através de sua geometria, e dentre estes, encontram-se os silos baixos e os esbeltos. Os silos baixos e os esbeltos são caracterizados por se distinguirem em sua geometria, sendo estes do tipo vertical, e no caso dos silos baixos, são classificados pela razão da altura em relação ao diâmetro que seja este menor que 1,5, como mostrado nas Figuras 1 e 2 (Palma, 2005). Em geral, os silos podem ser classificados pelos seguintes fatores:

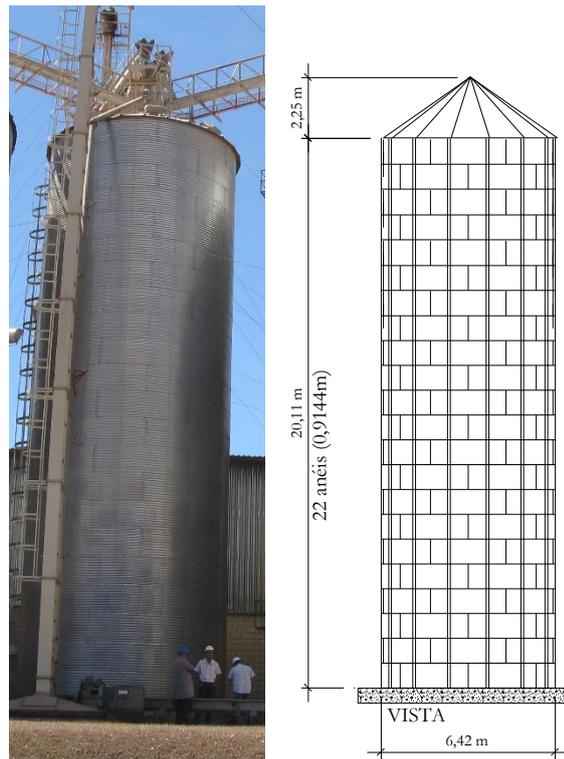
- Fluxo do descarregamento;
- Geometria da estrutura;
- Geometria do fluxo durante o descarregamento; e
- Formato de fundo do silo.

Figura 1 - Silo baixo à esquerda da imagem, em Vista Alegre - MS.

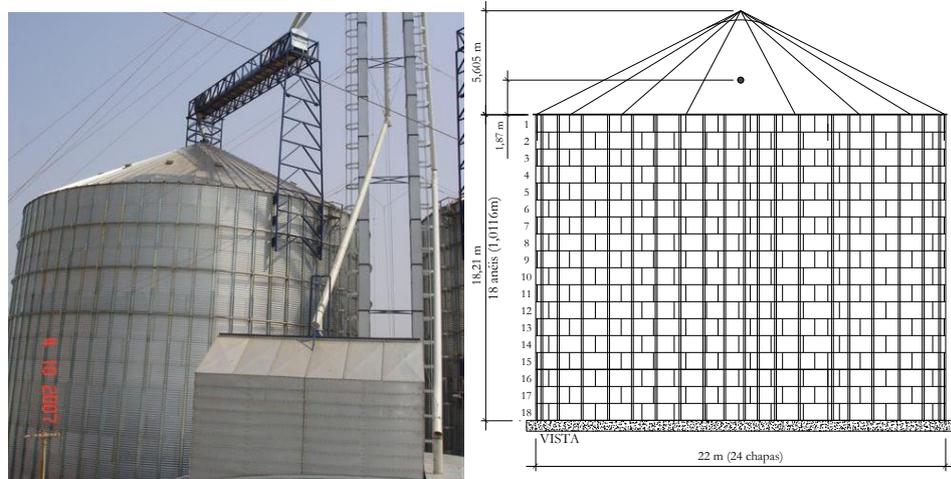


Fonte: O autor.

Figura 2 – (a) Silo esbelto, com relação $\frac{H}{D} = 3,26$; (b) silo $\frac{H}{D} = 0,91$.



(a)



(b)

Fonte: O autor.

Algumas normas internacionais possuem a sua própria normatização no que tange a classificação do silo quanto a sua esbeltez, como mostrado na Tabela 1, onde (H) representa a altura total do silo, (D) representa o diâmetro do corpo do silo.

Tabela 1 - Classificação dos silos de acordo com o aspecto $\frac{H}{D}$.

NORMA	CLASSIFICAÇÃO		
	BAIXO	MEDIANAMENTE ESBELTOS	ESBELTOS
EN 1991-4:2024	$0,4 \leq H/D < 1,0$	$1,0 \leq H/D \leq 2,0$	$H/D > 2,0$
ES ISO 11697:2012	$H/D < 1,5$	$1 \leq H/D < 1,5$	$H/D > 1,5$
DIN 1055-06:2005	$0,4 \leq H/D < 1,0$	$1,0 \leq H/D < 2,0$	$H/D > 2,0$
ANSI/ASAE S433.1:2019	$H/D \leq 2,0$	-	$H/D \geq 2,0$
ACI 313:2016	$H/D \leq 2,0$	-	$H/D \geq 2,0$
AS 3774:1996	$H/D < 1,0$	$1,0 \leq H/D \leq 3,0$	$H/D > 3,0$

Fonte: O autor.

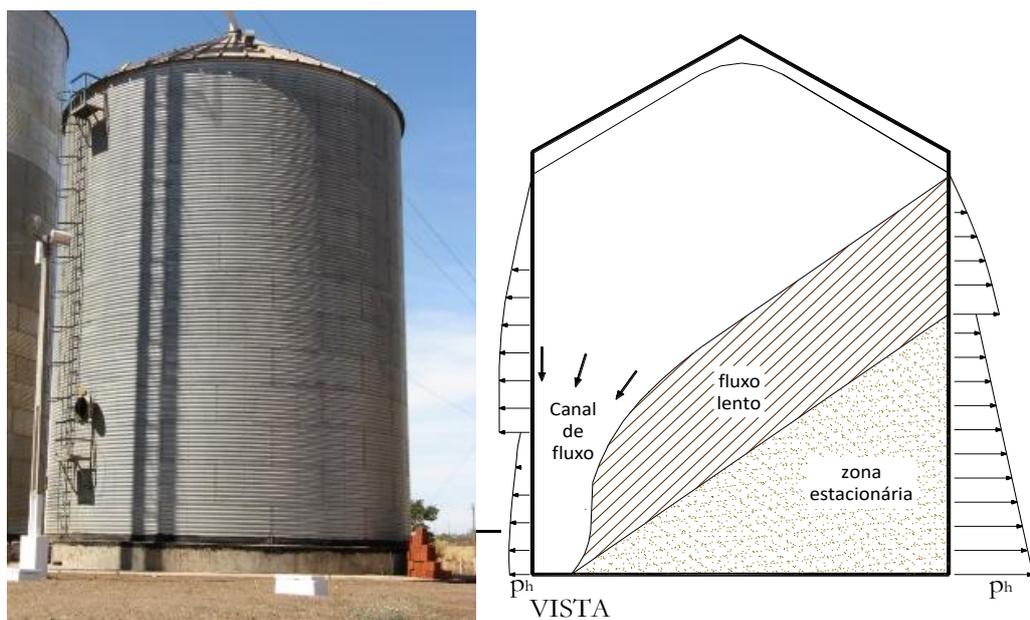
No Brasil, os silos baixos são considerados como o tipo de silo de maior viabilidade econômica. Segundo Calil Jr. (1987), observa-se que os silos agrícolas frequentemente apresentam uma relação baixa entre a altura e o diâmetro ou lado, variando de 0,75 a 1,5, e possuem fundo plano, pois essa configuração é vantajosa devido ao aumento no diâmetro do silo, que amplia significativamente sua capacidade, além de tornar a manipulação dos silos baixos mais simples e econômica.

Considerando a importância dos silos, os setores agrícola e da construção civil têm se empenhado em melhorar a eficiência estrutural dessas estruturas. O objetivo é garantir a segurança, otimizar os métodos de construção, reduzir os custos de produção e aumentar a confiabilidade. Os silos baixos podem ser construídos com vários tipos de materiais e combinações, no entanto, o de estrutura metálica é o mais encontrado no mercado, sendo este de chapa lisa ou corrugada (Freitas, 2001).

Em comparação com outras estruturas de armazenamento, nos silos baixos as pressões dinâmicas são desprezíveis. No entanto, eles apresentam esforços de flexão excessivos nas paredes devido aos taludes formados pela assimetria no descarregamento do produto, como pode ser observado na Figura 3.

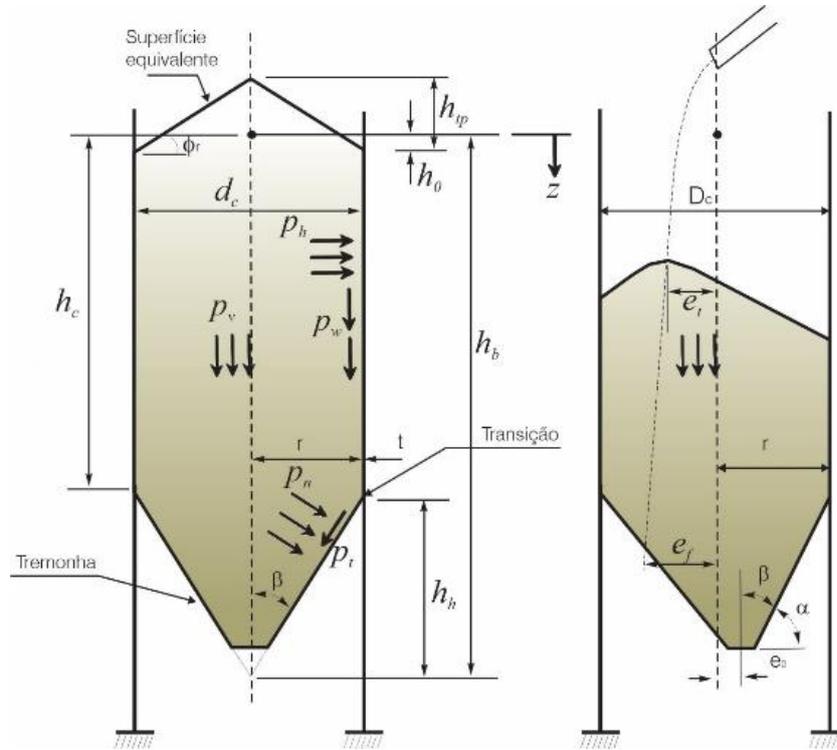
Segundo De Souza (2022), as pressões advindas do produto podem ser normais e paralelas à parede vertical do silo e da tremonha (Figura 4). A pressão horizontal (p_h) na parede vertical é causada pelo produto armazenado, enquanto a pressão normal (p_n) ocorre nas paredes da tremonha. A pressão de atrito (p_t) do produto armazenado age contra as paredes da tremonha, e a tensão vertical (p_v) é aplicada no produto armazenado. Além disso, a pressão de atrito (p_w) do produto armazenado também é exercida nas paredes verticais. O produto estagnado está diretamente relacionado com os padrões de canal de fluxo e a geometria do silo, este fenômeno é conhecido como descarregamento excêntrico.

Figura 3 - Pressões assimétricas devido ao talude.



Fonte: O autor.

Figura 4 – Pressões oriundas do produto armazenado.



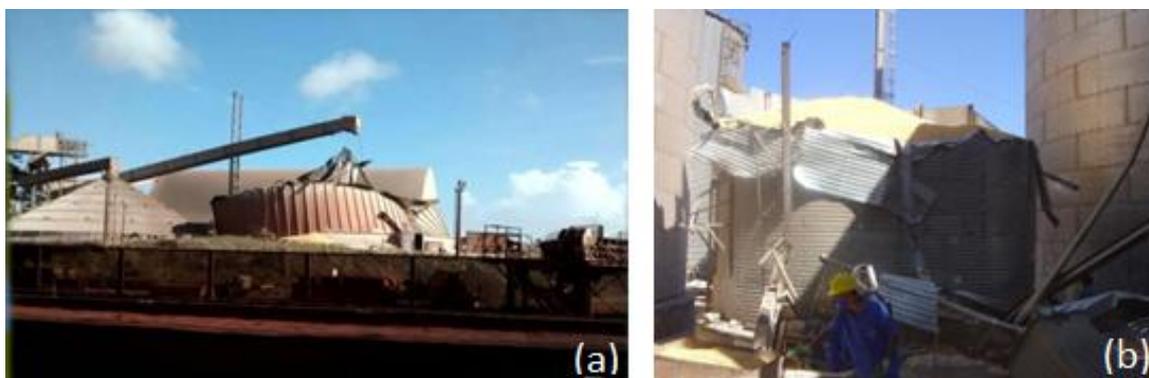
Fonte: Adaptado da norma europeia EN 1991-4: 2024.

No que tange a eficiência estrutural dos silos baixos, o descarregamento excêntrico tem exercido grande influência, ocasionando a ruptura das paredes como consequência (Figura 5), pois os padrões associados de pressões normais e o atrito resultante entre os produtos e as paredes, contribuem para a geração de tensões assimétricas. Este fenômeno provoca a formação de um momento fletor, o qual induz tensões de tração e compressão na estrutura, aumentando o risco de instabilidade nas paredes do silo.

De acordo com Zhu (2012), a investigação sobre silos representa um desafio significativo e são considerados como geradores de padrões de pressões altamente assimétricas. O fenômeno da descarga excêntrica é amplamente reconhecido como uma condição de carregamento mais grave do que a descarga concêntrica ou mesmo o preenchimento total do silo, sendo conhecido por ser a causa de boa parte dos colapsos estruturais de silos metálicos.

Figura 5 – (a) Ruptura de um silo baixo em São Luis - MA.

(b) Colapso de silo devido a falha estrutural devido ao descarregamento excêntrico Brasília-DF..

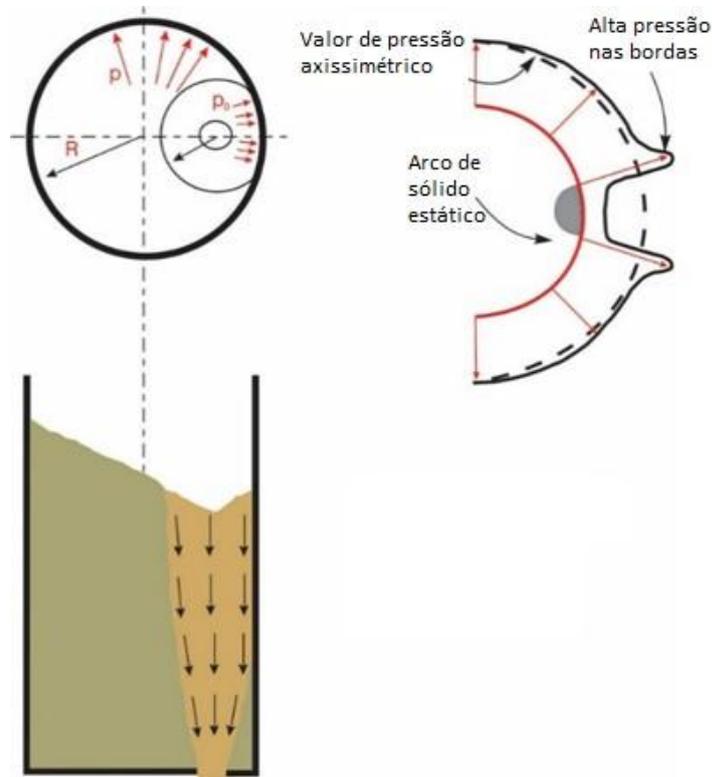


Fonte: (a) Globo (2023); (b) Cheung e Calil (2015).

O descarregamento excêntrico é um fenômeno que vem sendo estudado por vários pesquisadores desde os anos 1960. Diversos experimentos sobre descarregamento e seu respectivo comportamento foram realizados por alguns pesquisadores, como os de Jenike, (1967); Pieper e Wagner, (1969); Reimbert (1980); Ross (1980); Britton (1984); Hampe (1984); McLean (1985); Han (2019); Sun (2020); Trung (2020); Wiącek (2021); Sagarnaga (2022); Xu (2022) e Carr (2023). Vários projetistas propuseram métodos para a verificação dos deslocamentos causados pelas pressões sob descarregamentos excêntricos, sendo estes: Jenike, (1967); ACI 313/16, (2016) e Rotter, (2001).

Devido aos diversos estudos elaborados, observou-se que quando o produto é descarregado de forma assimétrica, este tende a provocar sobrepressões nas paredes do silo, gerando uma sobrecarga não prevista, sendo que estas pressões são frutos das características geométricas do silo e do descarregamento do produto. Em busca de um melhor entendimento das causas do fenômeno, uma generalização da seção transversal do canal de fluxo foi concebida por Jenike (1967) e a suposição de lados verticais do canal e distribuição de pressão (Figura 6) que ilustra como a pressão dentro do silo não é distribuída uniformemente e a pressão vertical tende a ser maior no centro (p_0) e diminui em direção às paredes laterais (p).

Figura 6 – Padrão para a distribuição circunferencial de pressões normais na parede de um silo com descarga excêntrica.



Fonte: Adaptado de Jenike (1967).

Durante a descarga, o produto na zona central do silo está em movimento, enquanto o produto nas bordas está estagnado, formando um arco estático que redistribui as forças para as paredes do silo. Esse fenômeno resulta em maiores pressões nas bordas da parede do silo, conforme mostrado na vista em corte. Essas observações são críticas para o projeto estrutural de silos, pois a pressão assimétrica precisa ser considerada para garantir a integridade e a segurança do silo durante o enchimento e esvaziamento. Portanto, o aumento de pressões ocorre como consequência da estagnação de produto nas bordas e pode ser caracterizado como um talude.

A formação dos taludes nos silos provém de produto estagnado que não acompanha o fluxo do descarregamento. De acordo com Gerscovich (2016), um talude pode ser definido como qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha, podendo ser natural, uma encosta, ou resultante da ação humana, como no caso de aterros e cortes. Não obstante, os taludes nos silos são provenientes de ação humana em decorrência de uma condição de operação em que o produto descarrega de forma imprevista, situando-se como um exemplo prático dessa definição. Gerscovich salienta que a ruptura se caracteriza pela formação de uma superfície

contínua de cisalhamento na massa de solo. Em torno dessa superfície, uma camada sofre alterações em suas propriedades durante o processo de ruptura, dando origem à chamada zona cisalhada.

Analogamente, observa-se que existe uma similaridade do comportamento de taludes de solos e de produtos em silos, pois a geometria e o mecanismo de formação dessa superfície de talude assemelham-se aos perfis encontrados na engenharia geotécnica, obedecendo os princípios de equilíbrio e resistência ao cisalhamento aplicados a encostas naturais e cortes artificiais, abrindo espaço para a aplicação de métodos consolidados, como a teoria de Coulomb.

Através da teoria de Coulomb, torna-se possível determinar o ângulo crítico de inclinação em que o empuxo ativo atinge seu valor máximo, bem como calcular a pressão horizontal máxima em pontos específicos da superfície taludada. Dessa forma, a teoria de Coulomb fornece uma base teórica robusta para a análise e dimensionamento de taludes formados em silos baixos submetidos a descarregamento descentralizado, possibilitando uma análise mais aprofundada em termos quantitativos com relação as pressões decorrentes da estagnação de produto nas paredes dos silos. Conseqüentemente, a aplicação de teorias utilizadas na área geotécnica incentivou diversos pesquisadores a trabalharem com modelos em escalas reduzidas à fim de simularem situações em que ocorressem a formação de taludes, utilizando-se desde paredes metálicas a paredes de concreto armado.

De acordo com Rotter (2001), os estudos pioneiros de Jenike (1967) e outros pesquisadores modelaram a parede do silo esbelto como um conjunto de anéis independentes para analisar as pressões durante a descarga excêntrica. Essa abordagem não é válida para silos de concreto armado porque eles têm uma alta capacidade de flexão vertical. Isso indica que os silos de aço são mais suscetíveis a danos devido à sobrecarga gerada pela descarga excêntrica e instabilidade da parede (Rotter, 1989).

Diante do exposto, é fundamental investigar as causas de colapsos em silos baixos, como no caso do silo pré-fabricado de concreto protendido de 62 m de diâmetro (Figura 5). Apesar de sua construção em concreto, a falha ocorreu devido aos perfis de pressão normal e ao atrito entre o produto e as paredes, gerando pressões assimétricas e deslocamentos laterais sob o apoio. Ademais, silos metálicos de baixa altura se mostram ainda mais suscetíveis ao descarregamento excêntrico. Por isso, são necessários estudos detalhados, com validação

experimental em modelos físicos de diferentes escalas, para identificar perfis e sistemas de saída que devem ser evitados por projetistas e produtores de alimentos.

1.1 Justificativa

A ONU (Organização Das Nações Unidas, 2023), definiu 17 metas a serem cumpridas até o ano de 2030, dentre estas metas destaca-se a ODS 9 (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável), que promove a infraestruturas resilientes, industrialização inclusiva e sustentável, e fomentar a inovação.

A armazenagem é destinada à guarda e à conservação, com condições inalteradas de qualidade e quantidade, de produtos agrícolas e grãos. Segundo Weber (1995) as perdas agrícolas se devem a uma série de fatores que são facilmente localizados, muitas de origem técnica, no que diz respeito a qualidade das instalações, o ataque de insetos e fungos, dos roedores, incompetência e ineficiência operacional. No entanto, o desperdício não inicia no campo da pós-colheita, inicia na lavoura e tem continuidade na colheita, no transporte e beneficiamento inadequados e na armazenagem.

Desta forma, seguindo a premissa da ODS 9, ao comparar estudos e normas sobre o fenômeno do descarregamento excêntrico em silos baixos, observa-se a necessidade premente de aprofundar as investigações acerca do impacto desse tipo de descarregamento em silos de baixa esbeltez. Considerando que os silos baixos são predominantemente utilizados no Brasil, devido a fatores econômicos que os tornam acessíveis tanto para grandes quanto para pequenos produtores, torna-se imperativo examinar como esse fenômeno pode influenciar a segurança alimentar.

Além disso, a segurança estrutural dos silos é crucial para evitar falhas catastróficas que possam levar à perda de grandes quantidades de grãos, impactando negativamente a cadeia de suprimento alimentar. A falta de estudos detalhados sobre os esforços de flexão e os padrões de fluxo em silos de baixa esbeltez com descarregamento excêntrico em múltiplas saídas representa uma lacuna significativa no conhecimento atual. A abordagem experimental proposta permitirá desenvolver diretrizes mais robustas para o projeto e operação desses silos, contribuindo para a melhoria da eficiência e segurança na armazenagem de grãos.

O estudo incentiva a adoção de tecnologias e inovações (sensoriamento, automação, modelagem numérica) previstas na ODS 9. Essas inovações permitem respostas mais rápidas a

assimetrias de fluxo, minimizando consumo energético adicional. Ao propor medidas acessíveis, o trabalho apoia tanto grandes empreendimentos quanto pequenos produtores, promovendo industrialização inclusiva.

A aplicabilidade dos resultados permite escalonar soluções testadas em laboratório para protótipos e unidades comerciais. Assim, a pesquisa não apenas avança o conhecimento técnico, mas propõe medidas concretas que atendem aos objetivos de inovação e sustentabilidade da ODS 9. Em suma, o trabalho contribui para tornar a armazenagem mais segura, eficiente e ambientalmente responsável.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Este estudo visa investigar o comportamento da geometria do canal de fluxo durante o processo de descarregamento em um silo baixo com múltiplas saídas excêntricas.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência da geometria de saída (número e disposição das linhas de saída) na ovalização das paredes;
- Analisar analiticamente as pressões geradas durante o descarregamento do silo em suas diferentes fases pela teoria de Coulomb;
- Propor diretrizes de projeto e recomendações para evitar configurações críticas de descarga excêntrica em silos de grande porte.

3 REVISÃO LITERÁRIA

3.1 Os indícios iniciais do descarregamento excêntrico

O descarregamento excêntrico se dá pelo processo de esvaziamento de produto de um silo através de uma configuração de saída, onde o produto flui de forma descentralizada (assimetricamente). A assimetria de fluxo pode ocasionar perda da estabilidade estrutural devido ao desconfinamento na região do canal de fluxo e pressões assimétricas ao longo da circunferência. A deformação causada pela assimetria pode ser inicialmente visualizada na

superfície do produto , e gradativamente evolui de forma crítica, oferecendo risco eminente de colapso, como observado nas Figuras 7 e 8.

Figura 7 - Deformação na parede do silo metálico em estágio inicial devido ao descarregamento excêntrico.



Fonte: Jenike & Johanson (2014).

Figura 8 - Colapso de silo devido a falha estrutural.

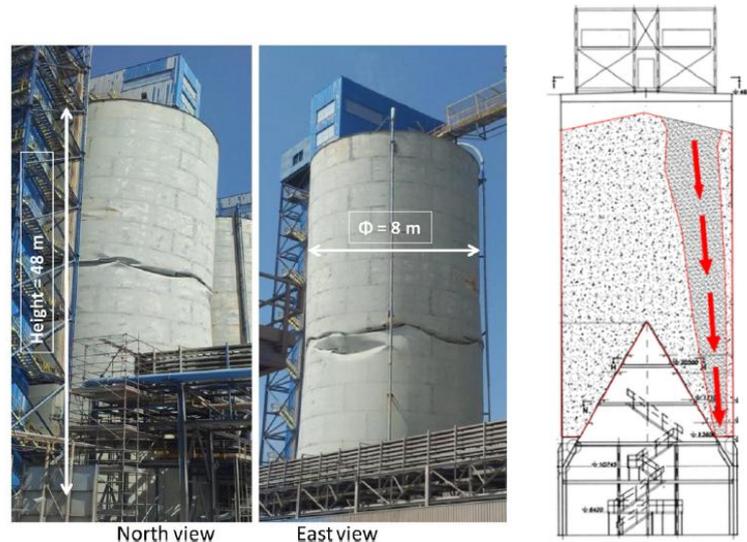


Fonte: Cheung (2015).

Segundo Sagarnaga (2022), embora o descarregamento excêntrico possa ocorrer com o fluxo em massa, ele é mais comum no padrão de fluxo em funil. A formação do canal de fluxo,

em qualquer um dos casos, não é concêntrica com a seção cilíndrica do silo. No pior cenário, o canal de fluxo se encontra com a parede do cilindro e corre paralelamente a ela até alcançar a superfície livre. Zaccari e Cudemo (2016) apresenta um estudo de caso de um silo que apresentou instabilidade devido ao descarregamento excêntrico, Figura 9.

Figura 9 - Ruptura por instabilidade devido ao descarregamento excêntrico.



Fonte: Zaccari e Cudemo (2016).

O fenômeno do descarregamento excêntrico geralmente ocorre quando o descarregamento do produto não é centralizado ou uniforme, resultando em pressões assimétricas e atrito entre o produto e a parede do silo. Consequentemente, tensões assimétricas são geradas a partir da formação de um momento fletor, que induz tanto as tensões de tração quanto as de compressão nas paredes do silo. Além disso, em silos, essa distribuição de pressões depende da esbeltez, do diâmetro e da excentricidade da descarga do silo.

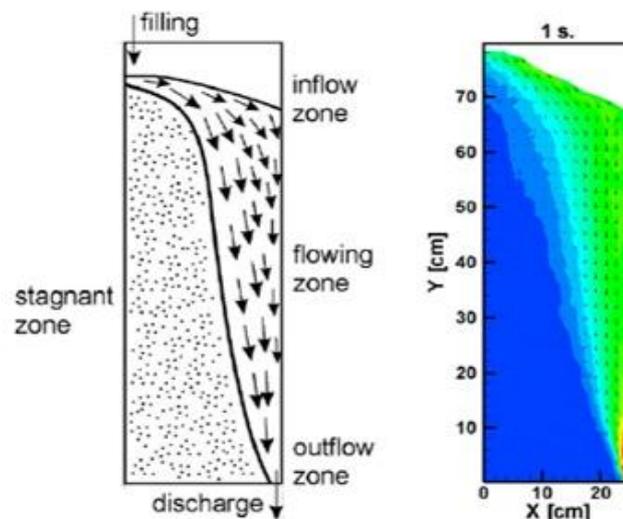
Em relação ao canal de fluxo, isso indica que a geometria do canal de fluxo não pode ser diretamente inferida a partir dos resultados da descarga e da geometria do silo. Devido ao seu padrão especial de fluxo geral, um silo esbelto possui um canal de fluxo variável. Nos silos baixos, o comportamento do canal de fluxo difere das análises de Rotter (1996), tornando inadequado o padrão para prever a pressão nas paredes de silos baixos. Portanto, percebe-se que os silos baixos se diferem dos demais, necessitando um aprofundamento no estudo do comportamento do descarregamento, afirmando-se que o fenômeno de descarga excêntrica é o causador de boa parte dos colapsos estruturais em silos baixos ao longo de décadas. A descarga

excêntrica é amplamente considerada uma das condições de projeto mais críticas para silos metálicos cilíndricos, uma reputação bem sustentada por inúmeros casos de colapso catastrófico atribuídos diretamente a essa condição (Sadowski, 2012).

3.2 O tipo de fluxo

O fluxo é um dos principais fatores que auxiliam na formação do fenômeno do descarregamento excêntrico. Para Saleh (2018), durante o esvaziamento do produto, é possível observar que o fluxo está diretamente interligado com a geometria do canal (saída). Silos com fundo plano oferecem um fluxo em forma de funil e a formação de zonas estacionárias, enquanto silos com tremonha mais íngreme oferecem um fluxo de massa sem regiões com zonas estacionárias. A Figura 10 apresenta uma análise abrangente da dinâmica do fluxo dentro do silo através de duas figuras. A figura à esquerda categoriza qualitativamente o sistema em zonas estagnadas, de entrada, em fluxo e de saída, com vetores indicando a direção do fluxo. A figura à direita fornece um instantâneo quantitativo em 1 segundo, utilizando um gradiente de cores e vetores para ilustrar variações na intensidade e na direção do fluxo, com os eixos rotulados em centímetros. Combinados, esses diagramas oferecem uma compreensão detalhada do comportamento do produto, destacando áreas de movimento e estagnação.

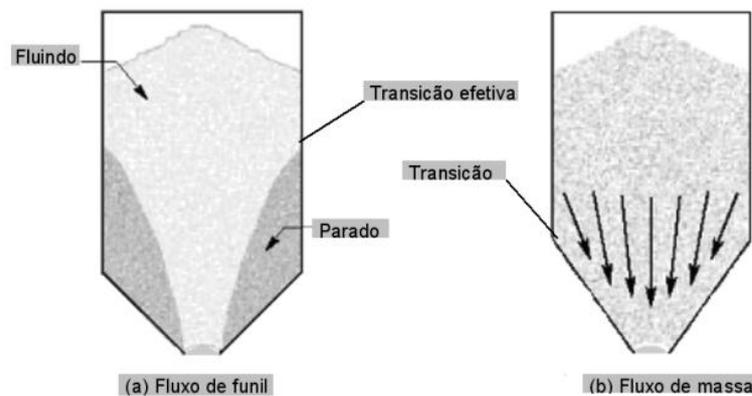
Figura 10 - O fluxo excêntrico de sementes de linho que se preenche da esquerda e se descarrega pela direita, com o modelo de modo de fluxo e o modelo de contornos de velocidade, respectivamente.



Fonte: Sielamowicz (2010).

O fluxo de funil mostrado na Figura 11, ocorre quando parte do produto fica estacionado nas paredes do silo, o que pode ser ocasionado em boa parte pela inclinação das paredes, como exemplificado no esquema da Figura 10, que pode influenciar diretamente no descarregamento. Observa-se que quanto menor a inclinação nas paredes próximo as saídas, maior a probabilidade do estacionamento do produto, e do contrário, quanto maior a inclinação, maior a probabilidade de um fluxo livre, ou em massa. As propriedades físicas do produto, além da geometria e da rugosidade da superfície da tremonha, são os principais fatores que determinam qual tipo de fluxo ocorrerá (Palma, 2005).

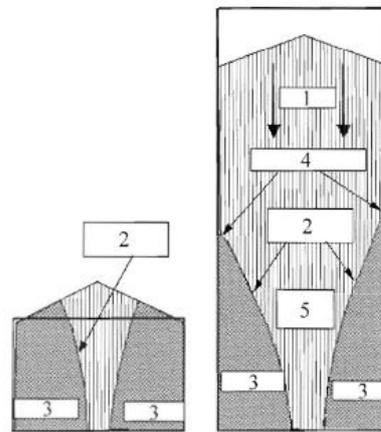
Figura 11 - Fluxos de funil e em massa respectivamente



Fonte: Palma (2005).

A norma europeia EN 1991-4: 2024 apresenta o fluxo misto para dois silos diferentes esbeltez. É possível observar dois tipos de silo, um silo baixo (esquerda) e um silo esbelto (direita), Figura 12. No silo baixo, observa-se que existem duas zonas indicadas, a zona 3 representa a zona estacionária, onde o produto está estacionado, a zona 2 representa o canal de fluxo, que flui de forma hiperbólica. No silo esbelto, observa-se que existem mais cinco zonas, onde a zona 1 representa o canal de fluxo de massa, a zona 4 representa a transição efetiva, a zona 3 representa parte do produto estacionado, a zona 2 representa o limite do canal de fluxo e a zona 5 representa a tremonha efetiva dentro do produto. O fluxo é influenciado tanto pela geometria do silo quanto das propriedades físicas do produto.

Figura 12 - Silo baixo a esquerda e silo esbelto à direita.



Fonte: EN 1991-4: 2024.

Segundo Jenike (1968), o fluxo altera o padrão das pressões nas paredes e é determinante para o projeto estrutural dos elementos estruturais. De acordo com Freitas (2001), em silos com descarga excêntrica, as pressões variam e o atrito entre o produto armazenado e as paredes apresentam configurações distintas. Isso desencadeia tensões irregulares, originando em momentos fletores que induz forças de tração e compressão na estrutura, aumentando, conseqüentemente, o potencial de falhas nas paredes do silo.

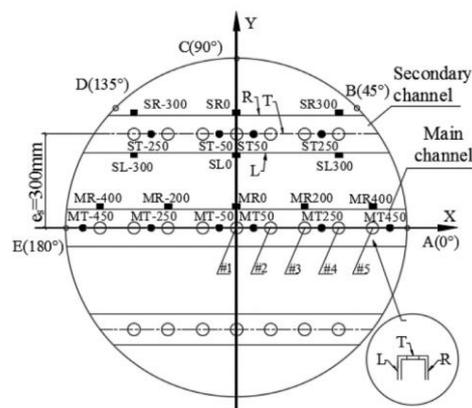
Sun (2020) conduziu um estudo com o objetivo de investigar a distribuição de pressão e a evolução da sobrepressão nas paredes e no canal durante o enchimento e a descarga de silos baixos com canais de transporte elevados. A necessidade deste estudo surgiu devido aos riscos associados às operações de descarga de silos, que podem resultar em respostas dinâmicas perigosas. A metodologia da pesquisa incluía analisar as pressões laterais nas paredes do silo durante o carregamento (enchimento), investigar a sobrepressão nos canais de transporte durante a descarga excêntrica, entender o impacto da excentricidade de descarga na distribuição de pressão e sobrepressão, e comparar os resultados com teorias existentes sobre silos esbeltos.

Os autores conduziram testes experimentais tanto em escala reduzida quanto em escala real, utilizando cilindros de *plexiglass* transparentes para observar o fluxo de areia durante os testes. Medidores de pressão calibrados foram colocados em diferentes pontos das paredes e dos canais para registrar as pressões durante os processos de enchimento e descarga. O estudo focou na distribuição de pressão e sobrepressão durante o enchimento e descarga de silos baixos, considerando a inovação dos canais de transporte acima do solo e seu impacto nas pressões internas. Os experimentos incluíram observação direta do fluxo de produto e a

utilização de medidores de pressão para registrar as variações de pressão em diferentes pontos do silo e dos canais.

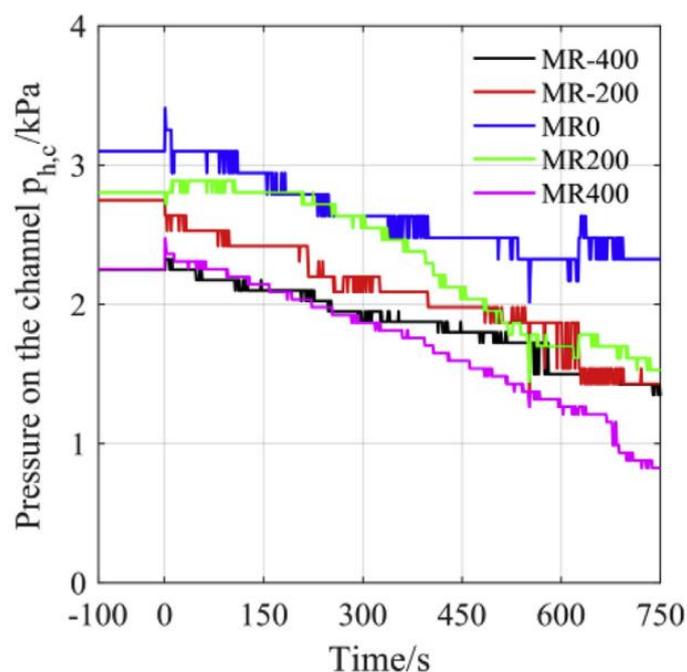
Durante o descarregamento de produto em um silo, o estudo mostrou que as pressões podem cair rapidamente nas áreas próximas a região de saída do produto. De acordo com Sun (2020), percebe-se uma queda abrupta nos valores de pressão dos manômetros MT250 e MT450 Figura 13 e 14, instalados na parte superior do canal principal (MT) adjacente a abertura de descarga #4, no início da descarga. Por outro lado, os demais manômetros posicionados na parte superior, distantes do orifício de descarga #4, registram uma leve sobrepressão. Nas paredes laterais do canal principal (MR), na parte superior do canal secundário (ST) e na parede lateral direita do canal secundário (SR), a pressão diminui gradativamente. No entanto, na parede lateral esquerda do canal secundário (SL), próxima ao orifício de descarga #4, observa-se uma sobrepressão considerável, portanto, em comparação com a pressão na parede, a sobrepressão no canal é mais evidente e prolongada.

Figura 13 - Disposição dos manômetros em silo de escala reduzida.



Fonte: Sun (2020).

Figura 14 – Parede lateral da saída do canal principal (MR).



Fonte: Sun (2020).

Observa-se que a taxa de decréscimo da pressão na parede do silo está inversamente relacionada à sua distância em relação a saída de descarga. Zonas com pressão final superior a zero, denominadas zonas estagnadas, são formadas no silo ao término da descarga excêntrica. A sobrepressão na parede, quando presente, é de curta duração e não se manifesta durante todo o processo de descarga excêntrica (Sun, 2020).

O estudo de Sun concluiu que durante o descarregamento excêntrico em silos baixos com canais de transporte acima do solo, a pressão nas paredes próximas ao ponto de descarga diminui rapidamente, enquanto nas áreas mais distantes essa diminuição é mais lenta, resultando na formação de zonas estagnadas onde a pressão não chega a zero. A sobrepressão é mais significativa nos canais de transporte do que nas paredes do silo, com duração mais longa e coeficientes de sobrepressão variando conforme a proximidade ao ponto de descarga.

Além disso, o estudo destaca que as pressões nos canais superiores oscilam mais durante o descarregamento excêntrico comparado à pressão lateral nas paredes do silo. Esses achados ressaltam a complexidade do comportamento dos silos durante o descarregamento excêntrico e a importância de considerar esses fatores no projeto e operação de silos com canais de transporte acima do solo. A variação das pressões internas e a sobrepressão nos canais indicam que o

descarregamento excêntrico tem impactos significativos, exigindo um entendimento aprofundado para garantir a segurança e a eficiência operacional dos silos.

3.3 As normas que abrangem o tema

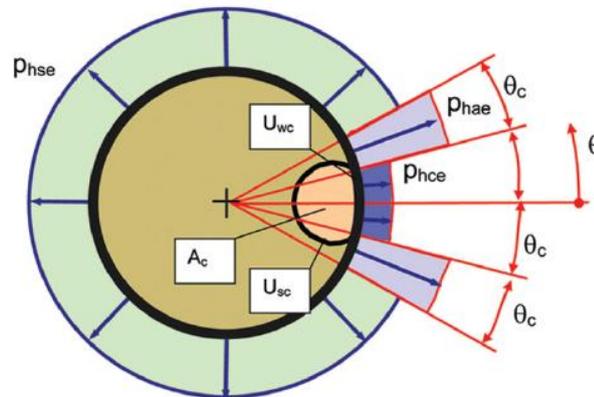
A formalização dos estudos que envolvem os silos trouxe em consequência na formulação de normas específicas, que seguiriam o senso comum entre a comunidade de pesquisadores, com o propósito de garantir a segurança, a funcionalidade e a durabilidade das estruturas. No Brasil, existem poucas normas voltadas para silos, e apenas a NBR 17066 (2022) refere-se brevemente sobre o conceito de descarregamento excêntrico, onde é destacado que o fenômeno deve ser considerado em projeto, pois sugere que pode aumentar significativamente as pressões nas paredes do silo e levar a instabilidade, entretanto, carece de um aprofundamento à cerca do tema. Das normas estrangeiras, destacam-se por referenciar estudos à cerca do descarregamento excêntrico:

- British Standard BS EN 1991-4: 2024 – “Eurocode 1 - Ações em estruturas – Parte 4: Silos e Tanques”;
- International Organization for Standardization ISO 11697:2012- “Bases para o projeto de estruturas - Cargas devido a materiais a granel”;
- American Society of Civil Engineers ASCE 7-22 2022 – “Cargas mínimas de projeto para edifícios e outras estruturas”;
- American Concrete Institute ACI 313-16 2016 – “Especificação de Projeto para Silos de Concreto e Tubos de Empilhamento para Armazenamento de Materiais Granulares e Comentários”;

O Eurocode 1 (2006), norma criada pela União Europeia, é uma parte dos demais Eurocodes criados de um conjunto de normas europeias que visa a construção civil, e não obstante, o Eurocode 1 cita que os principais pontos de melhoria para silos e tanques que devem ser consideradas no momento do dimensionamento são:

- Distribuição de pressão não uniforme (Figura 15);
- Influência da geometria do canal de fluxo;
- Consideração acerca do raio do canal do fluxo;
- Verificação do tipo de fluxo.

Figura 15 - Distribuição de pressão



Fonte: Adaptado da norma europeia EN1991-4 (2006).

A Figura 15 demonstra que p_{hse} e p_{hce} indicam diferentes pressões horizontais nas paredes do silo. Os símbolos U_{wc} e U_{sc} representam os perímetros do canal de fluxo na parte interna e em contato com a parede do silo. A_c é a área da seção transversal central do silo. p_{hae} e p_{hce} são pressões horizontais de descarregamento (fluxo) que atuam no limite entre o canal de fluxo e o produto estagnado e na região de contato do fluxo com a parede do silo, respectivamente. Enquanto θ_c , θ_{sc} e θ_e são diferentes ângulos que indicam a mudança do estado de pressão e carga no silo.

A ISO 11697 (2012), aborda a importância à cerca da deformabilidade, ângulo de repouso e o coeficiente de atrito dos grãos, dos quais influenciam no fluxo do produto. Ademais, define pré-requisitos sobre a geometria do silo, relacionado à altura/diâmetro, inclinação do fundo e configuração de saídas.

A norma americana ASCE 7-22 (2022), trata sobre as cargas dinâmicas que podem ser causadas por equipamentos terceiros ou pela operação do produto interno no silo de forma não uniforme. A norma também descreve a importância de levar em consideração as várias combinações de carga, como peso próprio, vento e demais cargas do produto. Vale destacar que a norma permite o uso de diferentes métodos de análise estrutural, como por exemplo a análise por elementos finitos. Por fim, esta norma avalia o projeto baseado em desempenho, o que ajuda a garantir que o silo suporte as cargas sem comprometer a sua capacidade.

A outra norma americana ACI 313-16 (2016), foca em diretrizes relacionadas às pressões não uniformes nas paredes do silo e recomenda o ideal para silos baixos, a geometria do silo deve ser planejada conforme o tipo de produto, se este será de alta ou baixa coesão. Para

produto com boa fluidez a altura/diâmetro deve ser entre 1 e 2, enquanto para produtos de coesão moderada de 2 a 3, e alta coesão entre 2 e 4.

3.4 A teoria de Coulomb aplicada em taludes de silos

No campo da engenharia geotécnica, a teoria de Coulomb é amplamente utilizada para estimar empuxo ativo exercidos por um volume de solo sobre uma estrutura de contenção, como por exemplo os muros de arrimo. De acordo com Freitas (2001, *apud* Wijk, 1993), a teoria de Coulomb, publicada em 1776, levou em conta a presença de atrito entre o solo e a face do muro de contenção e, assim como nas abordagens de Rankine e Janssen, assumiu que a parte maciça se encontra em condição de empuxo ativo. Não obstante, os taludes nos silos também são influenciados pela condição de empuxo ativo, no entanto, podem apresentar um contraste com relação aos cenários mecânicos de determinados produtos agrícolas e suas diferentes propriedades físicas. O entendimento do comportamento de cargas em silos exige considerar as propriedades específicas de cada produto granular, aliando conceitos da mecânica dos solos a evidências experimentais.

Segundo Gandia *et al* (2023), o armazenamento de produtos granulares em silos apresenta um comportamento mecânico complexo, especialmente no caso do milho e de rações animais, que tendem a gerar assimetrias de empuxo mais acentuadas em comparação a outros produtos. Gandia afirma que essa particularidade já é reconhecida na norma Eurocode 1 - Parte 4, e que incorpora o *solid recharge factor* (Cop), e tais efeitos são obtidos em ensaios de escoamento e na experiência acumulada com esse tipo de armazenamento. O empuxo ativo corresponde à componente resultante da pressão exercida pelo solo quando este atinge o estado de ruptura, sendo, portanto, diretamente relacionado à pressão horizontal no maciço.

Conforme citado por Freitas (2001), Wijk (1993) aponta que, quando a pressão horizontal exercida pelo solo excede a capacidade de suporte da parede de contenção, ocorre um deslocamento da estrutura. Esse movimento induz uma deformação lateral no maciço, reduzindo a pressão até atingir seu valor mínimo, correspondente ao estado de empuxo ativo. Portanto, a teoria de Coulomb permite determinar o valor máximo do empuxo ativo de acordo com diferentes inclinações da superfície de ruptura, identificando o ângulo que gera a condição mais crítica.

Segundo Taylor (1948), a teoria de Coulomb foi fundamentada pelo empuxo ativo em uma cunha de solo delimitada pela face da estrutura de contenção e por um plano de ruptura

outros ângulos definidos geometricamente conforme o esquema apresentado na Figura 16 (Taylor, 1948).

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\frac{\frac{1}{\sin \beta} (\beta - \phi_e)}{\sqrt{\sin(\beta + \phi_w)} + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \phi_w) \sin(\phi - i)}{\sin(\beta - i)}}} \right]^2$$

Sendo:

E_a – Empuxo ativo: força horizontal exercida pelo produto armazenado (solo ou produto granular) sobre a superfície de contenção.

ϕ_e – Ângulo de atrito interno: parâmetro que expressa a resistência ao cisalhamento do produto, considerando apenas a parcela efetiva (sem a influência da coesão).

ϕ_w – Peso específico do produto: relação entre a massa e o volume, representando o peso por unidade de volume.

H – Altura da superfície de carregamento: distância vertical entre a base e o topo do produto em contato com a estrutura.

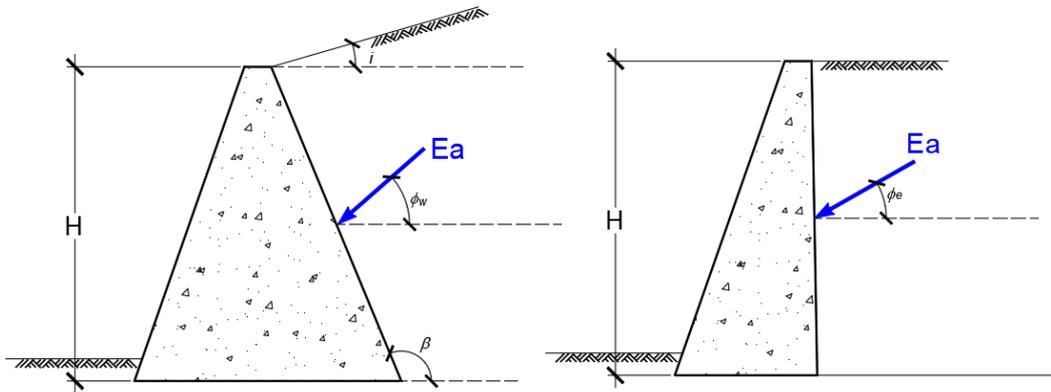
β – Ângulo de inclinação da superfície do talude ou do produto armazenado, medido em relação à horizontal.

i – Ângulo de inclinação do terreno adjacente ou da superfície livre do produto, em relação à horizontal.

De acordo com Taylor (1948), existem duas situações em que um muro pode se encontrar: quando a parede está inclinada ou quando a parede está na vertical e retém um aterro com superfície nivelada. Portanto, é possível utilizar gráficos específicos como na Figura 17 para estimar o empuxo ativo. Considerando valores do ângulo de atrito interno ϕ_e entre 20° e 40° por exemplo, e ângulo de obliquidade ϕ' variando entre 0 e ϕ , o gráfico fornece o coeficiente de valor K , a partir do qual a pressão máxima na base do muro pode ser calculada pela equação 2:

$$p_{max} = \gamma H K$$

Figura 17 – Coulomb pode ser aplicado em ambos os cenários: parede inclinada ou nivelada na vertical.



Fonte: Adaptado de Taylor (1948).

O valor do empuxo pode ser determinado tanto para a condição de empuxo ativo com efeito de arco quanto para a condição totalmente ativa, conforme equação 3:

$$p_{max} = \frac{1}{2} \gamma H^2 K \quad 3$$

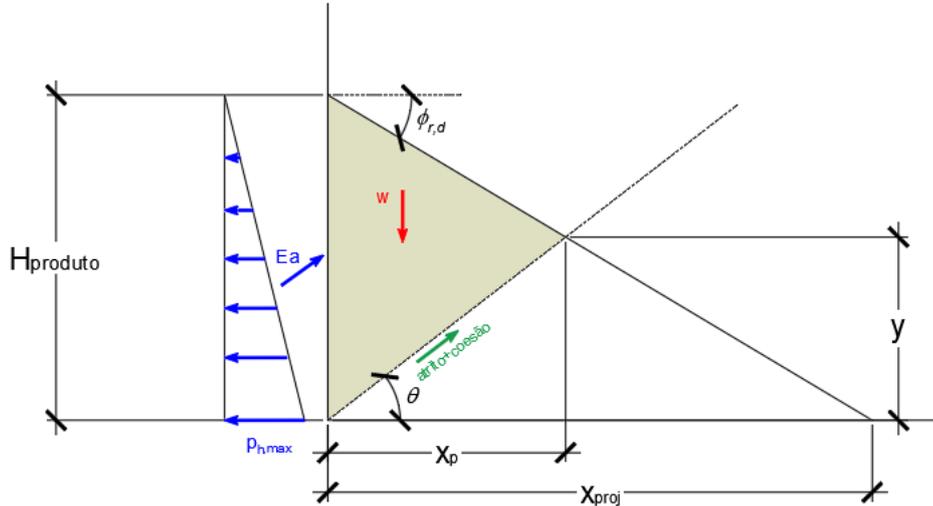
3.5 O cálculo do empuxo ativo E_a para pilha inclinada e talude duplo

Pode ser estendida a aplicação da teoria de Coulomb para os casos aplicados nas etapas de descarregamento do silo. Estas expressões serão fundamentais para a obtenção do empuxo ativo E_a e o valor da pressão máxima p_h exercida sob um ângulo θ seja em uma pilha inclinada simples (Figura 18) ou pilha inclinada com duplo talude (Figura 19). Recomenda-se adotar ângulos passíveis de obtenção em laboratório, como o ângulo de repouso $\phi_{r,s}$ ou o ângulo de repouso de descarregamento $\phi_{r,d}$ (ou ângulo do canal de fluxo), em vez de valores arbitrários não mensuráveis em projeto.

Assim, para o início do cálculo, adotam-se os parâmetros geométricos definidos em laboratório, como altura da parede H , efetivo ângulo de atrito interno ϕ_e , coesão c , peso específico γ e ângulo de atrito solo-parede ϕ_w sejam conhecidos a partir de testes padronizados.

3.5.1 Cálculo do modelo da pilha inclinada simples

Figura 18 – Representação gráfica da pilha inclinada simples.



Fonte: O autor.

Considera-se a parede de altura H e o plano de ruptura inclinado um ângulo θ em relação à horizontal. Adota-se o ângulo de repouso de descarregamento $\phi_{r,d}$. Seja $y(\theta)$ a altura projetada da cunha medida na vertical até o ponto de interseção do plano de ruptura com a base da parede, x_{proj} representa a projeção do talude em descarga e x_p representa a distância da parede ao pico do talude.

A área pela face vertical da parede e a horizontal da base do silo é equação 4:

$$A_T = \frac{1}{2} x_{proj} H \quad 4$$

Onde x_{proj} é a projeção horizontal da parede sobre a base, dada por equação 5:

$$x_{proj} = \frac{H}{\tan(\phi_{r,d})} \quad 5$$

Logo, equação 6:

$$A_2(\theta) = \frac{1}{2} x_{proj} y(\theta) = \frac{H}{2 \tan(\phi_{r,d})} y(\theta) \quad 6$$

Subtraindo-se A_2 de A_T obtém-se a área da cunha que efetivamente tende a deslizar, equação 7:

$$A_c(\theta) = A_T - A_2(\theta) = \frac{H^2}{2 \tan(\phi_{r,d})} - \frac{H}{2 \tan(\phi_{r,d})} y(\theta) = \frac{H[H - y(\theta)]}{2 \tan(\phi_{r,d})} \quad 7$$

A altura $y(\theta)$ pelo plano de ruptura, equação 8:

$$\tan(\theta) = \frac{y(\theta)}{l(\theta)} = \frac{y(\theta)}{\tan(\theta)} \quad 8$$

Mas pela condição geométrica geral, tem-se equação 9:

$$y(\theta) + \frac{y(\theta)}{\tan(\theta)} \tan(\phi_{r,d}) = H \quad 9$$

Portanto, equação 10:

$$y(\theta) = \frac{H}{1 + \frac{\tan(\phi_{r,d})}{\tan(\theta)}} \quad 10$$

Peso da cunha $W(\theta)$, equação 11:

$$W(\theta) = A_c(\theta)\gamma = \frac{H[H - y(\theta)]}{2\tan(\phi_{r,d})}\gamma \quad 11$$

Por fim, aplicando-se o empuxo ativo $E_a(\theta)$, equação 12:

$$E_a(\theta) = \frac{W(\theta) \operatorname{sen}(\theta - \phi_e) - c \cdot l(\theta) \operatorname{sen}(90^\circ + \phi_e)}{\operatorname{sen}(90^\circ + \phi_w - \theta + \phi_e)} \quad 12$$

$\phi_{r,d}$ é o ângulo de descarregamento do produto (canal de fluxo);

ϕ_e é o efetivo ângulo de atrito interno do solo;

c é a coesão aparente;

ϕ_w é o ângulo de atrito na interface solo-parede;

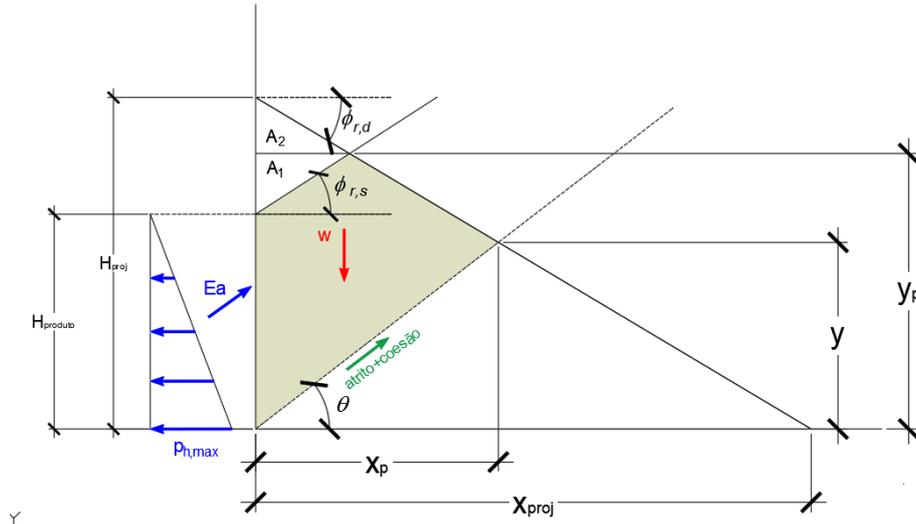
l é o comprimento do plano de ruptura.

Para encontrar o ângulo de ruptura θ_{rup} , utilizou-se a equação 13:

$$\theta_{rup} = \operatorname{Max}[E_a(\theta)] \quad 13$$

3.5.2 Cálculo da pilha inclinada com talude duplo

Figura 19 – Representação gráfica da pilha inclinada com talude duplo.



Fonte: O autor.

Considera-se a parede de altura H_{proj} e o plano de ruptura inclinado um ângulo θ em relação à horizontal. Adota-se o ângulo de repouso $\phi_{r,s}$ (repouso superficial) e $\phi_{r,d}$ (descarregamento), x_{proj} representa a projeção do talude em descarga e x_p representa a distância da parede ao pico do talude.

Seja $y_1(x)$ a altura da cunha medida na vertical até o ponto de interseção do plano de ruptura com a base da parede, equação 14:

$$y_1(x) = \tan(\phi_{r,s}) x_s + H_{produto} \quad 14$$

Seja $y_2(x)$ a altura projetada da cunha medida na vertical até o ponto de interseção do plano de ruptura com a altura projetada da parede, equação 15:

$$y_2(x) = -\tan(\phi_{r,d}) x_p + H_{proj} \quad 15$$

Logo obtém-se o comprimento do pico do talude x_p , equação 16:

$$y_1(x) = y_2(x)$$

$$\tan(\phi_{r,s}) x + H_{produto} = -\tan(\phi_{r,d}) x + H_{proj} \quad 16$$

$$x_p = \frac{H_{proj} - H}{\tan(\phi_{r,s}) + \tan(\phi_{r,d})}$$

Altura projetada H_{proj} , equação 17:

$$H_{proj} = \tan(\phi_{r,d}) x_{proj} \quad 17$$

Altura do pico y_p , equação 18:

$$y_p = -\tan(\phi_{r,d}) x_p + H_{proj} \quad 18$$

A área A_2 que corta o topo da altura projetada pela face vertical da parede e a horizontal da base do silo é, equação 19:

$$A_2 = \frac{(H_{proj} - y_p)x_p}{2} \quad 19$$

A área A_1 que corta a base da altura projetada pela face vertical da parede e a horizontal da base do silo é equação 20:

$$A_1 = \frac{(y_p - H_{proj})x_p}{2} \quad 20$$

Diferente do primeiro caso, obtém-se a área total A_T em que a cunha tende a deslizar efetivamente com o talude duplo, subtraindo-se A_c de A_1 e A_2 , equação 21:

$$A_c(\theta) = A_c(\theta) - A_1 - A_2 \quad 21$$

Por conseguinte, obtém-se o valor da cunha, equação 22:

$$W(\theta) = A_T(\theta)\gamma \quad 22$$

Por fim, aplicando-se o empuxo ativo $E_a(\theta)$, tem-se equação 23:

$$E_a(\theta) = \frac{W(\theta) \operatorname{sen}(\theta - \phi_e) - c \cdot l(\theta) \operatorname{sen}(90^\circ + \phi_e)}{\operatorname{sen}(90^\circ + \phi_w - \theta + \phi_e)} \quad 23$$

Para encontrar o ângulo de ruptura, aplica-se θ_{rup} , equação 24:

$$\theta_{rup} = \operatorname{Max}[E_a(\theta)] \quad 24$$

3.6 Comparações entre estudos de outros autores

Em comparação com a literatura que abrange o tema, foram observados os resultados obtidos entre cada autor. Destacam-se alguns autores que desenvolveram estudos similares:

1. Rotter (1989):

O autor identificou que o descarregamento excêntrico pode causar deformações significativas nas paredes do silo. Rotter indica que os silos possuem reservas de resistência

após a flambagem inicial, conferindo um destaque para silos com paredes mais espessas. O autor observou padrões de deformação e colapso catastróficos sob descarregamento excêntrico, o que é consistente com a necessidade de investigar mais profundamente esses efeitos em silos de baixa esbeltez.

2. Saleh (2018):

O autor discute a formação de canais de fluxo não concêntricos durante o descarregamento, o que resulta em pressões não uniformes ao redor da circunferência do silo, que causam flexão circunferencial e compressão axial na parede do cilindro do silo. O artigo ressalta que essa distribuição de pressões pode ser visualizada em perfis de pressão esquemáticos e menciona a existência de regiões localizadas de alta pressão nas bordas do canal de fluxo. Saleh conclui que o descarregamento excêntrico resulta em pressões assimétricas significativas que afetam a integridade estrutural dos silos.

3. Sun (2020):

Durante o descarregamento excêntrico, a distribuição de pressão nas paredes do silo foi observada como assimétrica, afetada pela geometria do silo e pela posição da saída, resultando em zonas de estagnação e variação da pressão ao longo das paredes. Manômetros instalados próximos às saídas do silo registraram uma queda abrupta de pressão no início dos descarregamentos, enquanto aqueles distantes das saídas registraram uma leve sobrepressão. Essas observações destacam a importância do tipo de produto e da geometria do silo na distribuição assimétrica das pressões nas paredes sob diferentes condições de descarregamento.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Considerações iniciais

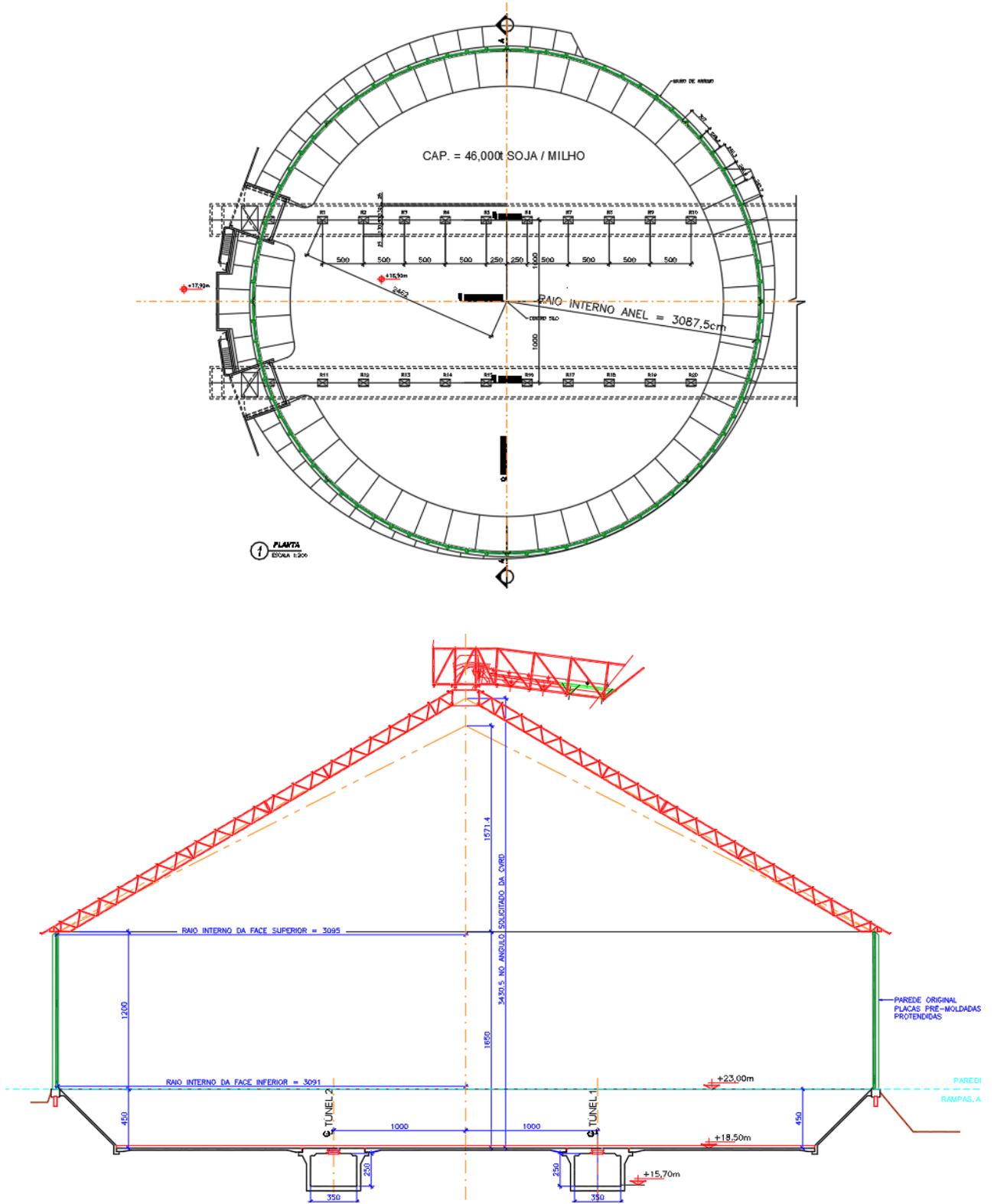
O estudo foi conduzido a partir da simulação com dois modelos em escala pouco reduzida (1:120 e 1:50), baseado em um silo real com paredes em concreto pré-moldado protendido que entrou em colapso em decorrência do fenômeno de descarregamento excêntrico (Figura 5(a) e 20). O procedimento experimental se resume a uma série de etapas delineadas no fluxograma da Figura 21, e para a obtenção de resultados, aplicou-se a seguinte metodologia:

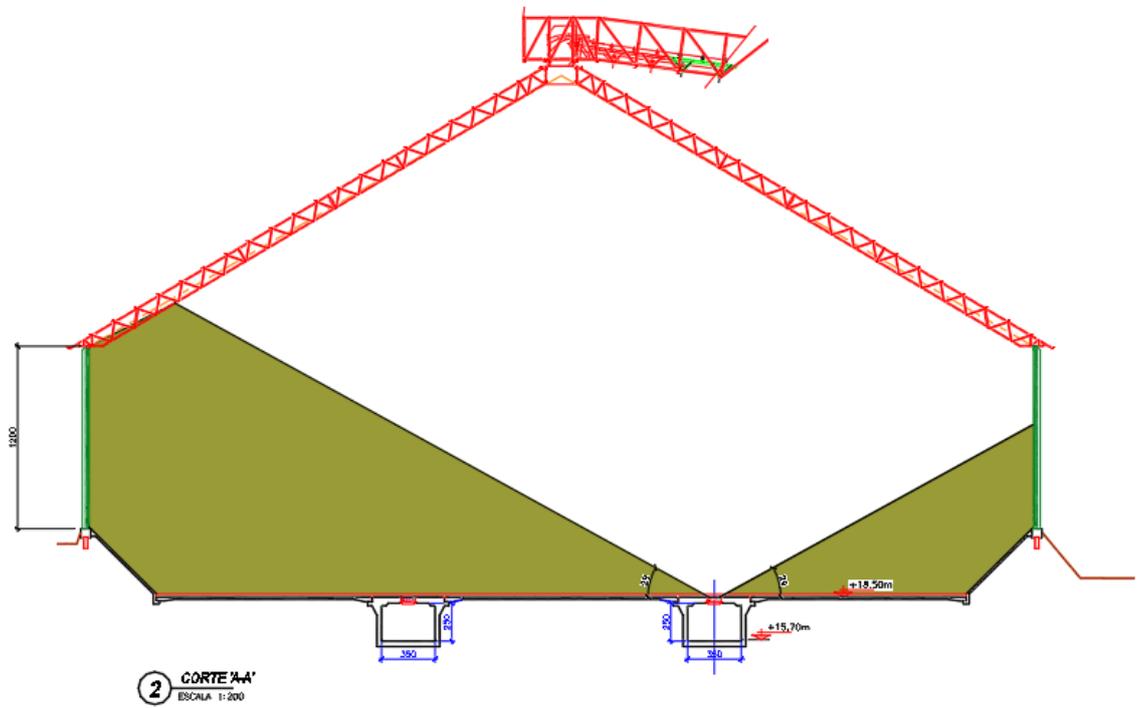
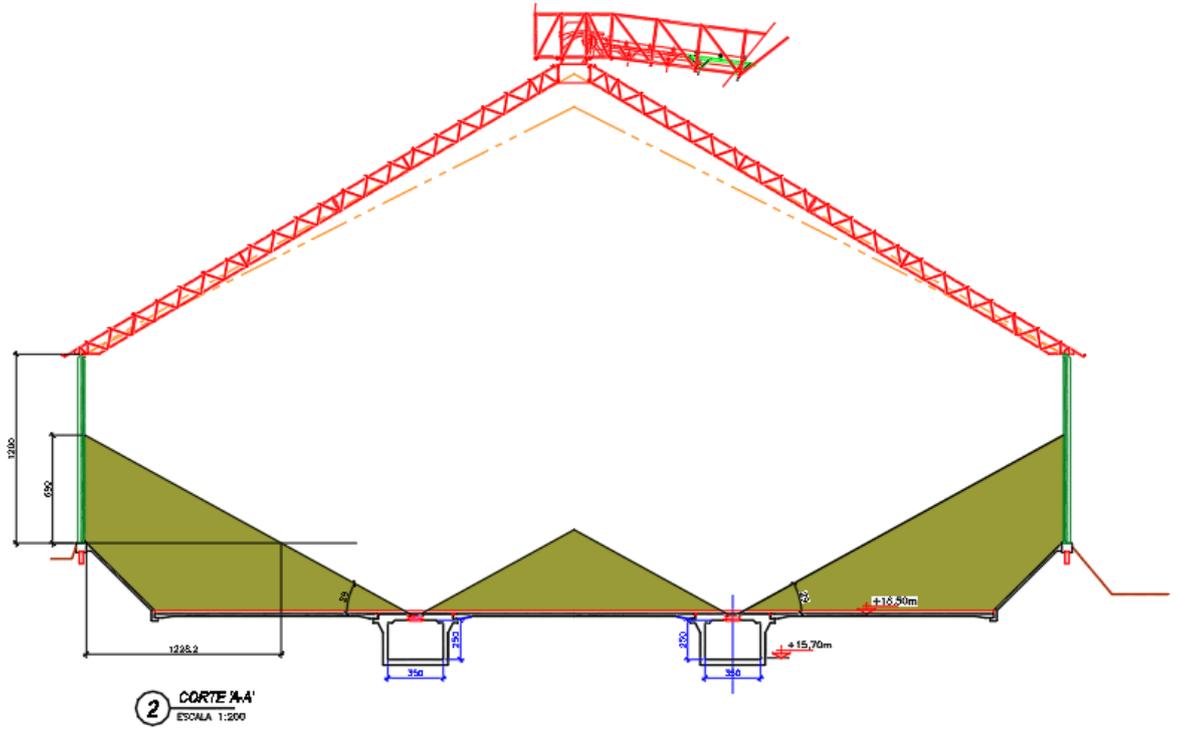
- Caracterização das propriedades do produto de estudo com ensaios de umidade, granulometria, ângulo do canal de fluxo, ângulo de atrito interno e da parede por meio da célula de cisalhamento Jenike;
- Construção e instrumentação de dois modelos de silo baixo, em escala pouco reduzida 1:120 (com chanfro) e 1:50 (sem chanfro), para simulação do descarregamento;
- Realização de ensaios de descarga em ambos os modelos, registrando deformações de parede e mapeando a formação de taludes internos;
- Avaliação da influência da geometria de saída (número e disposição das linhas de saída) na ovalização das paredes;
- Análise das pressões geradas durante o descarregamento do silo em suas diferentes fases pela teoria de Coulomb;

No que tange a instrumentação do modelo:

- O ensaio foi elaborado através de um processo de leitura das cotas das superfícies do produto para diferentes condições do descarregamento utilizando uma trena laser (Figura 31). Com a obtenção dos dados, foi possível montar dois modelos de gráfico, um representando as alturas de cada seção e outro representando as curvas de nível. Os descarregamentos foram executados nas seguintes porcentagens: 100% (carga total), 80%, 60%, 40% e 20%.
- Para representar a vista transversal da altura do produto, foi selecionado a seção central F do eixo vertical A-K (Figura 28) para cada série dos ensaios. Ao todo foram realizados três ensaios, contendo cinco séries cada, representados pelas porcentagens supracitadas.
- Com relação às variáveis aferidas neste estudo, necessárias para explicar o comportamento do produto no silo, tem-se:
 - Ângulos (de repouso e canal de fluxo), granulometria e umidade do produto, cisalhamento (interno e parede), perfis de altura do produto (medição com trena laser), a massa do produto (medição da massa inicial e retida com uso de balança), deslocamentos de parede (medição com os relógios comparadores), empuxo ativo (E_a), pressão horizontal (p_h) e coeficiente de empuxo ativo (K_a).

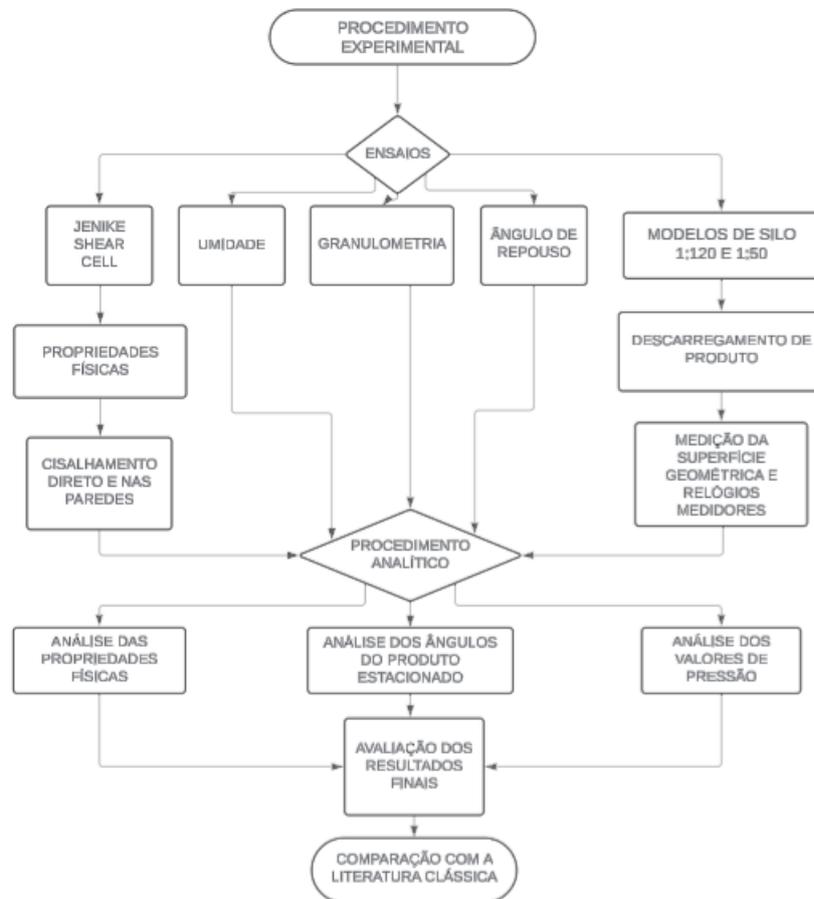
Figura 20 – Silo real utilizado como objeto de estudo.





Fonte: O autor.

Figura 21– Fluxograma de atividades realizadas



Fonte: O autor.

4.2 A origem do material de estudo

De acordo com Brown e Nielsen (1998), há uma classificação de cinco tipos de silos experimentais, e o silo utilizado neste estudo é classificado como modelo de escala pouco reduzida (Classe D):

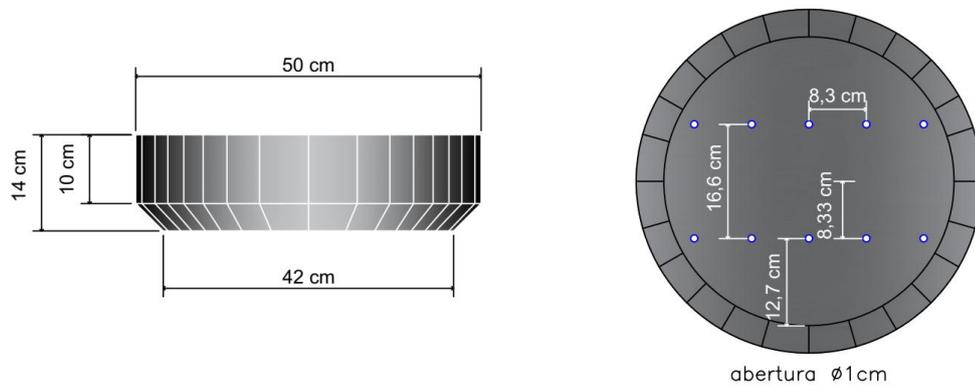
- *Classe A*: silos industriais;
- *Classe B*: estações experimentais em escala real;
- *Classe C*: modelos pilotos;
- *Classe D*: modelos em escala pouco reduzida;
- *Classe E*: modelos em escala muito reduzida (centrifugação).

4.2.1 Modelo de escala 1:120

O estudo do comportamento do produto em um silo baixo foi realizado utilizando dois silos. O primeiro, ilustrado na Figura 22, é um modelo em escala 1:120, construído com chapa de aço galvanizado de 0,43 mm de espessura, tanto no corpo cilíndrico quanto no tronco de cone com fundo plano. Esse modelo é caracterizado como um silo baixo, conforme a classificação adotada pela equação 25:

$$\frac{H}{D} = 0,38 < 0,4 \quad 25$$

Figura 22 - Modelo de silo baixo em escala pouco reduzida.



Fonte: O autor.

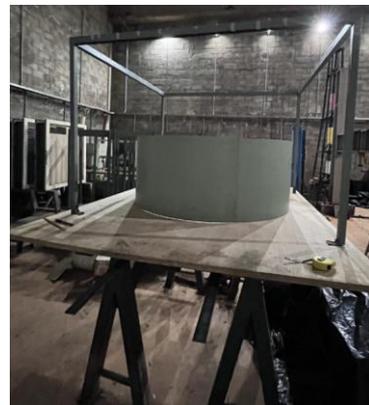
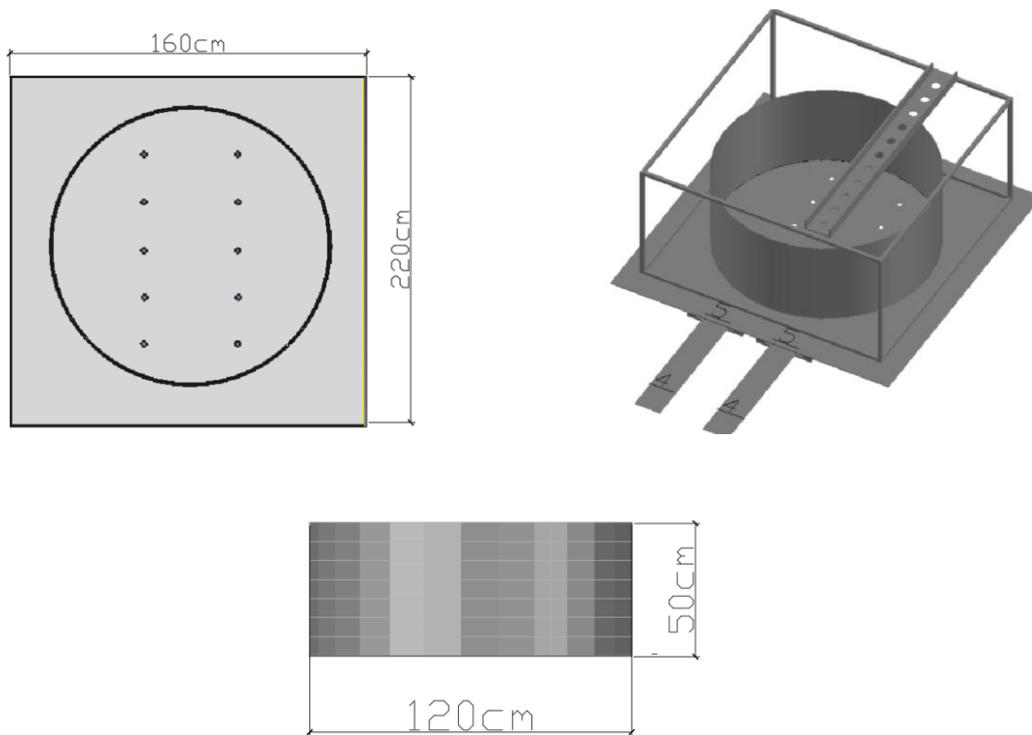
4.2.2 Modelo de escala 1:50

O segundo modelo foi fabricado em chapa de aço lisa, baseado no silo colapsado (Figura 5), em escala de 1:50 com 50 cm de altura e 120 cm de diâmetro (Figura 23).

Optou-se por um fundo plano, eliminando o chanfro, em razão de requisitos de desempenho técnico durante os ensaios. Este silo também é classificado como baixo, conforme a equação 26:

$$\frac{H}{D} = 0,60 > 0,4 \quad 26$$

Figura 23 – Segundo modelo de silo baixo em escala pouco reduzida.



Fonte: O autor.

4.3 Origem do produto

O produto utilizado para simular o fluxo no silo em escala reduzida foi a areia, devido às suas características físicas e facilidade experimental, proporcionando uma melhor definição geométrica nas descargas e canais de fluxo. Para caracterizar o produto, foram realizados alguns testes nas propriedades físicas, tais como, ângulo de repouso, granulometria, cisalhamento direto e cisalhamento com as paredes, bem como a instrumentação do modelo de silo em escala reduzida. A umidade foi determinada em estufa com temperatura constante de 103°C.

4.4 Ensaio do ângulo de repouso

O teste do ângulo de repouso (Figura 24), também conhecido como ângulo crítico, foi realizado utilizando um aparelho de madeira para obter o ângulo mais íngreme em relação ao plano horizontal que se forma sem deslizar, ou seja, quando o produto na inclinação está prestes a deslizar, e o teste é realizado em doze séries para obter a média aritmética.

Figura 24 - Aparato de verificação de ângulo de repouso.



Fonte: O autor.

4.5 Ensaio de granulometria

Quanto à granulometria, o teste foi realizado com um conjunto de peneiras padronizadas, permitindo a produção de uma curva granulométrica do produto usando 1000 gramas de areia (Figura 25).

Figura 25 - Aparelho granulométrico Solotest.



Fonte: O autor.

4.6 Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto consiste na determinação da resistência interna de uma amostra de produto ao deslizar entre si, sob uma pressão determinada e a aplicação de tensão controlada. O ensaio tem como propósito determinar os parâmetros de coesão do produto, ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno. Com o aparelho de cisalhamento direto TSG 70 – 140 AVT (Figura 26), ou “*Jenike Shear Tester*”, foram realizadas três séries de ensaios, e os dados posteriormente foram utilizados em um programa de cálculo específico, implementado por Cheung (2007), para a obtenção do *Yield Locus* (lugar de deslizamento).

4.7 Ensaio de cisalhamento com as paredes

O ensaio de cisalhamento com as paredes, por sua vez, consiste em determinar a resistência causada pelo atrito entre o produto analisado e as paredes dos silos, que são compostas de materiais diversos, (chapas de aço com coeficiente de dilatação e rugosidade diferente, alumínio, acrílicos, madeiras, concretos e etc.) para avaliar em diferentes situações que o produto pode se encontrar. O ensaio permite analisar o comportamento de conjuntos variados, indicando os impactos pertinentes nos cálculos e execuções das estruturas. O ensaio foi realizado no aparelho *Jenike Shear tester*, repetindo os mesmos procedimentos do ensaio de cisalhamento direto.

Figura 26 - Aparelho de cisalhamento direto TSG 70–140 AVT.



Fonte: O autor.

4.8 Ensaio nos silos modelos

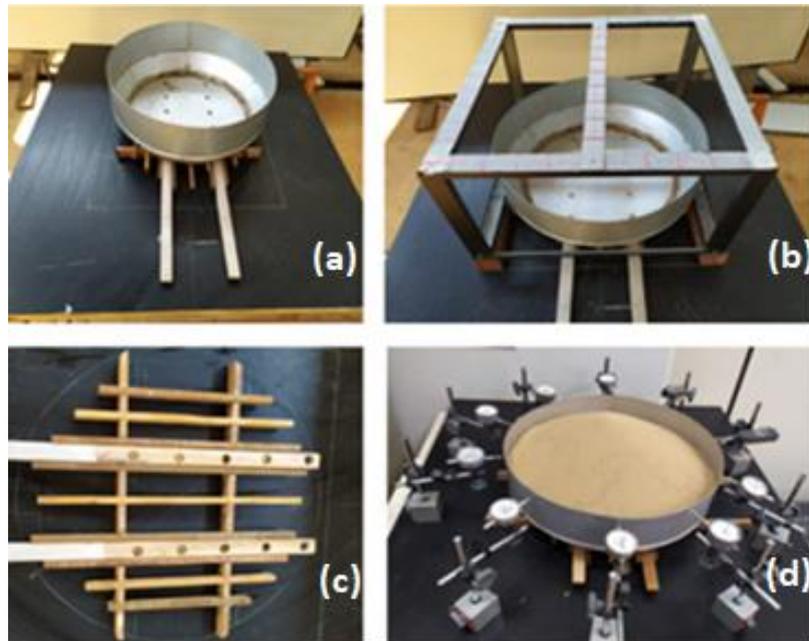
4.8.1 Modelo 1:120

Para os ensaios no silo modelo 1:120 (Figura 27 (a)), uma estrutura de madeira foi construída (Figura 27 (c)), forrada com uma chapa de aço de 2mm, permitindo a colocação e fixação de instrumentos com base magnética, e um suporte com uma régua graduada deslizante acima do topo do produto armazenado para verificar as dimensões das inclinações e canais de fluxo formados pelas descargas predefinidas durante o estudo.

O banco construído (Figura 27 (b)) para suportar o silo foi projetado para permitir que a régua graduada no topo da estrutura se movesse e, com a ajuda de um medidor de distância a laser, a altura do produto para cada descarga foi obtida nas coordenadas representadas na Figura 28. No plano horizontal, os pontos variam de "0 a 8", e no plano vertical de pontos "A a K". A altura real do produto (Y) é identificada pela diferença entre a altura do suporte e o comprimento do próprio laser pela altura obtida pelo instrumento (X), como mostrado na equação 27:

$$Y = H_{\text{suporte}} - X \quad 27$$

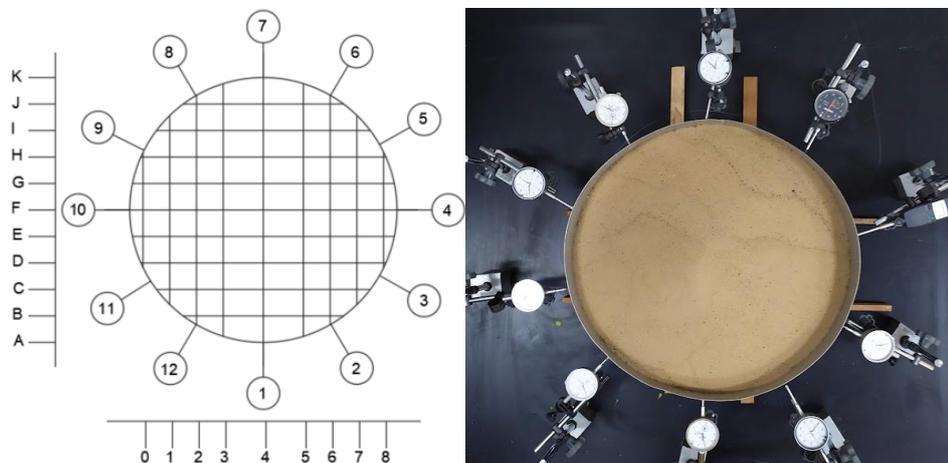
Figura 27 - (a) Elementos deslizantes para abertura das saídas. (b) Estrutura de régua graduada no topo. (c) Vista da base fixa. (d) Distribuição dos relógios comparadores.



Fonte: O autor.

Além da régua graduada, existem outros elementos deslizantes na base da bancada, que servem para abrir e fechar as saídas do silo de escala reduzida, possibilitando em diversos cenários possíveis. Ademais, foram instalados um total de 12 relógios comparadores, com resolução de 0,01mm, envolta da parede do silo, para obter os dados de deformação da parede com relação a pressão que o produto exerce sobre ela, mostrados na Figura 27 (d) e 26.

Figura 28 - Representação do posicionamento dos instrumentos de medição.



Fonte: O autor.

4.8.2 Modelo 1:50

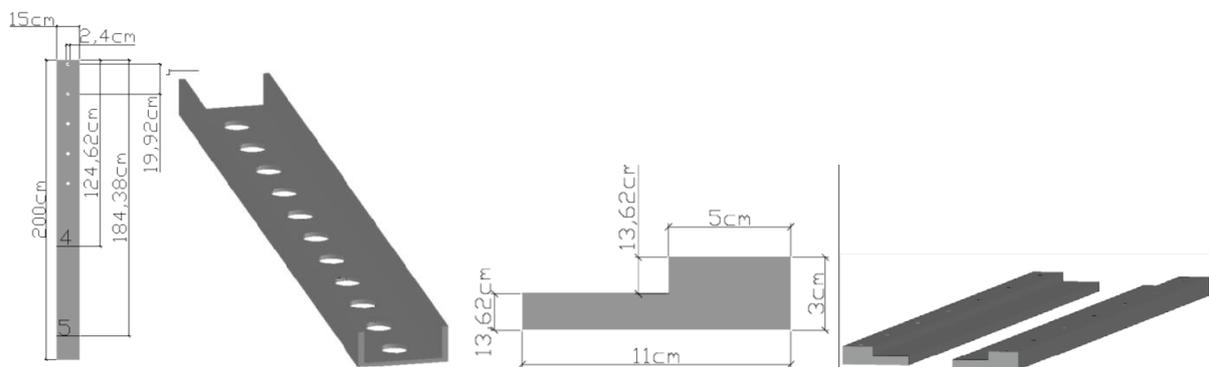
A confecção do segundo silo 1:50 e demais acessórios partiram de um projeto previamente elaborado. A fabricação dos acessórios bem como a execução dos ensaios só foi realizada na estrutura local disponíveis no laboratório LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil) e LEME (Laboratório de Estruturas e Modelos Experimentais) da UFMS (Figura 29).

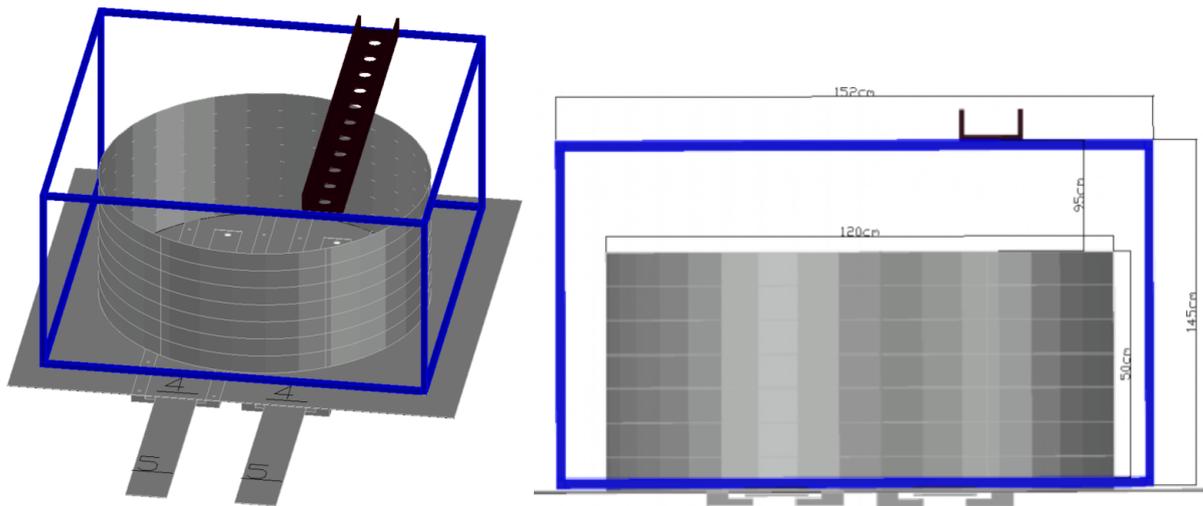
Para os ensaios no silo, foram confeccionados os seguintes itens: uma plataforma de compensado naval de 160×220 cm com 2,5mm de espessura, com cinco furos centrais de 2,4mm correspondentes ao diâmetro do silo, servindo de base estável para todo o conjunto (Figura 30(a)).

Sobre essa base, construiu-se uma armação tubular retangular de aço (30×40 mm, chapa 18) (Figura 30(b)), que suporta a régua graduada deslizante e o medidor de altura (trena a laser) (Figura 30(c)).

O suporte da trena laser foi confeccionado a partir de duas cantoneiras de aço ($3/16 \times 1.1/2$ ") reforçada com chapa soldadas, permitindo encaixe preciso e firme do instrumento. Elementos deslizantes fabricados em chapas no sistema de guilhotina ($1/8 \times 1.1/2$ ") instalados para controlar a abertura das saídas e limitar o fluxo de areia durante cada descarga (Figura 30 (d e e)).

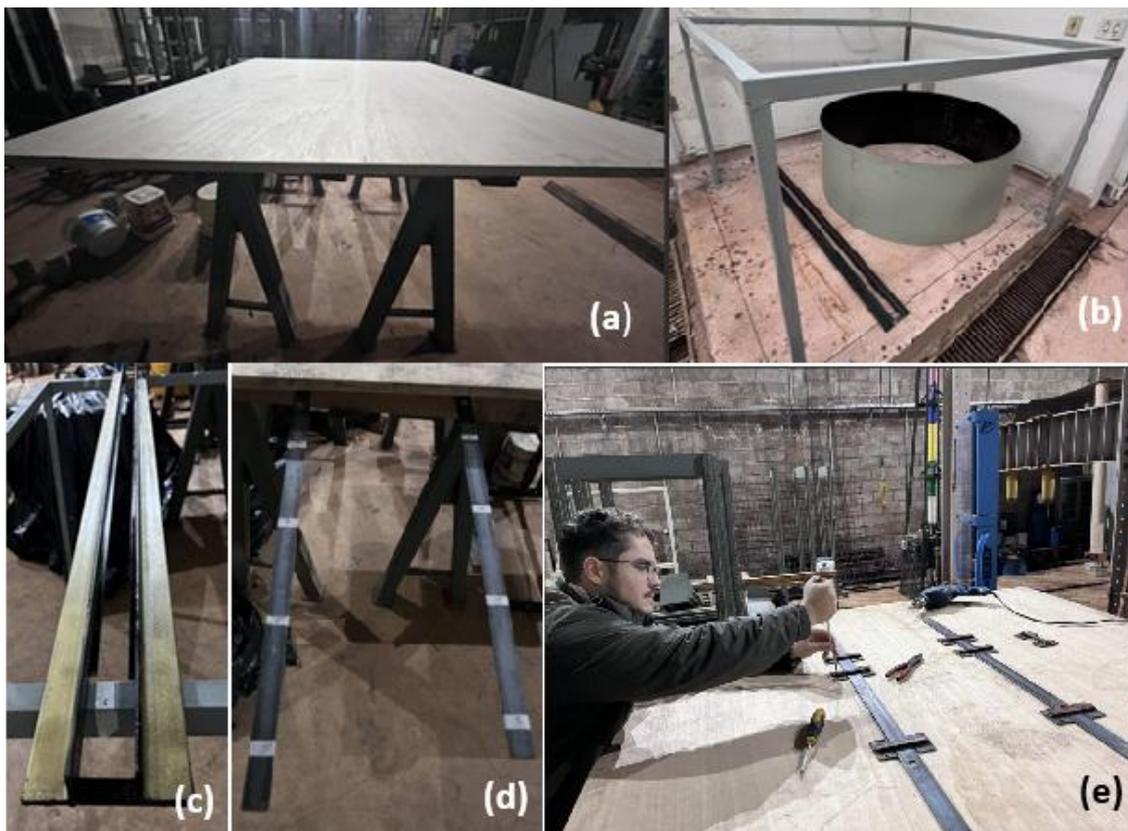
Figura 29– Projeto inicial dos acessórios de medição: elementos deslizantes para abertura das saídas, régua de suporte da trena, suporte para fixação dos elementos deslizantes.





Fonte: O autor

Figura 30 - (a) Plataforma de compensado naval. (b) Estrutura de suporte da régua. (c) Régua de suporte da trena laser. (d) Elementos deslizantes para abertura das saídas. (e) Fixação dos elementos deslizantes.



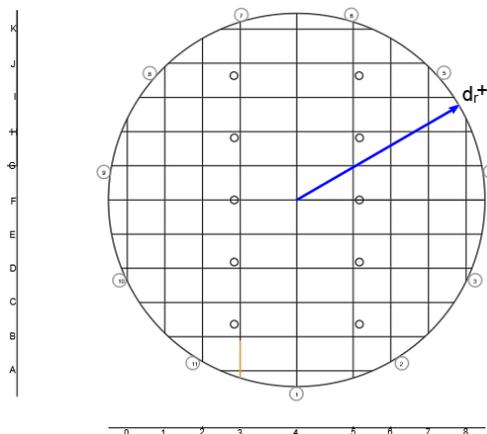
Fonte: O autor.

As medições de altura do produto seguiram com base no modelo anterior, com ajustes na escala (Figura 31) utilizando uma trena laser para medir cada ponto após encerrar o descarregamento em cada fase. Os relógios foram todos posicionados conforme os ajustes da escala, e ao todo foram posicionados 11 relógios comparadores, em uma altura de 25cm.

A marcação de deslocamento com os relógios se dá pelo valor de uma distância radial d_r , delimitando os valores de deslocamento em positivo e negativo (Figura 31).

Figura 31– Representação do posicionamento dos relógios comparadores e instrumentos de medição de altura do produto e deslocamento da parede.





Fonte: O autor.

4.9 As condições de descarregamento dos silos

O início de cada ensaio se deu no enchimento do silo até que o topo alcançasse uma altura média entre 77 e 78cm. Em cada enchimento registrou-se a massa inserida por pesagem, e após cada descarregamento efetuou-se nova pesagem para determinar a porcentagem descarregada e a massa remanescente no último ciclo.

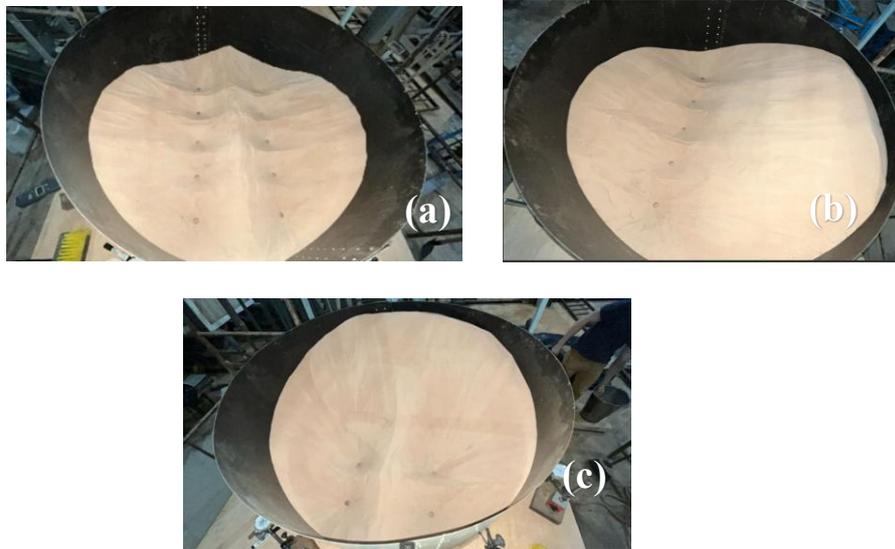
Os descarregamentos foram divididos em faixas de 20% da massa total, e entre cada faixa realizou-se leitura dos relógios comparadores para registrar os deslocamentos das paredes (em mm) e medição das alturas do produto nas coordenadas pré-estabelecidas. Na primeira condição, foi adotado uma configuração na qual o silo se encontra com todas as saídas abertas, como segue a Figura 32 (a) e 33 (a). Na segunda condição, o silo estaria com apenas as saídas de uma das laterais abertas, como segue a Figura 32 (b) e 33 (b), e na terceira condição, o silo ficou com as quatro saídas inferiores abertas, como segue a Figura 32 (c) e 33 (c).

Figura 32– Silo 1:120 - (a) Todas as saídas abertas; (b) Apenas uma das saídas laterais abertas; (c) Apenas quatro das saídas inferiores abertas.



Fonte: O autor.

Figura 33– Silo 1:50 - (a) Todas as saídas abertas; (b) Apenas uma das saídas laterais abertas; (c) Apenas quatro das saídas inferiores abertas.



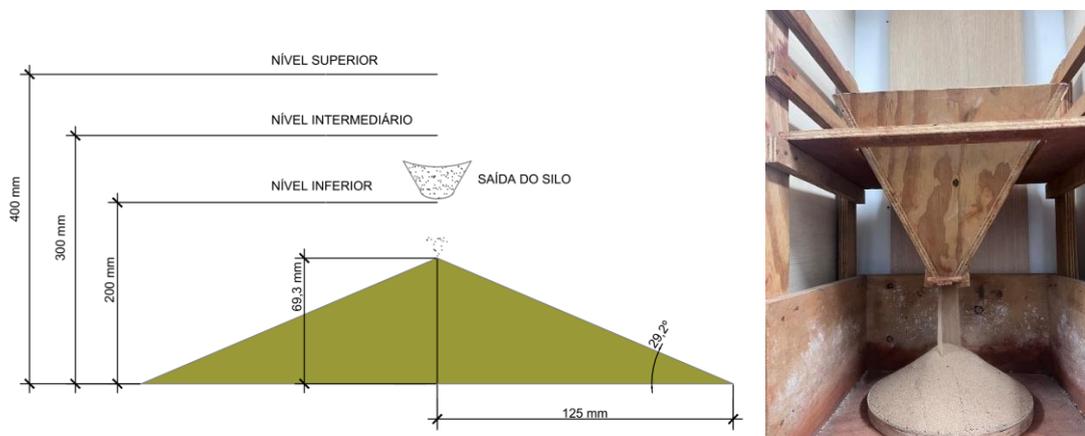
Fonte: O autor.

5 RESULTADOS

5.1 Ângulo de repouso

Com o ensaio de ângulo de repouso da areia, foi obtido uma média aritmética de doze séries com altura de queda (200mm). Como demonstrado pela Figura 34, o ângulo de repouso da areia obtido foi de $29,2^\circ \pm 2,8^\circ$, e a altura média obtida foi de 69,3mm.

Figura 34- Esquema geométrico para obtenção do ângulo de repouso.



Fonte: O autor.

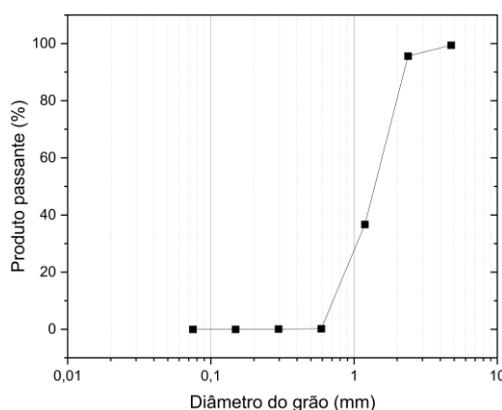
5.2 Teor de umidade

O ensaio de teor de umidade da areia apresentou em laboratório um índice de 1,3% umidade.

5.3 Ensaio de granulometria

Através do ensaio granulométrico da areia, realizado conforme a NBR 7181 (ABNT, 2018), NBR 16915 (ABNT, 2021) e NBR 17054 (ABNT, 2022), demonstrou que o produto de areia (Figura 35) começou a ter sua massa retida a partir da abertura de 1,19 mm, sendo classificada como areia grossa.

Figura 35 - Curva granulométrica da areia.



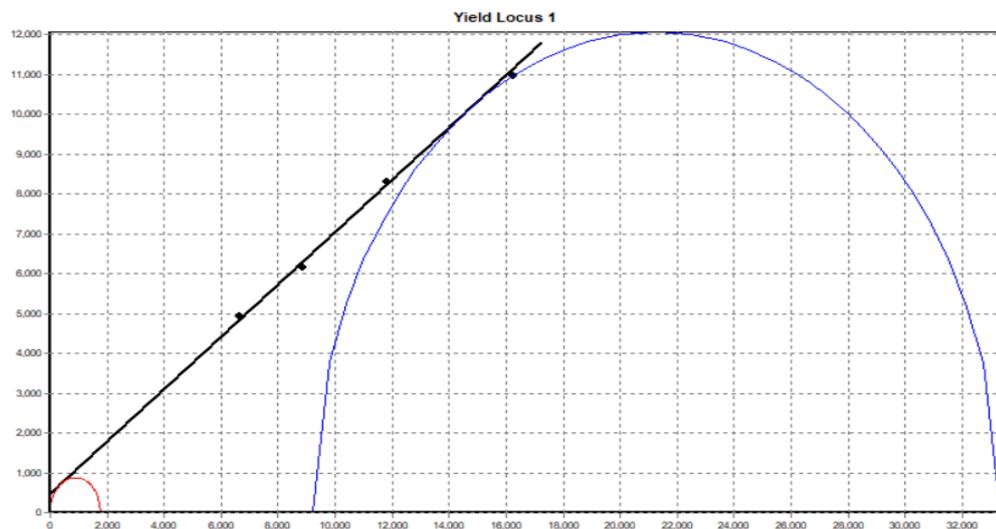
Fonte: O autor.

5.4 Cisalhamento direto e nas paredes

Com os ensaios de cisalhamento direto realizados no aparelho TSG 70 – 140 AVT, foi possível refinar os dados e inseri-los no software desenvolvido por Cheung (2007), para a obtenção de cada envoltório de resistência que são solicitados, sendo estes o peso específico γ , coesão c , ângulo de atrito interno ϕ_i , efetivo ângulo de atrito interno ϕ_e , resistência inconfina f_{ic} e resistência confinada f_c . O programa realiza a determinação das propriedades físicas do produto analisado através de três séries, calculando uma média em seus resultados (Tabela 2), e com valor do ângulo de atrito com a parede de 33,23°.

Tabela 2 – Resultados das propriedades da areia obtidas no ensaio de cisalhamento direto.

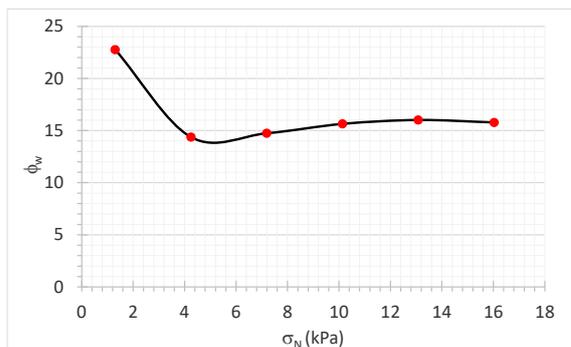
Umidade	Tempo de consolidação da amostra	Peso Específico γ (kN/m ³)	Coesão N/m ²	ϕ_i (°)	ϕ_e (°)	Resistência inconfiada f_{ic} (N/m ²)	Resistência confinada f_c (N/m ²)	Tensão de Consolidação σ_I (N/m ²)
1,30%	0h	15,51	475,04	33,30	34,60	1760,74	33331,07	16232,89
		15,47	288,96	33,10	34,30	1067,44	22931,03	11813,40
		15,59	562,56	33,30	36,50	2084,23	15985,25	9313,16



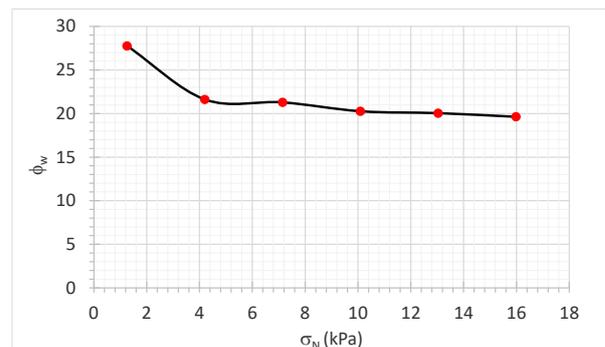
Fonte: O autor.

Utilizando novamente o equipamento TSG 70 – 140 AVT para o ensaio de cisalhamento direto com as paredes, foi possível determinar a resistência entre o produto analisado e as paredes do silo. Foram testados diversos materiais, contudo para análise do silo estudado são apresentados os resultados do ângulo de atrito com a parede lisa e rugosa (Figura 36).

Figura 36 – Ângulo de atrito com a parede: (a) aço liso e (b) rugoso.



(a)



(b)

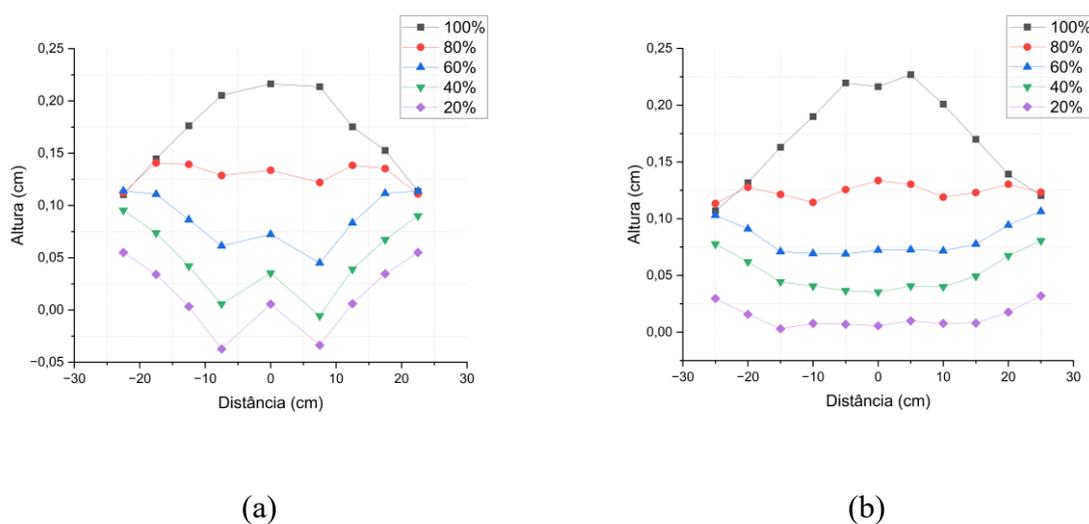
Fonte: O autor.

5.5 Resultados da geometria dos canais de fluxo do modelo 1:120

5.5.1 Condição 1 - Simulação com todas as saídas abertas

Na condição 1, observa-se que o descarregamento foi configurado nas múltiplas saídas, demonstrando um comportamento simétrico na Figura 37 conforme o esperado nesta situação aplicada.

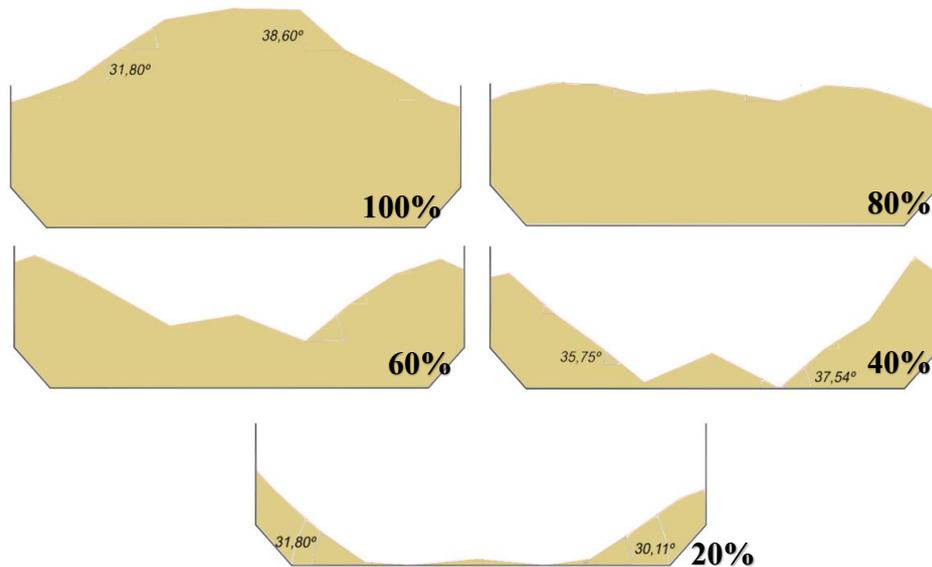
Figura 37 - Gráfico da altura do produto em diferentes estágios, vista frontal (a) e lateral (b) em relação às saídas.



Fonte: O autor.

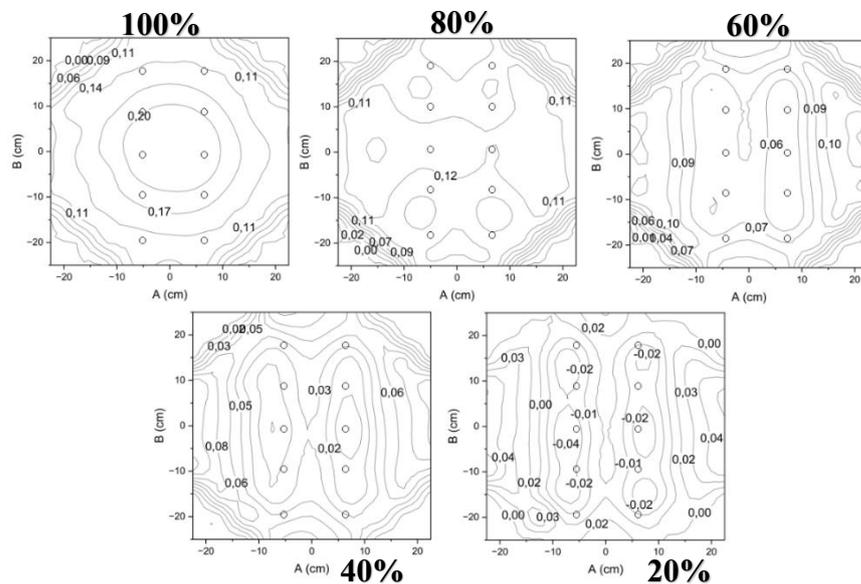
Ao analisar os gráficos da altura, observa-se que o produto na condição 1 apresenta produto estagnado. Embora o produto descarregue de forma simétrica, em relação ao eixo horizontal adotado de escala 0-8 (Figura 28), existe uma assimetria em relação ao perímetro da seção, conforme observado pelas Figuras 38 e 39. Quando o silo atinge os 20% de carga total, percebe-se que nesta configuração os ângulos da carga residual são de $31,80^\circ$ e $30,11^\circ$, que são valores próximos dos valores de repouso obtidos no ensaio realizado neste trabalho. A massa inicial registrada foi de aproximadamente 57 kg, e conforme o silo foi descarregando, foram registrados 45,79 kg para 80%, 33,67 kg para 60%, 22,35 kg para 40% e por fim, 10,68 kg para 20%.

Figura 38 - Ângulos formados pelo produto na condição 1, da carga total à 20% do produto armazenado, da esquerda à direita respectivamente.



Fonte: O autor.

Figura 39 - Curvas de nível da condição 1, da carga total à 20% do produto armazenado, da esquerda à direita respectivamente.



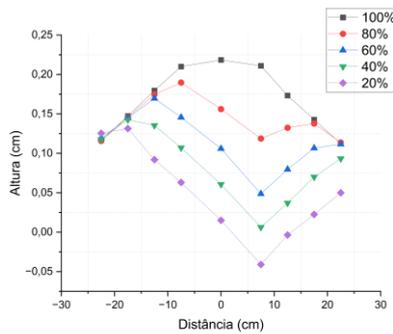
Fonte: O autor.

5.5.2 Condição 2 - Simulação com as saídas de uma lateral aberta

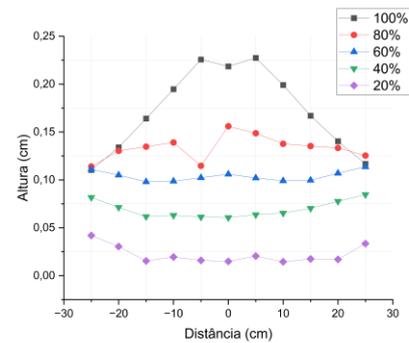
Observa-se que o resultado obtido está em concordância com a literatura, apresentando uma assimetria acentuada em seu descarregamento, proporcionado ao volume

dos taludes devido aos canais de fluxos provenientes da operação na Figura 40 - Gráfico da altura do produto em diferentes estágios, vista frontal (a) e lateral (b) em relação às saídas.

Figura 40 - Gráfico da altura do produto em diferentes estágios, vista frontal (a) e lateral (b) em relação às saídas.



(a)

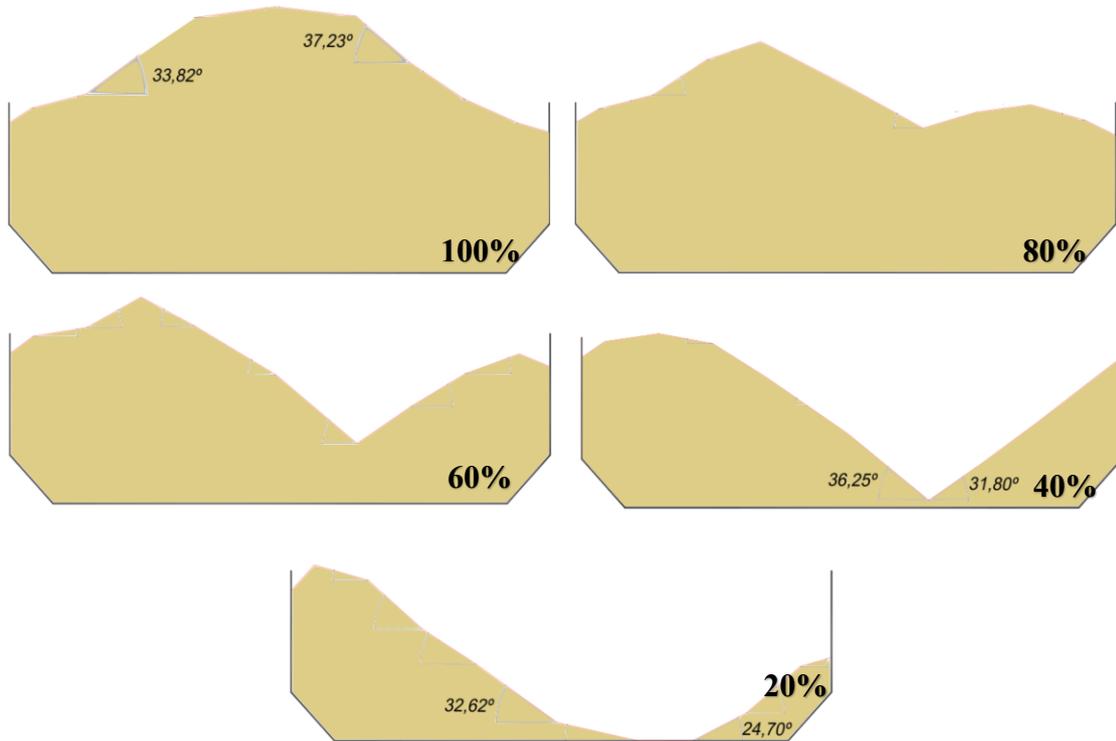


(b)

Fonte: O autor.

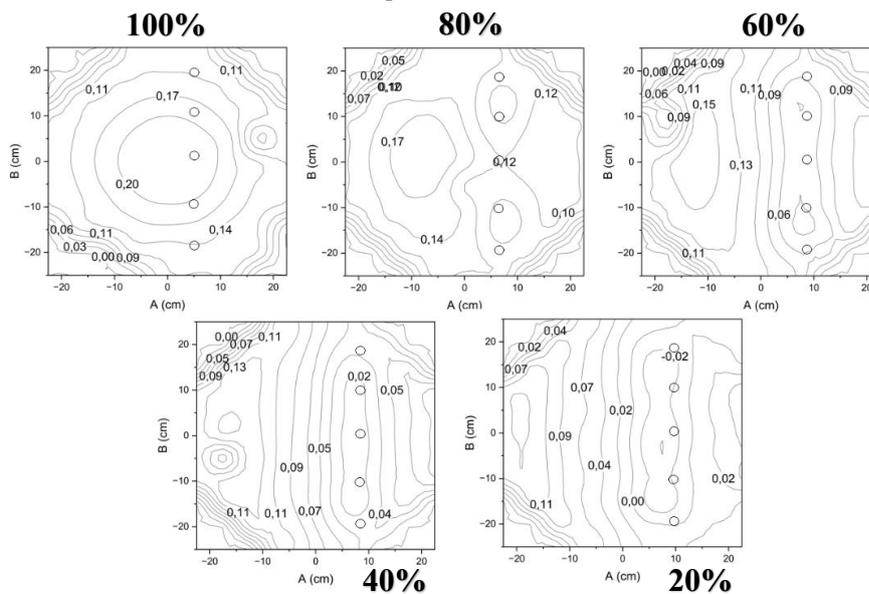
Diferente do que foi visto na condição 1, o segundo condição demonstra um maior acúmulo de produto estacionado, volume este que provoca um aumento considerável da pressão exercida sobre as paredes, conforme pode ser observado pelas Figuras 41 e 42, demonstram um aspecto onde o silo aos 20% da carga total apresenta um ângulo crítico de 32° em um dos lados. A massa inicial registrada foi de aproximadamente 57 kg, e conforme o silo foi descarregando, foram registrados 48,70 kg para 80%, 40,45 kg para 60%, 32,26 kg para 40% e por fim, 21,17 kg para 20%.

Figura 41 - Ângulos formados pelo produto na condição 2, da carga total à 20% do produto armazenado, da esquerda à direita respectivamente.



Fonte: O autor.

Figura 42 - Curvas de nível da condição 2, da carga total à 20% do produto armazenado da esquerda à direita respectivamente.

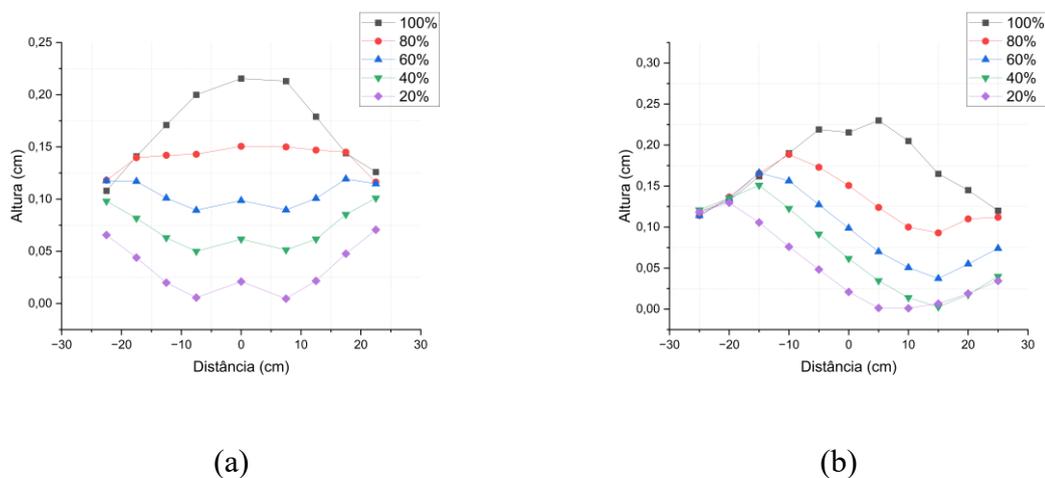


Fonte: O autor.

5.5.3 Condição 3 - Simulação com as saídas inferiores abertas

As ações foram distintas com verificação assimétrica das deformações, como mostrado na Figura 43 - Gráfico da altura do produto em diferentes estágios, vista frontal (a) e lateral (b) em relação às saídas.

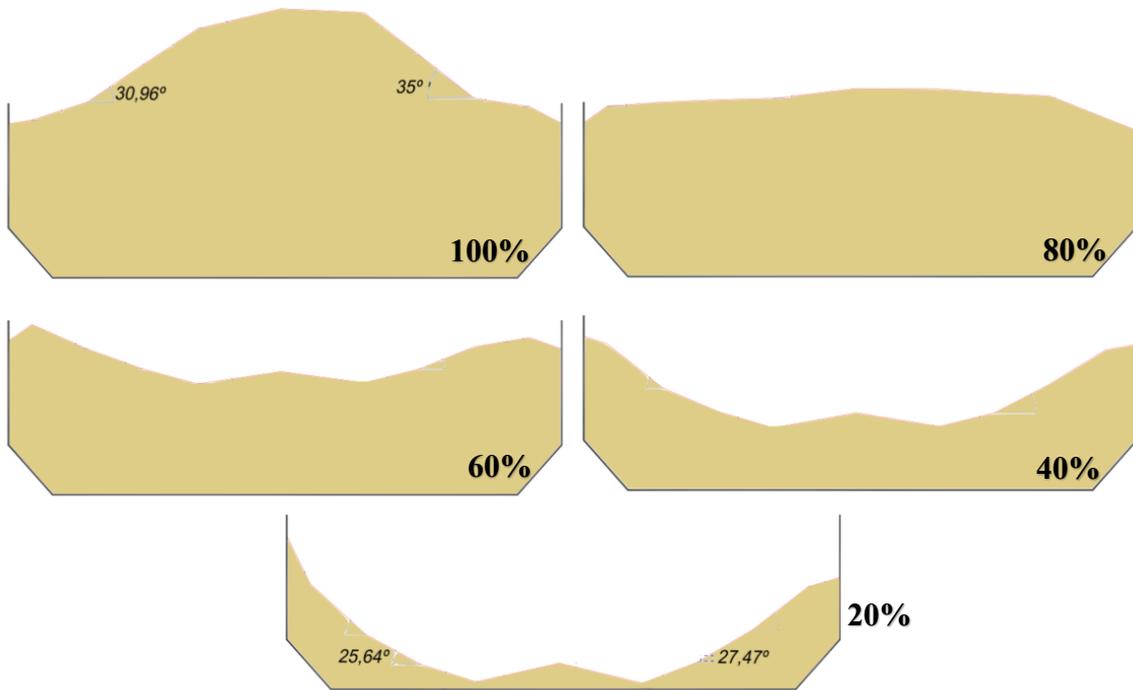
Figura 43 - Gráfico da altura do produto em diferentes estágios, vista frontal (a) e lateral (b) em relação às saídas.



Fonte: O autor.

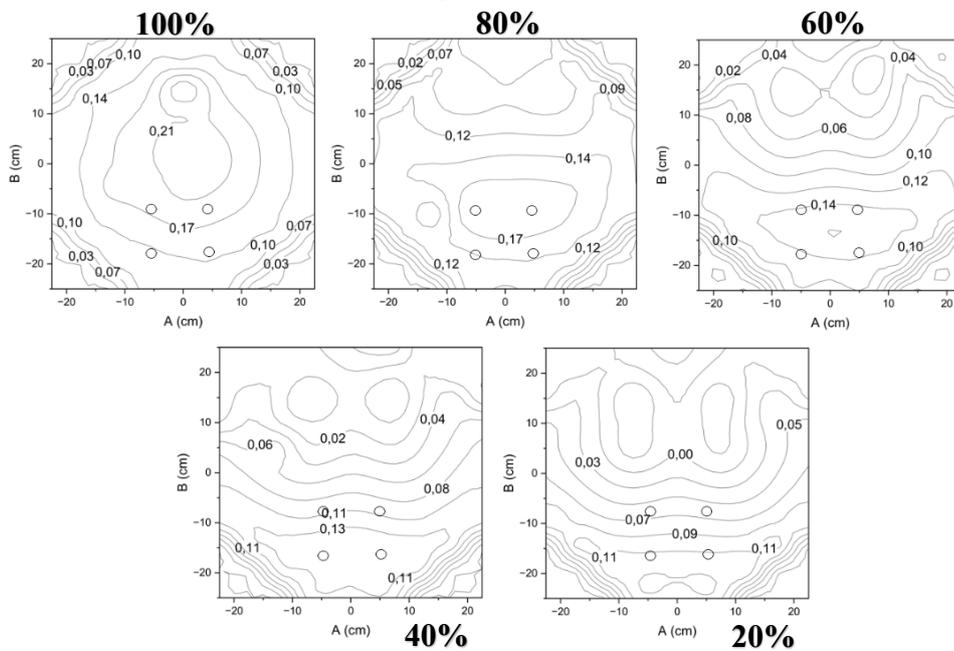
As deformações tiveram um equilíbrio considerado em relação a condição 2 e o ângulo crítico dos taludes devido a descarga total do produto apresentam pequenas variações em relação ao ensaio de ângulo de repouso, e conforme pode ser observado pelas Figuras 44 e 45, que demonstram as fases do descarregamento de forma visual com seus respectivos ângulos e alturas nas curvas de nível formadas, que nesta configuração, o silo ao alcançar os 20% da carga total, apresenta um ângulo de $25,64^\circ$, demonstrando a baixa retenção de sólidos comparado às demais condições. A massa inicial registrada foi de aproximadamente 57 kg, e conforme o silo foi descarregando, foram registrados 48,37 kg para 80%, 39,30 kg para 60%, 30,82 kg para 40% e por fim, 22,72 kg para 20%.

Figura 44 - Ângulos formados pelo produto na condição 3, da carga total à 20% do produto armazenado, da esquerda à direita respectivamente.



Fonte: O autor.

Figura 45 - Curvas de nível da condição 3, da carga total à 20% do produto armazenado da esquerda à direita respectivamente.



Fonte: O autor.

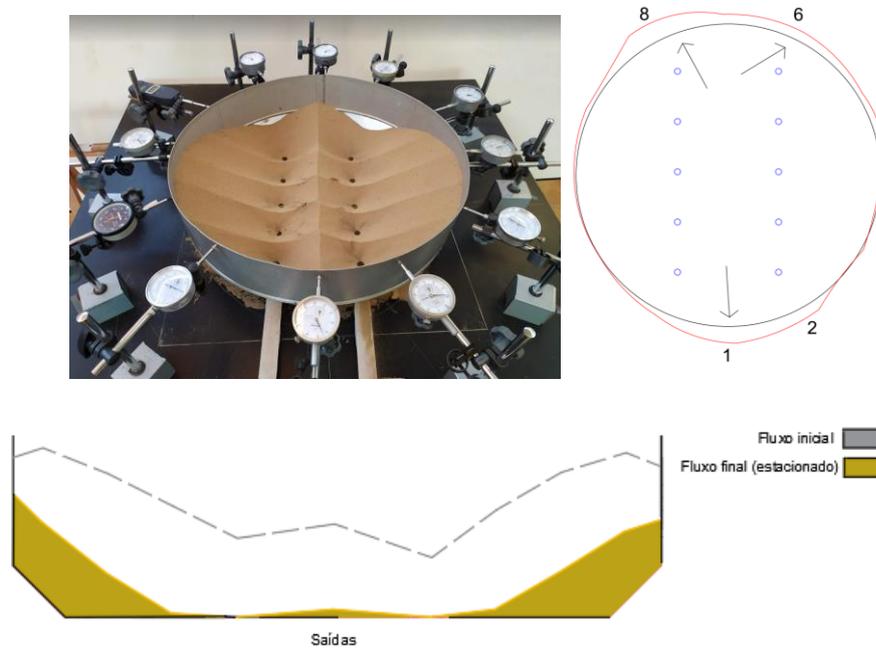
Com os relógios comparadores, foi possível analisar o comportamento do deslocamento do radial da parede do silo, possibilitando uma compreensão da ordem de grandeza dos esforços simétricos e assimétricos. Nota-se que quanto mais “ovalizado” o formato, maior é a flexão em determinado ponto. Na condição 1 (Figura 46), observa-se que a maior parte do deslocamento total se encontra nos relógios 01 (2,560mm), 02 (3,430mm), 06 (3,677mm) e 08 (0,757mm) referente ao posicionamento da Figura 28. Percebe-se que o relógio 08 apresenta o maior deslocamento.

Nota-se pelo estudo de deslocamento na condição 2 (Figura 47), que todo o volume se desloca de forma assimétrica, aumentando as cargas sobre as paredes do lado esquerdo de forma desproporcional. Os relógios que identificaram os maiores deslocamentos foram: 02 (0,630mm), 05 (2,927mm) e 06 (5,197mm). É possível observar que o produto estacionado gerou uma pressão assimétrica em apenas um dos lados.

Embora o descarregamento apresente certa assimetria, observa-se que o deslocamento das paredes na condição 3 foi direcionado para as paredes opostas ao canal de fluxo conforme Figura 48. Este comportamento pode ser justificado pela presença de maior quantidade de produto estagnado na parede oposta e alívio na região das saídas do silo. Esta condição pode levar em um silo real o deslocamento das paredes em relação ao anel, caso os aparelhos de apoio do silo permitam deslocamentos horizontais. Os relógios que identificaram os maiores deslocamentos foram: 01 (1,310 mm), 06 (6,820mm), 07 (7,243mm), 08 (4,970mm) e 10 (2,410mm).

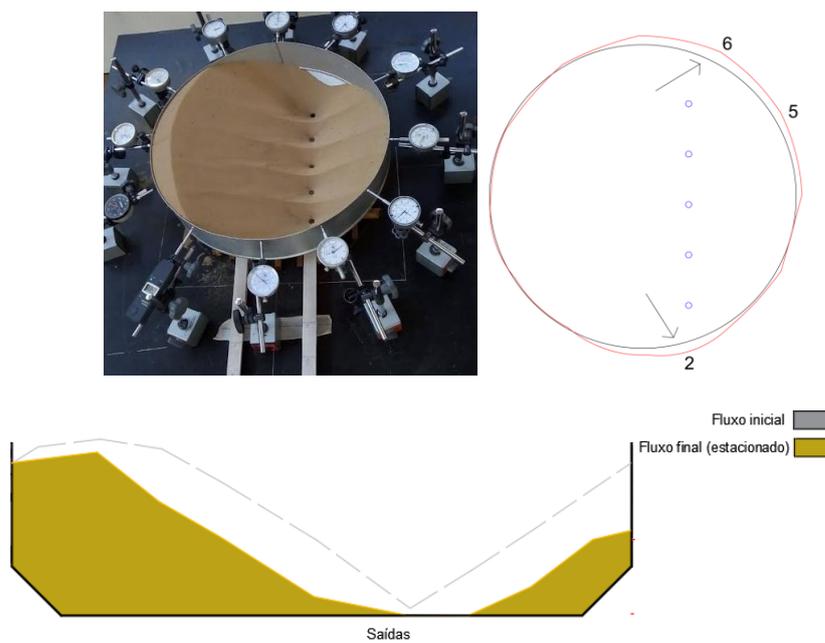
Dos deslocamentos observados, os maiores esforços de flexão são produzidos pela maior diferença entre as medidas. Desta forma, fica evidente que as condições 2 e 3 são as mais críticas para o dimensionamento estrutural de um silo baixo submetido ao descarregamento excêntrico.

Figura 46 - Deslocamento em milímetros da parede do silo, registrado pelos relógios comparadores na condição 1.



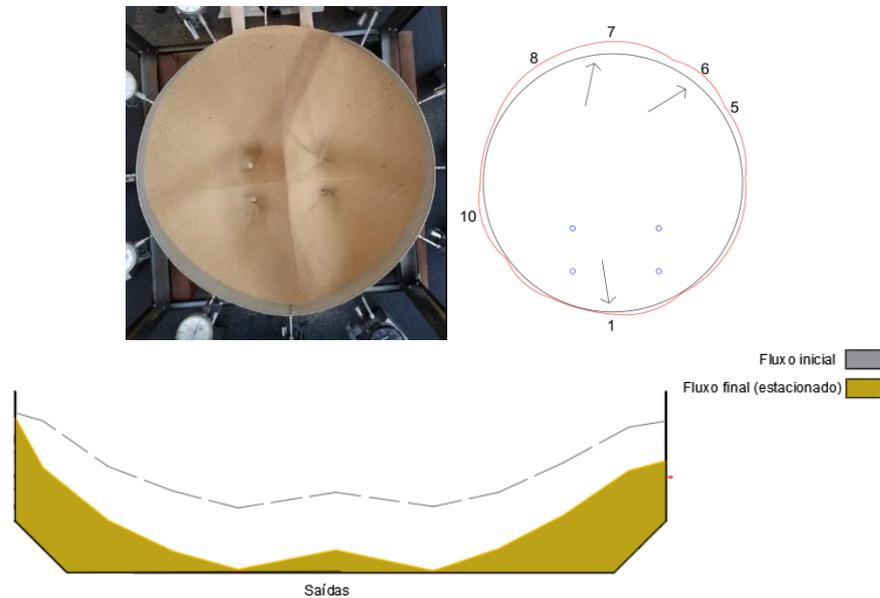
Fonte: O autor.

Figura 47 - Deslocamento em milímetros da parede do silo, registrado pelos relógios comparadores na condição 2.



Fonte: O autor.

Figura 48 - Deslocamento em milímetros da parede do silo, registrado pelos relógios comparadores na condição 3.



Fonte: O autor.

Através dos resultados obtidos, pode-se observar que em cada condição o produto do silo descarrega de forma distinta. Dentre as hipóteses analisadas, as condições 2 e 3 apresentam os maiores esforços de flexão na parede do silo. A condição 1 apresenta um descarregamento quase-simétrico, seguindo a configuração de múltiplas saídas livres. Pode-se observar que o ângulo do canal de fluxo obtido está compreendido entre o ângulo de repouso e o efetivo ângulo de atrito interno, que variou entre $29,2^\circ$ (ângulo de repouso do produto) e 27° a 32° (ângulo obtido pelos ensaios com o modelo).

5.6 Resultados da geometria dos canais de fluxo do modelo 1:50

5.6.1 Condição 1 - Simulação com todas as saídas abertas

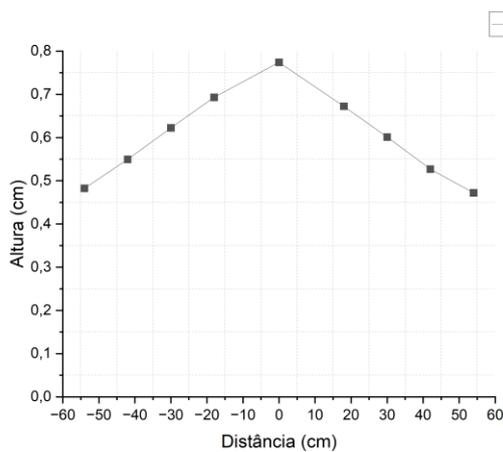
No cenário 1, com todas as saídas abertas, o silo apresentou comportamento majoritariamente simétrico no escoamento em relação ao eixo horizontal, embora tenha ocorrido leve assimetria no perímetro da seção. Analiticamente, o desempenho esteve de acordo com a literatura e com o ensaio em escala 1:120. A massa inicial era de aproximadamente 1041,56 kg, com ângulo do canal de fluxo médio de 30° (Figura 49),

Durante as etapas de descarga, observaram-se variações na simetria, especialmente no primeiro e terceiro descarregamentos, possivelmente ligadas a falhas na abertura ou à geometria

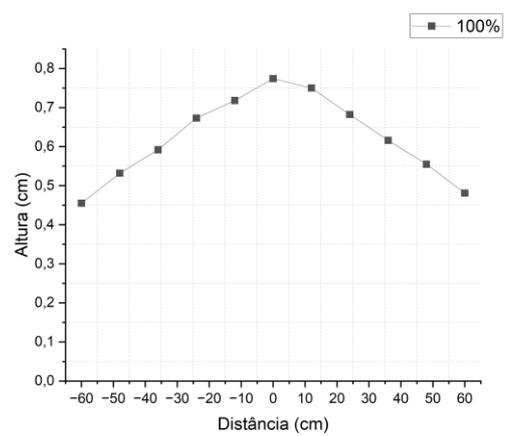
das saídas, além de diferenças marcantes nos ângulos de repouso e deslocamentos das paredes, chegando a -1,657 mm de recuo e 0,680 mm de avanço aos 20% de carga.

Apesar do fluxo livre predominante, formaram-se zonas estacionárias de até 45 cm e houve retenção final de cerca de 208,3 kg, apontando necessidade de ajustes para reduzir perdas e melhorar a eficiência.

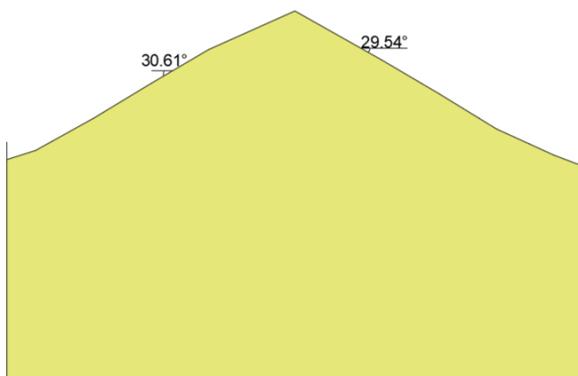
Figura 49 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos $\phi_{r,d}$ (c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e d_r (f), com carga total à 100% do produto armazenado.



(a)



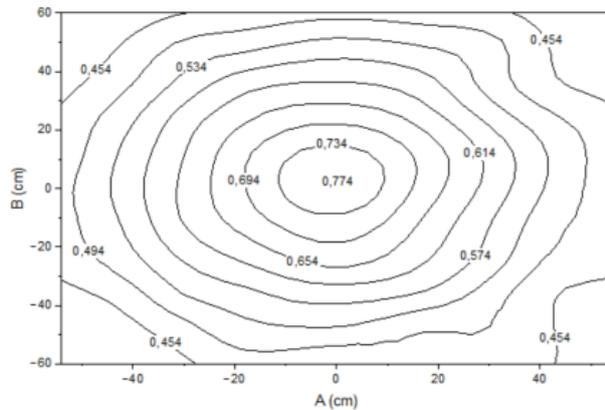
(b)



(c)



(d)



(e)

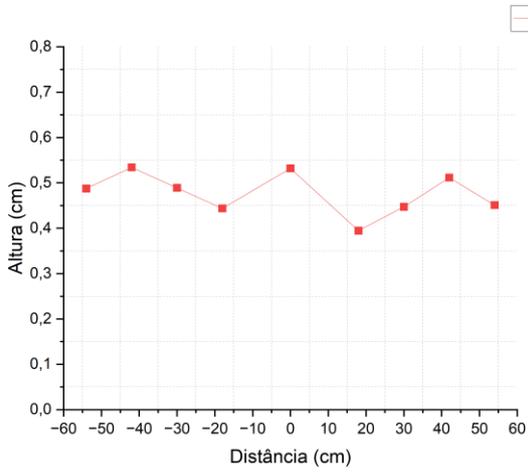
Fonte: O autor.

Quando o silo atinge os 80% de carga, contém uma massa de 833,24 kg distribuídos, e percebe-se que o primeiro descarregamento apresenta uma leve assimetria entre as linhas de saída, o que pode ser justificado possivelmente por alguma falha durante a abertura das saídas (Figura 50).

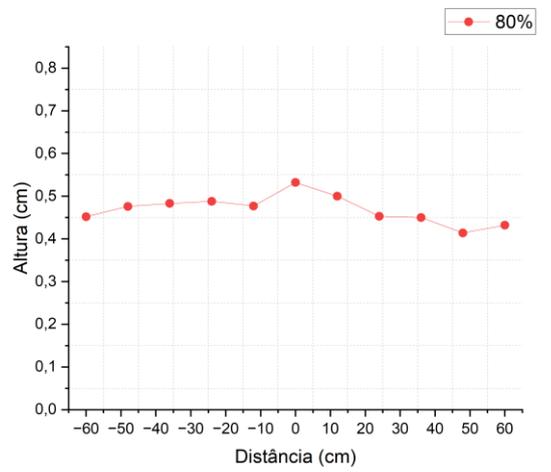
O ângulo do canal de fluxo médio obtido entre ambas as superfícies alinhadas com as saídas foi respectivamente de $32,29^\circ$, com uma altura máxima de 53,2cm.

Com relação aos deslocamentos obtidos por relógio medidor, observa-se que o relógio 6 marcou o maior valor negativo (recoo da parede) com -0,135mm e o relógio 9 marcou o maior valor positivo de 0,287mm (avanço da parede) (Tabela 3).

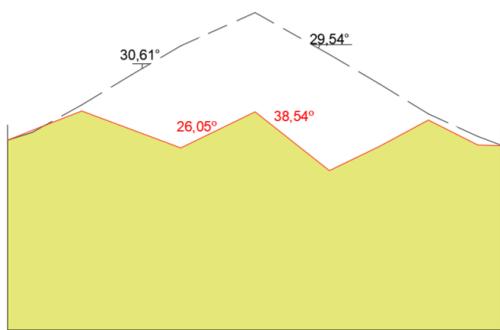
Figura 50 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos $\phi_{r,d}$ (c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e d_r (f), com carga total à 80% do produto armazenado.



(a)



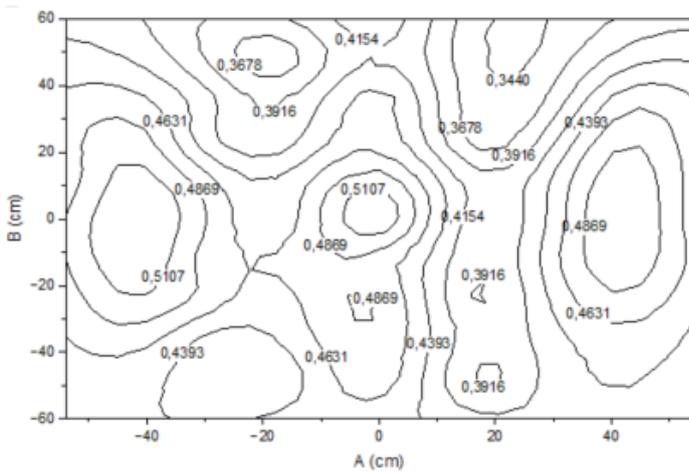
(b)



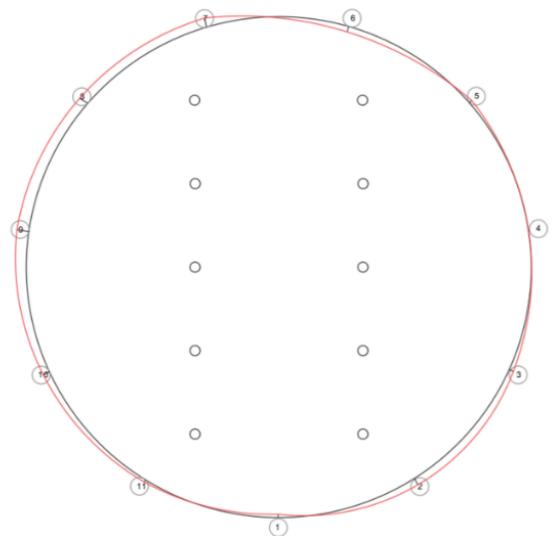
(c)



(d)



(e)

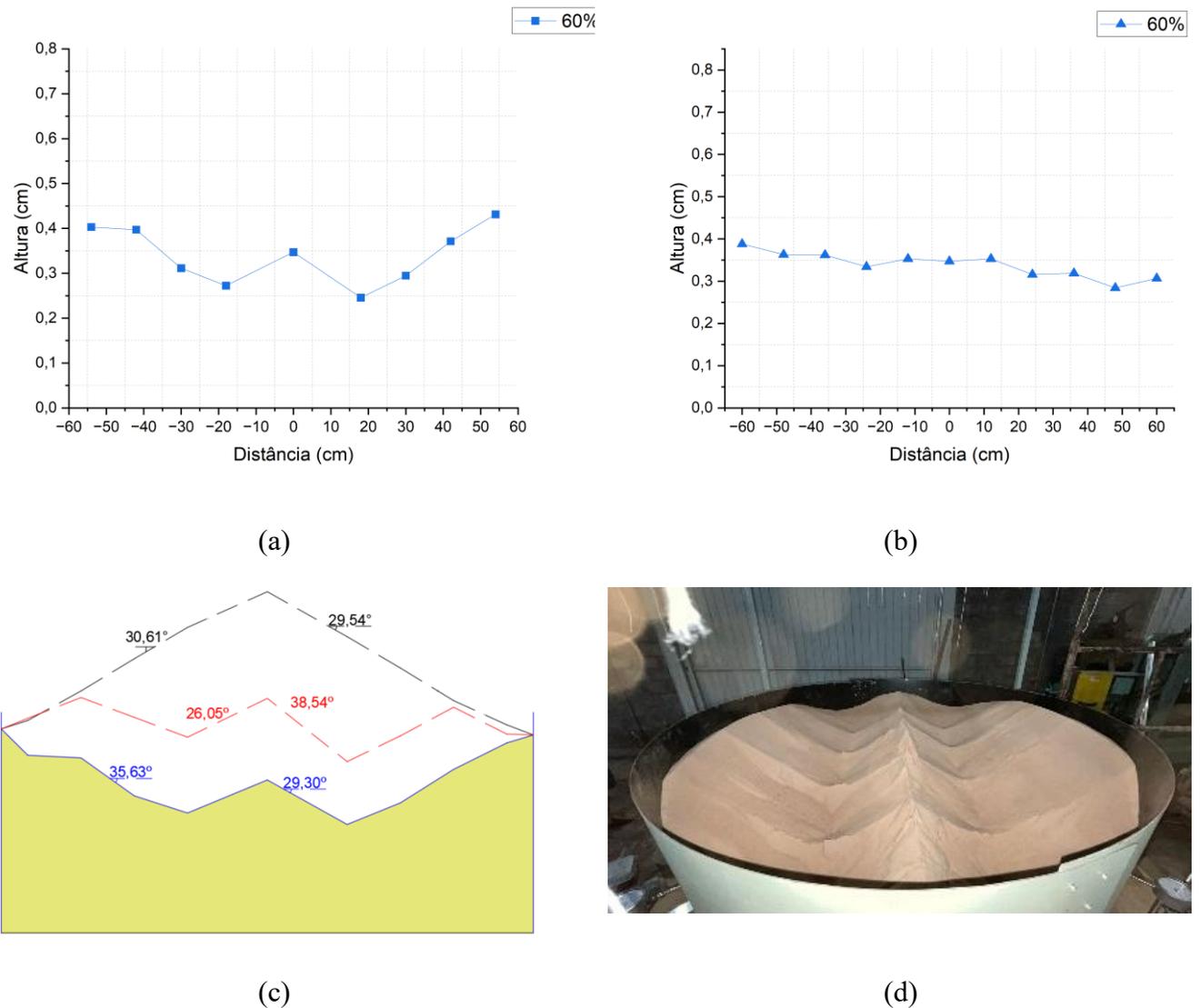


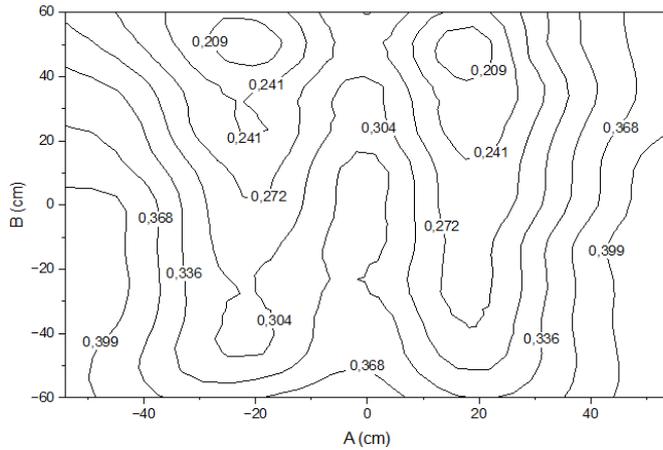
(f)

Fonte: O autor.

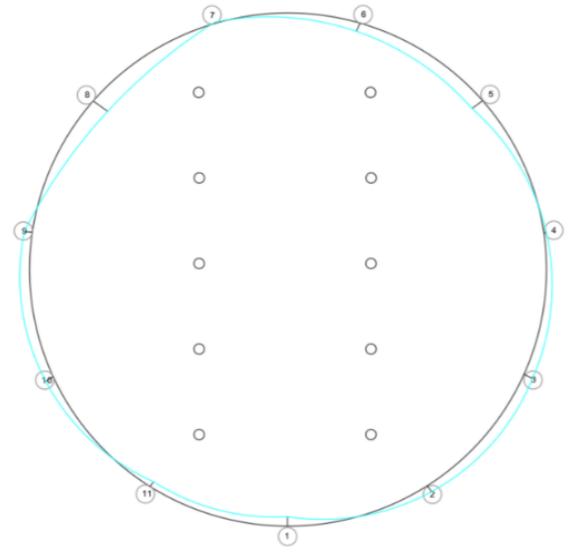
Quando o silo atinge 60% de carga, contém uma massa de 624,936 kg distribuídos, e percebe-se que o segundo descarregamento apresenta uma restauração da simetria entre as linhas de saída, o que segue coerente ao padrão estabelecido na literatura. A média do ângulo do canal de fluxo obtido entre ambas as superfícies alinhadas com as saídas foi respectivamente de $32,46^\circ$ com uma altura máxima de 43,1cm (Figura 51). Com relação aos deslocamentos obtidos por relógio medidor, observa-se que o relógio 8 marcou o maior valor negativo (recoo da parede) com -0,413mm e o relógio 3 marcou o maior valor positivo de 0,220mm (avanço da parede) (Tabela 3).

Figura 51 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos $\phi_{r,d}$ (c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e d_r (f), com carga total à 60% do produto armazenado.





(e)

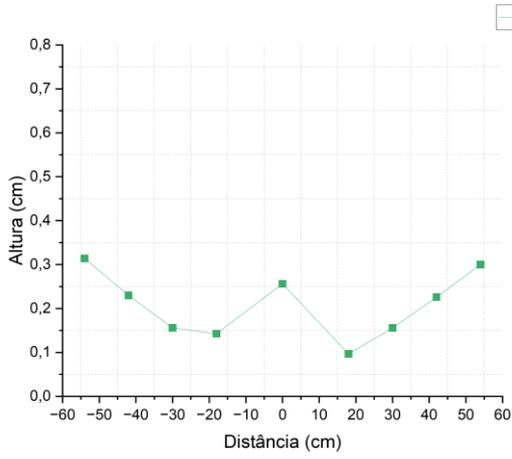


(f)

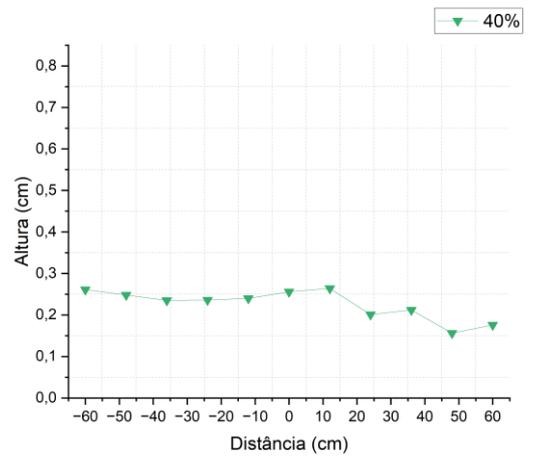
Fonte: O autor.

Quando o silo atinge 40% de carga, contém uma massa de 416,624 kg distribuídos, e percebe-se que o terceiro descarregamento apresenta nova assimetria entre as linhas de saída, o que pode ser devido a pequenas falhas na geometria da saída. O ângulo do canal de fluxo obtido entre ambas as superfícies alinhadas com as saídas foi respectivamente de $31,19^\circ$ com uma altura máxima de 34,3cm (Figura 52). Com relação aos deslocamentos obtidos por relógio medidor, observa-se que os relógios 1 e 11 marcaram o maior valor negativo (recoo da parede) com -0,410mm e o relógio 3 marcou o maior valor positivo de 0,330mm (avanço da parede) (Tabela 3).

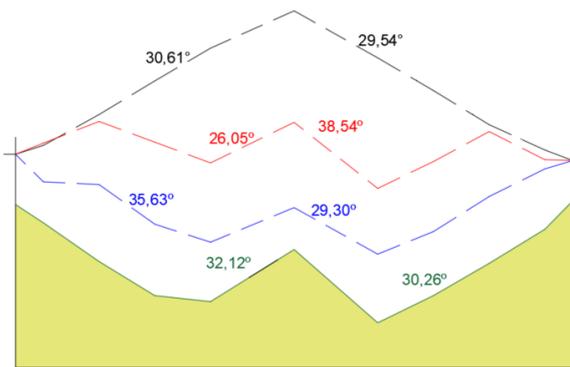
Figura 52 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos $\phi_{r,d}$ (c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e d_r (f), com carga total à 40% do produto armazenado.



(a)



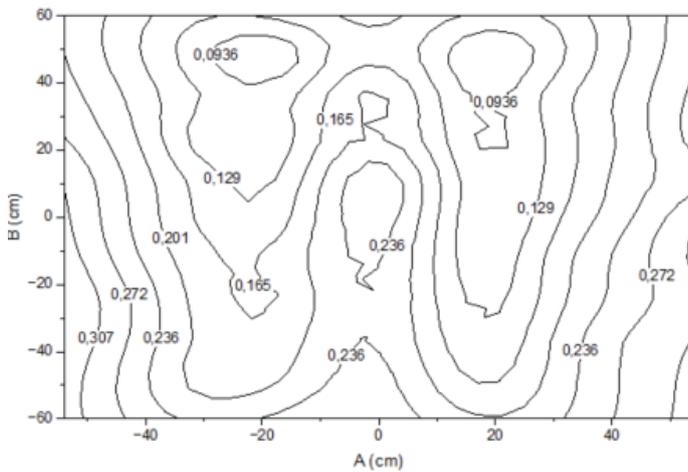
(b)



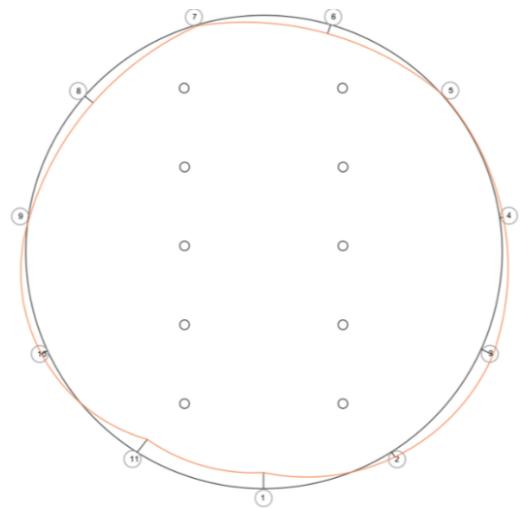
(c)



(d)



(e)

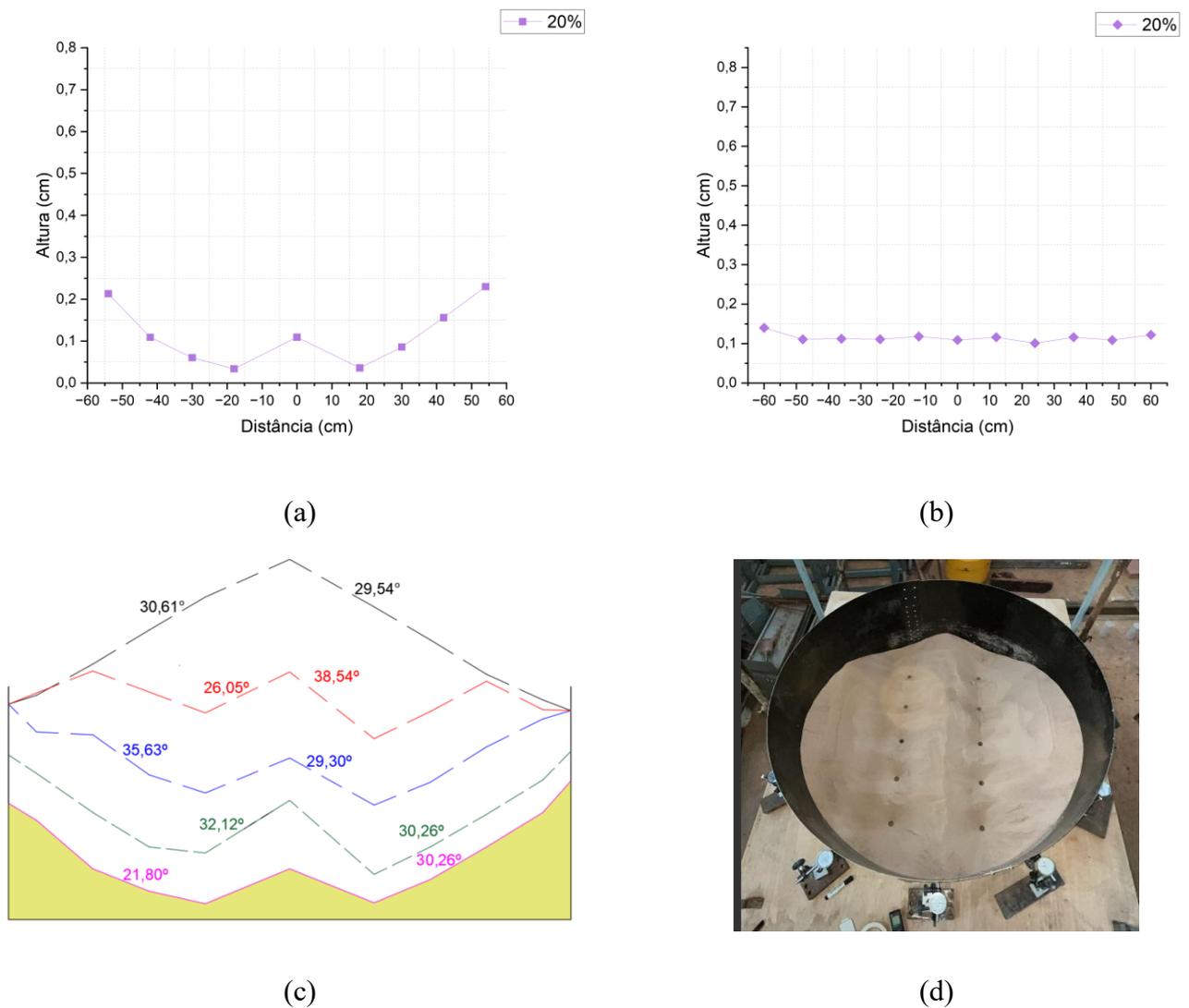


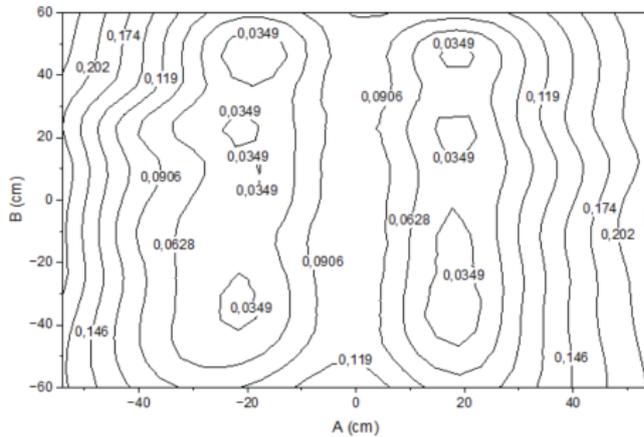
(f)

Fonte: O autor.

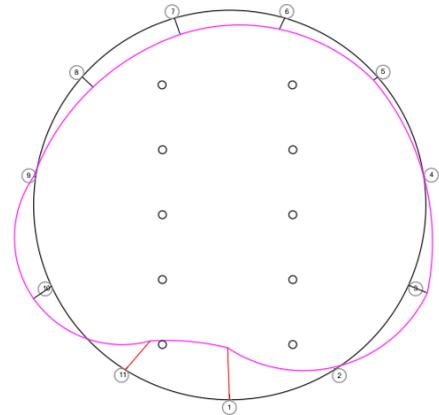
Aos 20% de carga, contém uma massa de 208,312 kg distribuídos, e percebe-se que o quarto descarregamento apresenta uma restauração da simetria entre as linhas de saída, o que segue coerente ao padrão estabelecido na literatura. O ângulo do canal de fluxo obtido entre ambas as superfícies alinhadas com as saídas foi respectivamente de $26,03^\circ$ com uma altura máxima de 23cm (Figura 53). Com relação aos deslocamentos obtidos por relógio medidor, observa-se que o relógio 1 marcou o maior valor negativo (recoo da parede) com -1,657mm e o relógio 10 marcou o maior valor positivo de 0,680mm (avanço da parede) (Tabela 3).

Figura 53 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos $\phi_{r,d}$ (c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e d_r (f), com carga total à 20% do produto armazenado.





(e)



(f)

Fonte: O autor.

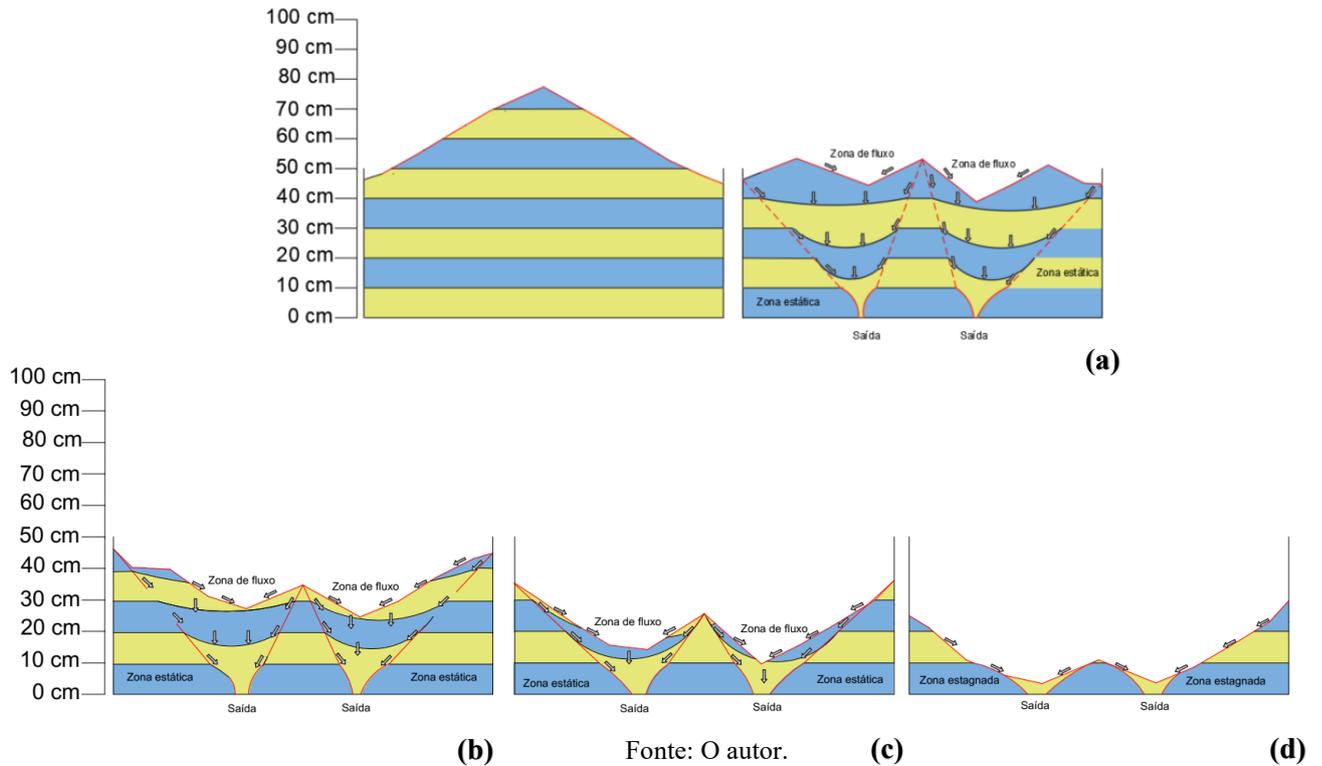
Tabela 3 – Deslocamento dos relógios do ensaio 1.

		Deslocamento Radial (mm) *				
		Volume de carga (%)				
		100	80	60	40	20
RELÓGIOS MEDIDORES	1	0	-0,080	-0,223	-0,410	-1,657
	2	0	0,173	0,170	0,153	-0,337
	3	0	0,107	0,220	0,330	0,623
	4	0	-0,037	0,057	0,090	0,003
	5	0	0,080	-0,307	0,020	-0,157
	6	0	-0,135	-0,210	-0,237	-0,380
	7	0	0,223	0,027	-0,027	-0,533
	8	0	0,227	-0,413	-0,270	-0,460
	9	0	0,287	0,187	-0,027	0,063
	10	0	0,162	0,203	0,173	0,680
	11	0	0,060	-0,140	-0,410	-1,177
* d_r, Positivo pela convenção de sinais conforme a Figura 31						

Fonte: O autor.

Nota-se que o comportamento do fluxo do produto na Figura 54, com a média obtida das três amostras do ensaio 1, tem um fluxo livre durante todas as etapas de descarregamento, o fluxo é livre na direção das linhas de saída, no entanto, durante toda a movimentação, o silo teve duas zonas estacionárias chegando até 45cm de altura, e por fim, uma pequena fração desse produto permaneceu estagnada ao final dos 20%, com cerca de 25cm de altura e 208,312kg de produto retido.

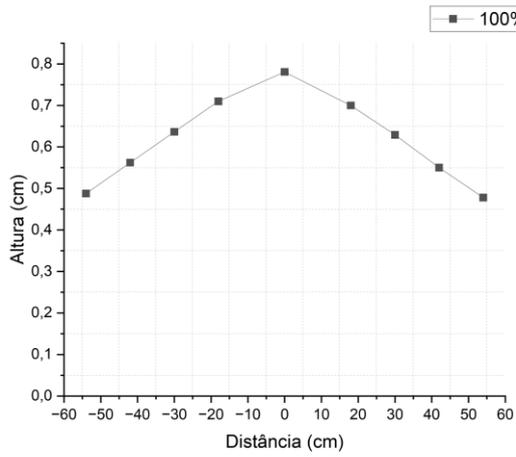
Figura 54 – Representação da evolução do fluxo no processo de descarregamento entre as zonas de limites: (a) Descarregamento em 80 % (b) Descarregamento em 60 %, (c) Descarregamento em 40 %, (d) Descarregamento em 20 %.



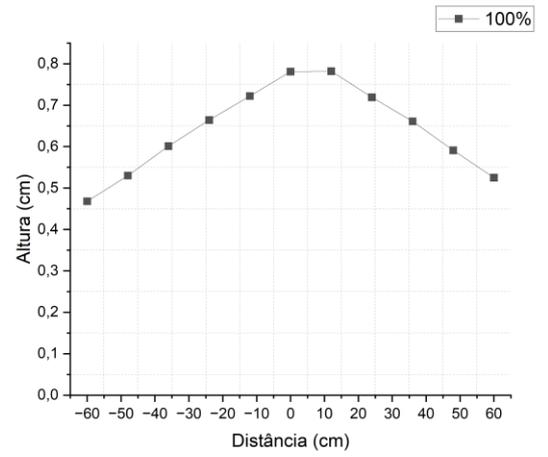
5.6.2 Condição 2 - Simulação com as saídas de uma lateral aberta

O resultado segue a mesma tendência que o ensaio 2 do silo 1:120 (Figura 55), evidenciando uma acentuada assimetria no processo de descarregamento, causada pelo volume dos taludes formados pelos canais de fluxo gerados durante a operação, conforme ilustrado na Figura 60. Diferentemente do verificado na condição 1, a segunda condição apresenta um acúmulo mais expressivo de produto estacionado, o que contribui para um aumento relevante da pressão exercida sobre as paredes laterais. Esse fenômeno é evidenciado nas etapas que se sucedem, que mostram que, mesmo com apenas 20% da carga total, o silo já possui um ângulo de canal de fluxo médio de $32,51^\circ$, sendo que o maior talude se formou na parede à esquerda do silo.

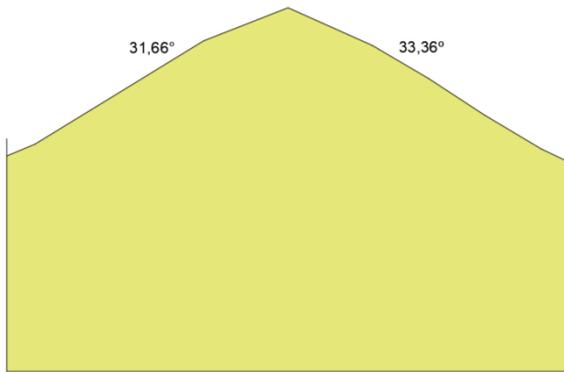
Figura 55 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos $\phi_{r,d}$ (c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e d_r (f), com carga total à 100% do produto armazenado.



(a)



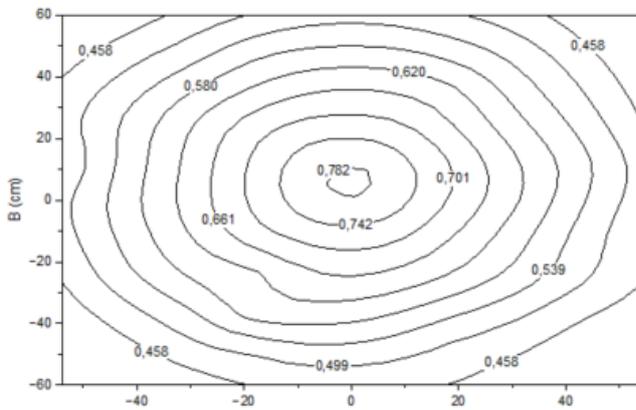
(b)



(c)



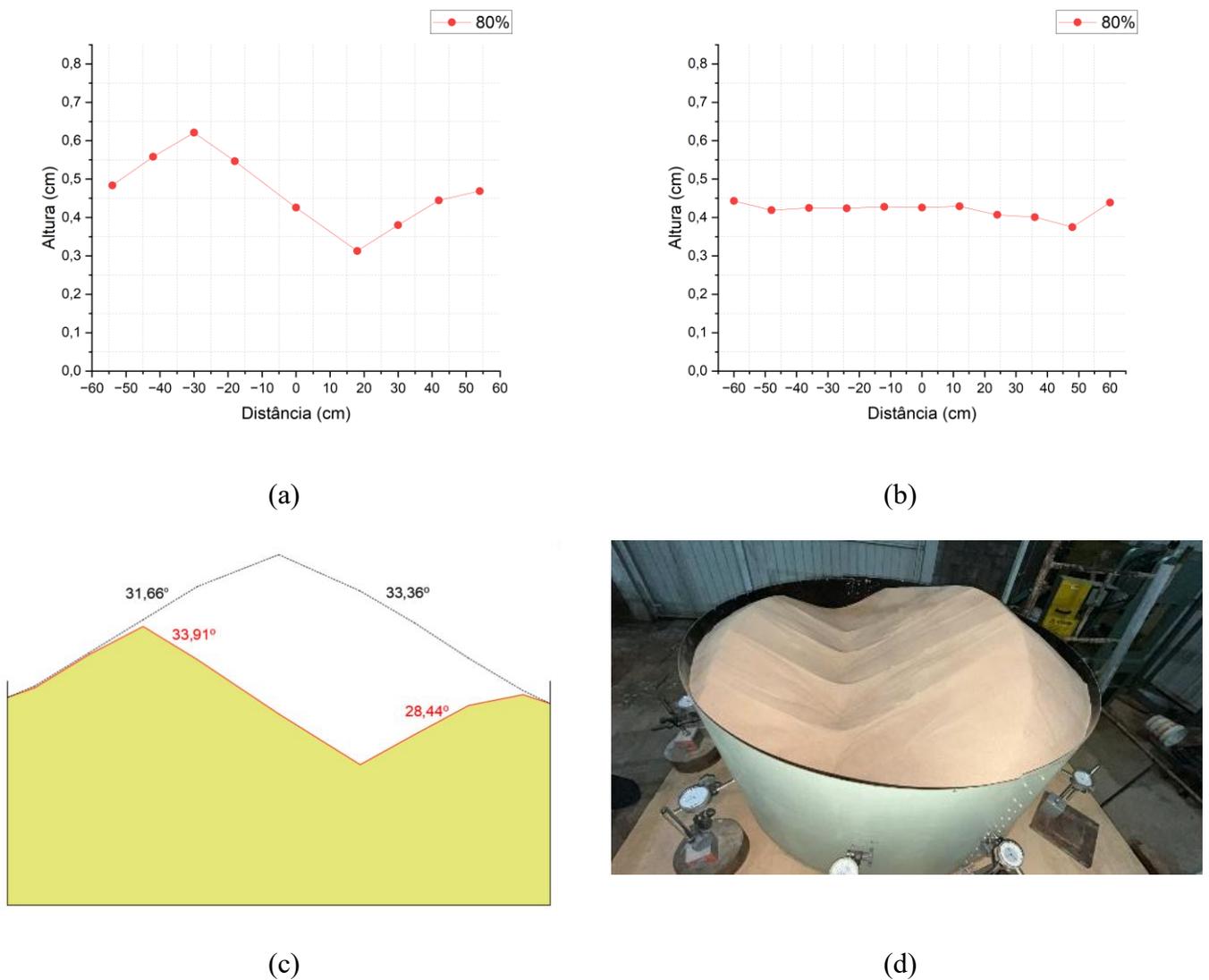
(d)

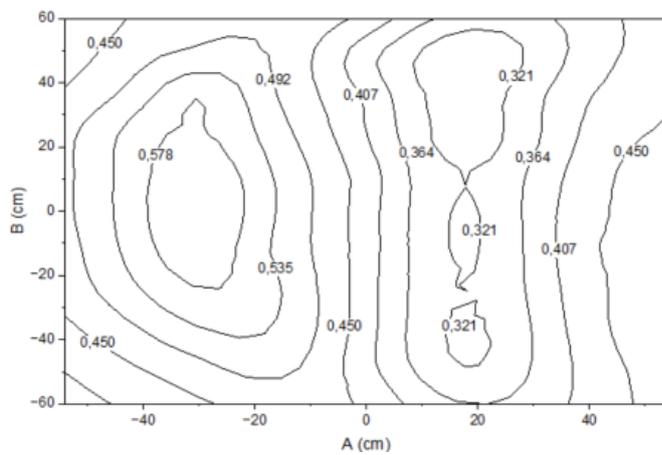


(e)

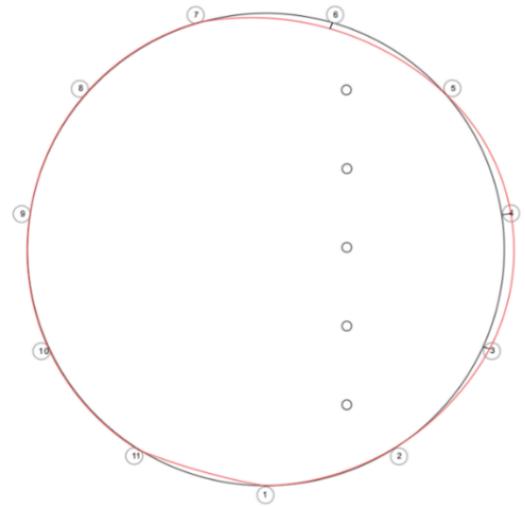
Quando o silo atinge os 80% de carga (Figura 56), contém uma massa de 971,856 kg distribuídos, e percebe-se que o primeiro descarregamento apresenta evidente assimetria na direção da saída. O ângulo médio do canal de fluxo obtido entre ambas as superfícies alinhadas com as saídas foi respectivamente de $30,17^\circ$, com uma altura máxima de 62,1cm. Com relação aos deslocamentos obtidos por relógio medidor, observa-se que o relógio 6 marcou o maior valor negativo (recoo da parede) com -0,135mm e o relógio 9 marcou o maior valor positivo de 0,287mm (avanço da parede) (Tabela 4).

Figura 56 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos $\phi_{r,d}$ (c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e d_r (f), com carga total à 80% do produto armazenado.





(e)

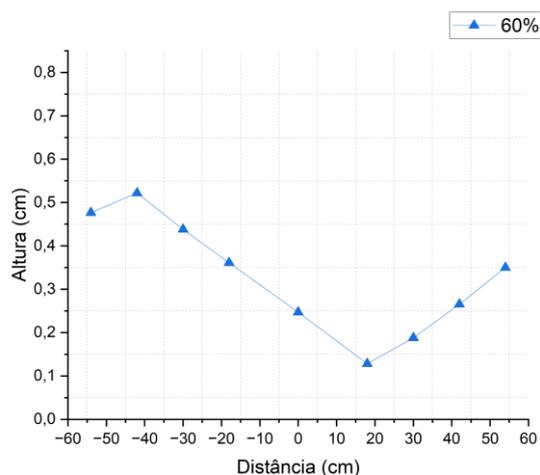


(f)

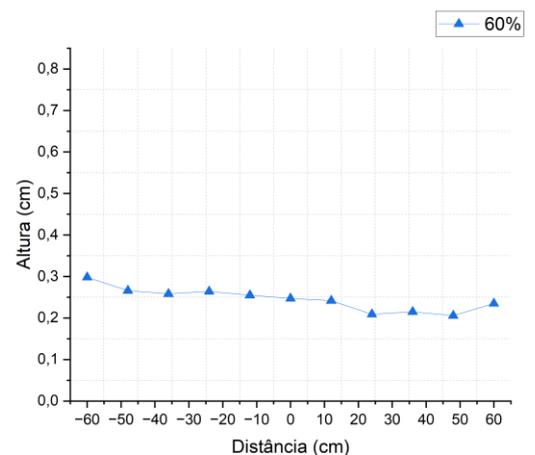
Fonte: O autor

Ao atingir 60% de carga (Figura 57), nota-se a acentuação de maior parte do produto à esquerda do canal de saída, com cerca de 728,892 kg assimetricamente distribuídos, o ângulo médio do canal de fluxo obtido entre ambas as superfícies alinhadas com as saídas foi respectivamente de 34° , com uma altura máxima de 52,4cm. Com relação aos deslocamentos obtidos por relógio medidor, observa-se que o relógio 6 marcou o maior valor negativo (reco da parede) com -0,323 e o relógio 4 marcou o maior valor positivo de 0,397mm (avanço da parede) (Tabela 4).

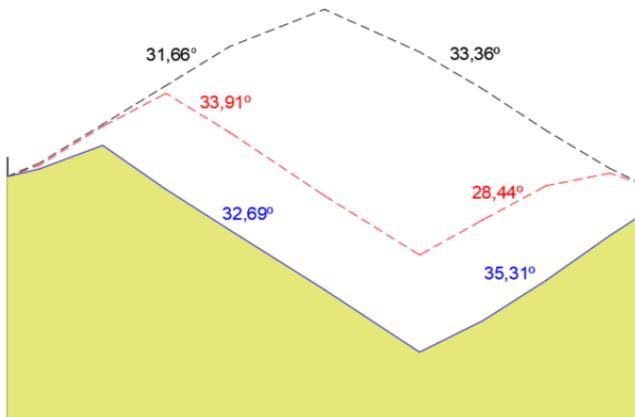
Figura 57 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos $\phi_{r,d}$ (c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e d_r (f), com carga total à 60% do produto armazenado.



(a)



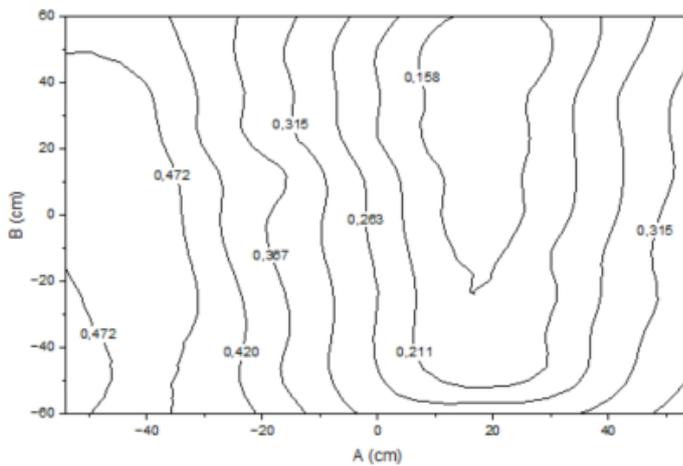
(b)



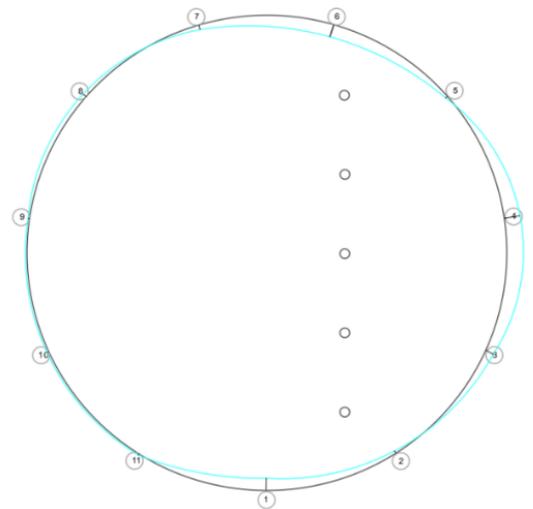
(c)



(d)



(e)



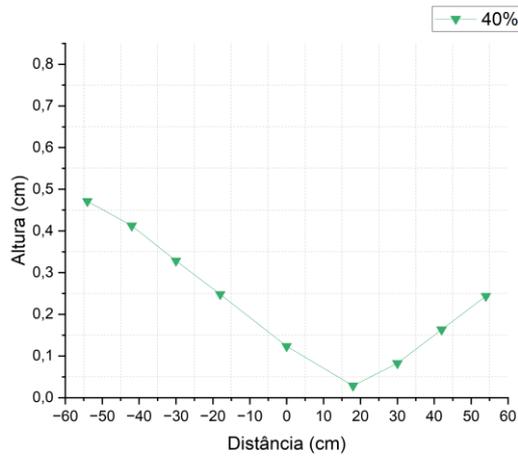
(f)

Fonte: O autor

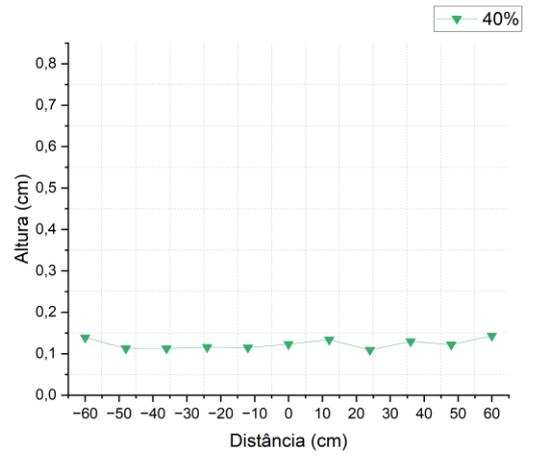
Quando o silo atinge 40% de carga (Figura 58), contém uma massa de 485,928 kg distribuídos, e percebe-se que a assimetria do descarregamento continua no terceiro estágio.

O ângulo médio do canal de fluxo obtido entre ambas as superfícies alinhadas com as saídas foi respectivamente de 34,23° com uma altura máxima de 47,1cm. Com relação aos deslocamentos obtidos por relógio medidor, observa-se que o relógio 1 marcou o maior valor negativo (reco da parede) com -1,113mm e o relógio 4 marcou o maior valor positivo de 0,447mm (avanço da parede) (Tabela 4).

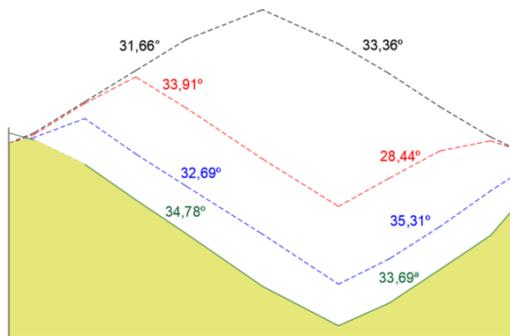
Figura 58 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos $\phi_{r,d}$ (c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e d_r (f), com carga total à 40% do produto armazenado.



(a)



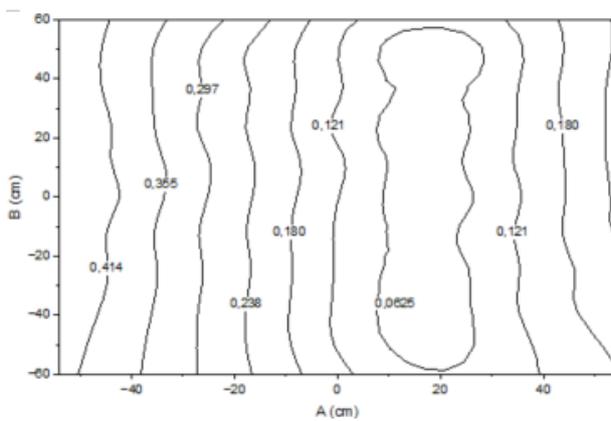
(b)



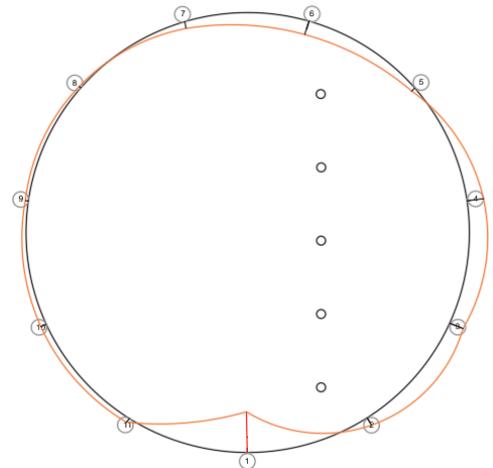
(c)



(d)



(e)

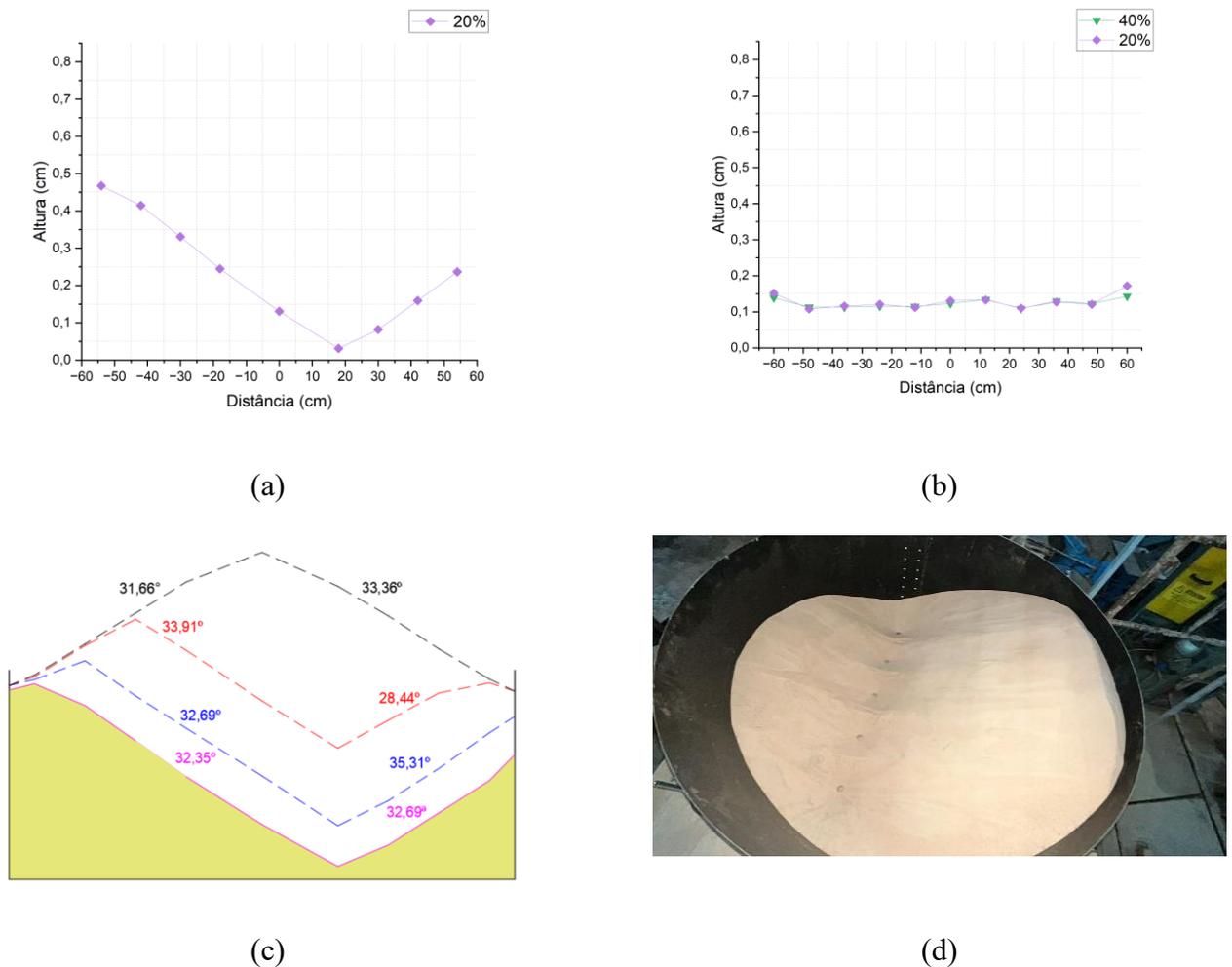


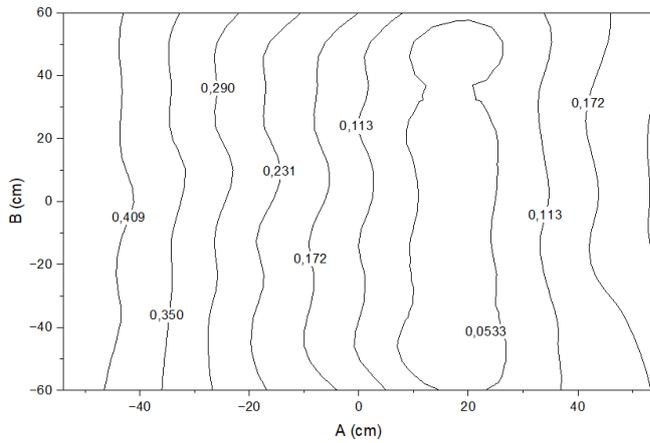
(f)

Fonte: O autor

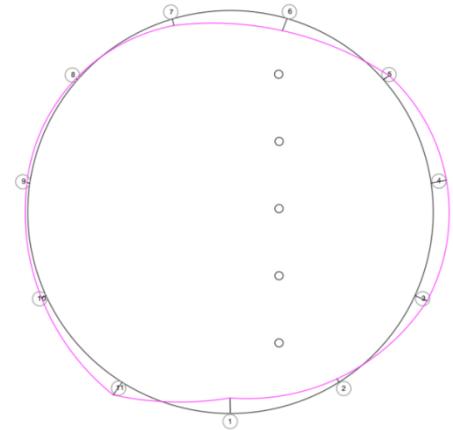
Evidencia-se que esta configuração apresenta um grande volume de acúmulo de massa, devido ao fato de que quando o silo atinge 20% de carga, contém uma massa de 242,964 kg de massa retida, referente proveniente da formação assimétrica do produto, tendo seu fluxo livre interrompido, e entrando na zona estagnada. O ângulo médio do canal de fluxo obtido entre ambas as superfícies alinhadas com as saídas foi respectivamente de $32,52^\circ$ com uma altura máxima de 46,7cm (Figura 59). Com relação aos deslocamentos obtidos por relógio medidor, observa-se que o relógio 1 marcou o maior valor negativo (recoo da parede) com -0,470mm e o relógio 11 marcou o maior valor positivo de 0,460mm (avanço da parede) (Tabela 4).

Figura 59 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos $\phi_{r,d}$ (c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e d_r (f), com carga total à 20% do produto armazenado.





(e)



(f)

Fonte: O autor.

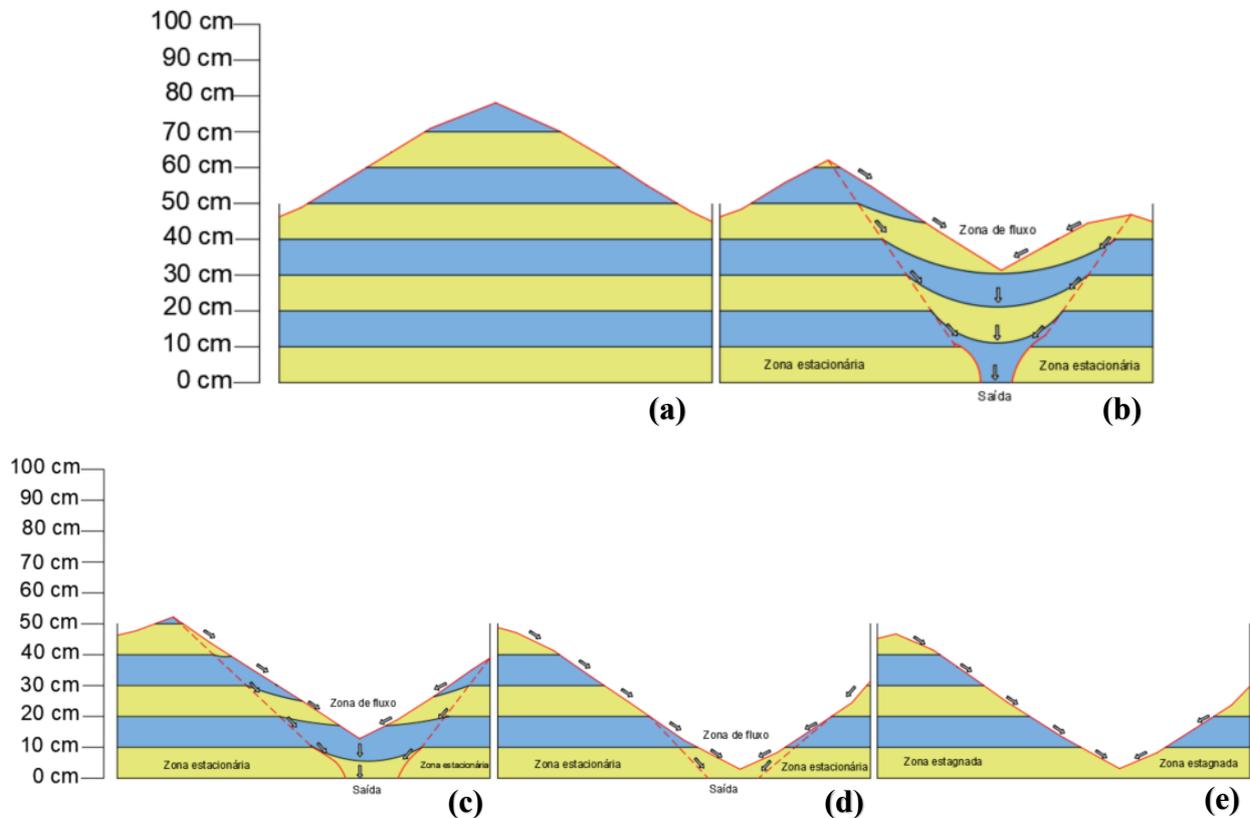
Tabela 4 – Deslocamento dos relógios do ensaio 2.

		Deslocamento Radial (mm) *				
		Volume de carga (%)				
		100	80	60	40	20
RELÓGIOS MEDIDORES	1	0	0,010	-0,310	-1,113	-0,470
	2	0	-0,010	-0,073	0,247	-0,123
	3	0	0,173	0,213	0,390	0,390
	4	0	0,233	0,397	0,447	0,457
	5	0	-0,003	-0,050	-0,117	0,210
	6	0	-0,167	-0,323	-0,383	-0,393
	7	0	0,013	-0,120	-0,190	-0,200
	8	0	0,017	0,100	0,060	0,057
	9	0	-0,003	0,037	0,083	0,087
	10	0	0,020	0,050	0,157	0,150
	11	0	0,010	0,037	0,130	0,460

* d_r Positivo pela convenção de sinais conforme a Figura 31

Fonte: O autor.

Figura 60 – Representação da evolução do fluxo no processo de descarregamento entre as zonas de limites: (a) Descarregamento em 80 % (b) Descarregamento em 60 %, (c) Descarregamento em 40 %, (d) Descarregamento em 20 %.

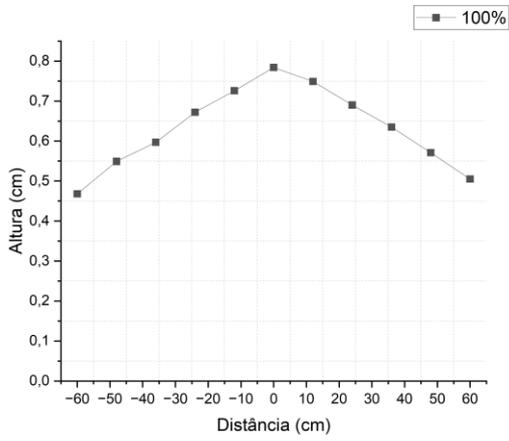


Fonte: O autor.

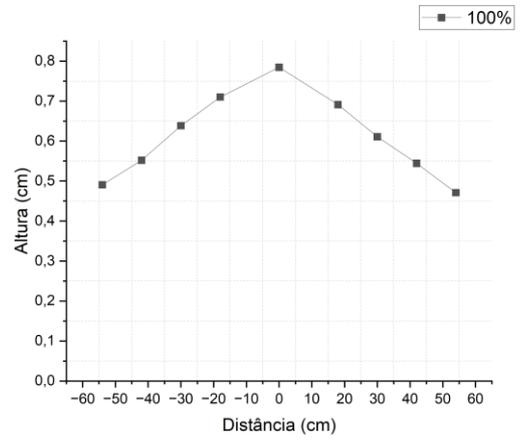
5.6.3 Condição 3 - Simulação com as saídas inferiores abertas

De forma geral, o cenário 3 apresentou formação precoce de taludes e interrupção do fluxo durante o descarregamento, com acúmulo crescente de produto e escoamento fortemente assimétrico (maior acúmulo à direita) (Figura 65). Esse comportamento elevou as pressões laterais, gerando picos de deslocamento nas paredes (recuos e avanços relevantes) e maior risco de descarga excêntrica, comportamento semelhante ao ensaio em escala 1:120, porém com mais produto estagnado (Figura 61).

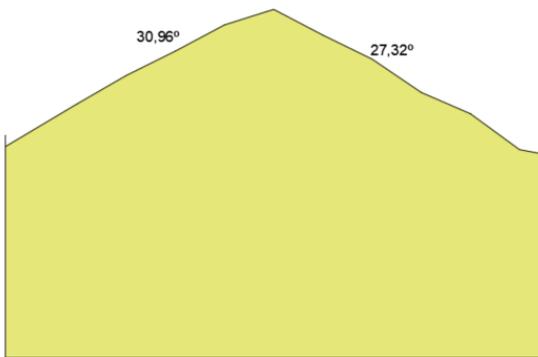
Figura 61 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos $\phi_{r,d}$ (c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e d_r (f), com carga total à 100% do produto armazenado.



(a)



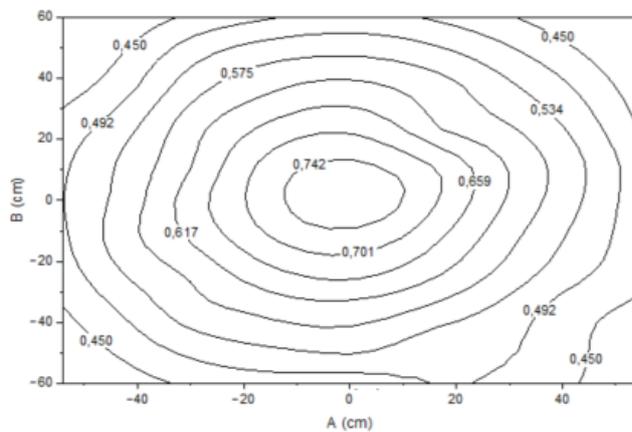
(b)



(c)



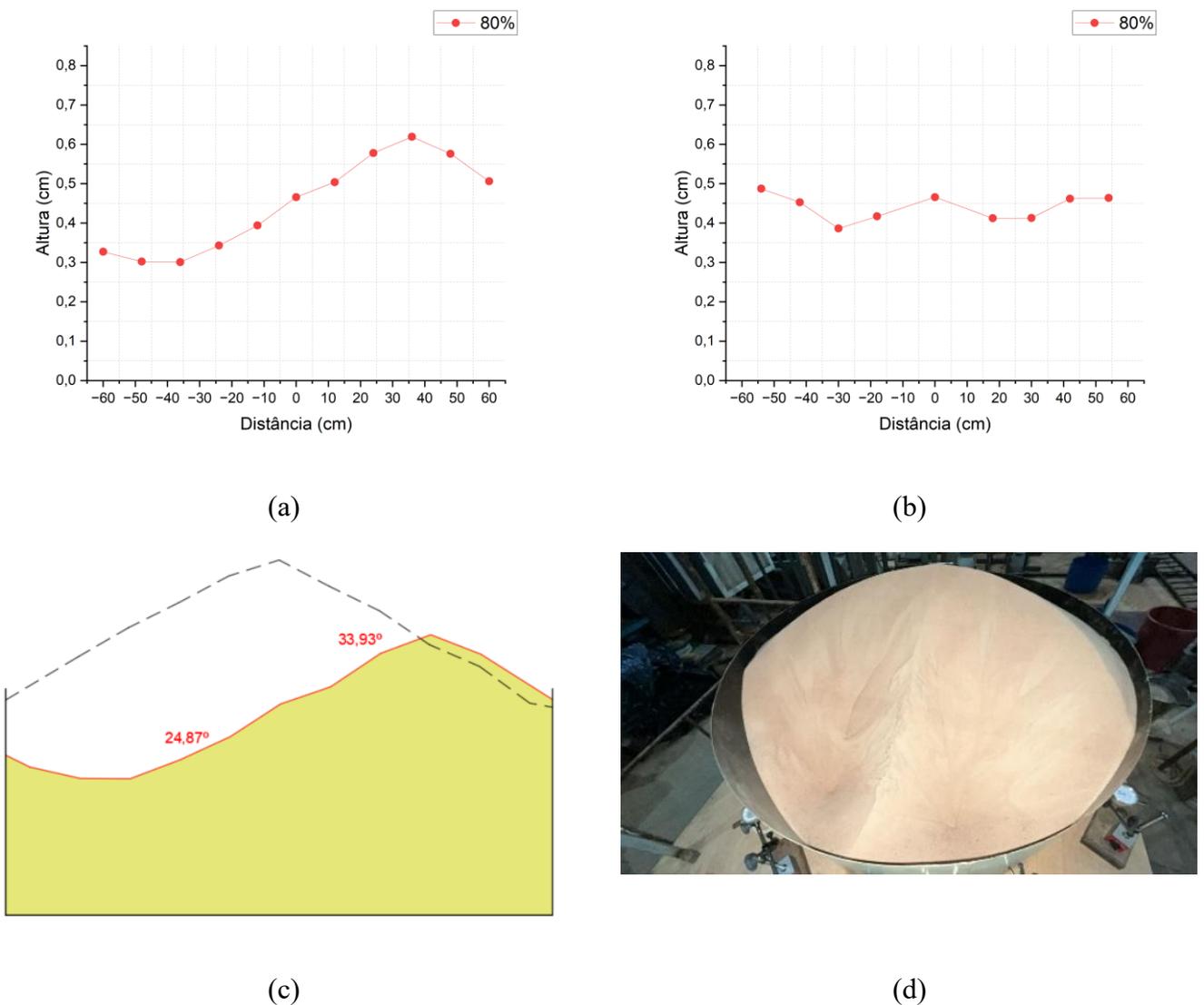
(d)

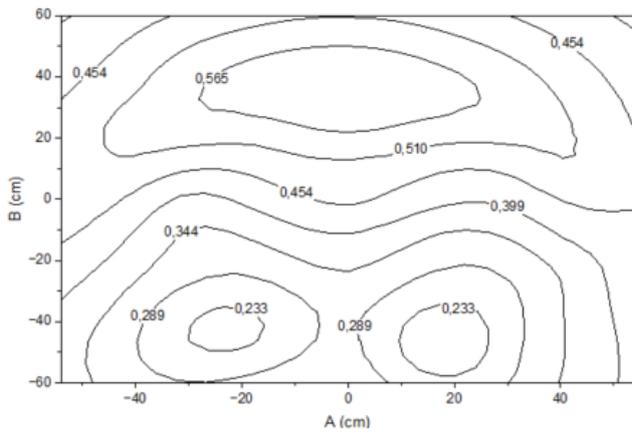


(e)

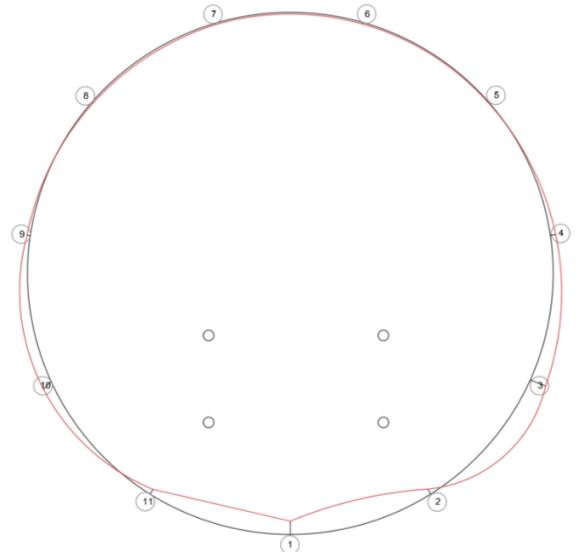
Quando o silo atinge os 80% (Figura 62) de carga, contém uma massa de 971,856 kg distribuídos, e percebe-se que o primeiro descarregamento apresenta assimetria acentuada entre as linhas de saída. O ângulo médio do canal de fluxo obtido entre ambas as superfícies alinhadas com as saídas foi respectivamente de $29,4^\circ$, com uma altura máxima de 61,9cm. Com relação aos deslocamentos obtidos por relógio medidor, observa-se que o relógio 1 marcou o maior valor negativo (recoo da parede) com $-0,303\text{mm}$ e o relógio 3 marcou o maior valor positivo de $0,377\text{mm}$ (avanço da parede) (Tabela 5).

Figura 62 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos $\phi_{r,d}$ (c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e d_r (f), com carga total à 80% do produto armazenado.





(e)

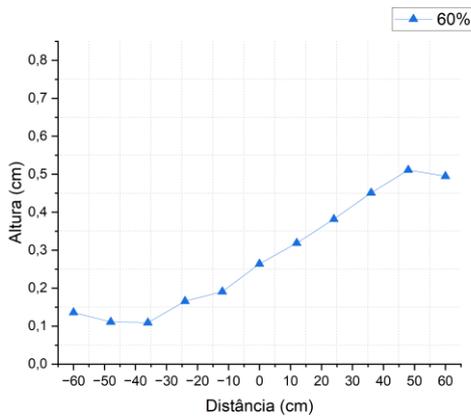


(f)

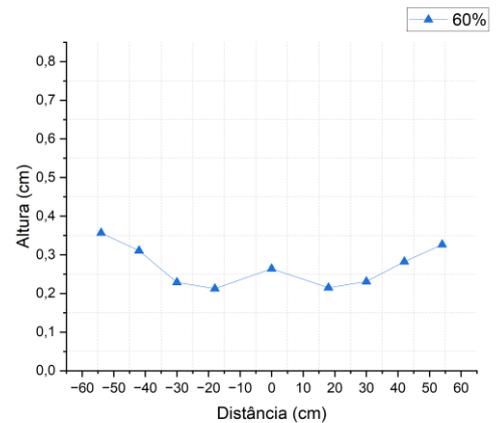
Fonte: O autor

Quando o silo atinge os 60% de carga (Figura 63), contém uma massa de 819,532 kg distribuídos, torna-se nítida a formação de talude proveniente do produto estagnado, com ângulo médio do canal de fluxo respectivamente de 30,48°, com uma altura máxima de 51,1cm. Com relação aos deslocamentos obtidos por relógio medidor, observa-se que o relógio 1 marcou o maior valor negativo (recoo da parede) com -0,773mm e o relógio 3 marcou o maior valor positivo de 0,510mm (avanço da parede) (Tabela 5).

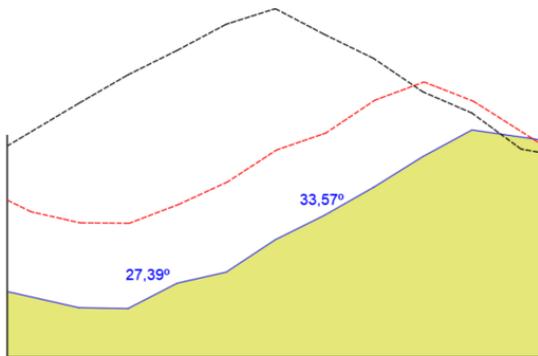
Figura 63 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos $\phi_{r,d}$ (c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e d_r (f), com carga total à 60% do produto armazenado.



(a)



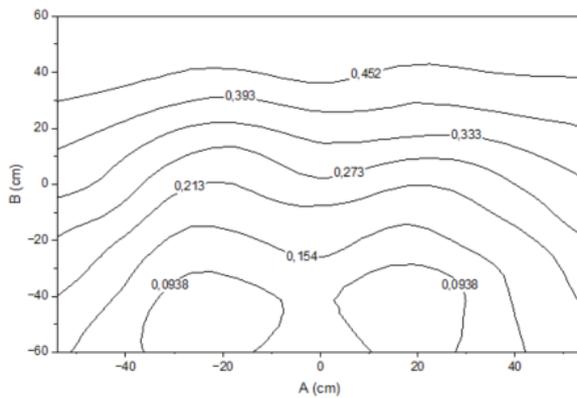
(b)



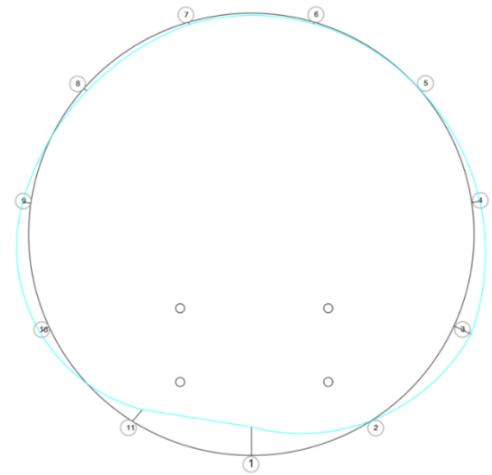
(c)



(d)



(e)

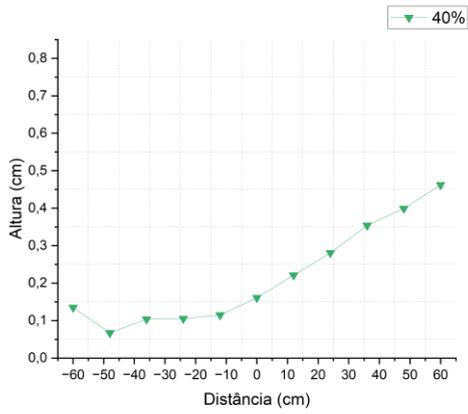


(f)

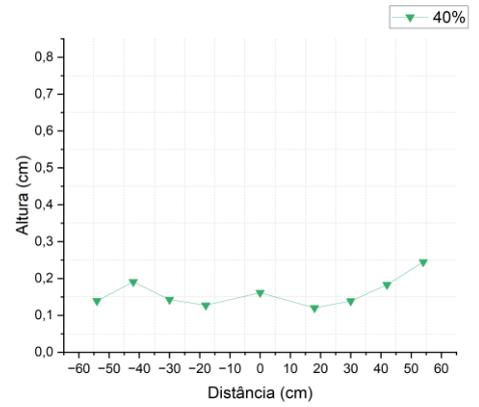
Fonte: O autor.

Aos 40% de carga (Figura 64), contém uma massa de 594,208 kg distribuídos, torna-se nítida a formação de talude proveniente do produto estagnado, com ângulo médio do canal de fluxo respectivamente de 28,13°, com uma altura máxima de 46,2cm. Com relação aos deslocamentos obtidos por relógio medidor, observa-se que o relógio 1 marcou o maior valor negativo (recoo da parede) com -0,773mm e o relógio 3 marcou o maior valor positivo de 0,510mm (avanço da parede) (Tabela 5).

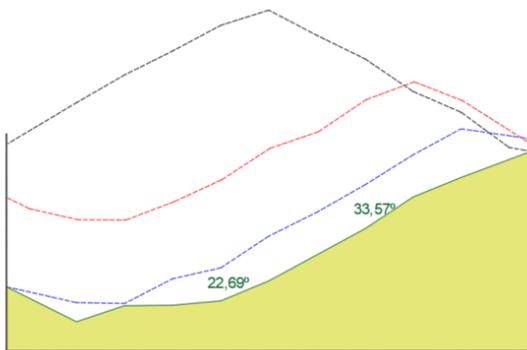
Figura 64 - Gráfico das alturas com vista frontal (a) e lateral (b); ângulos $\phi_{r,d}$ (c); vista aérea do silo (d); curva de nível (e); e d_r (f), com carga total à 40% do produto armazenado.



(a)



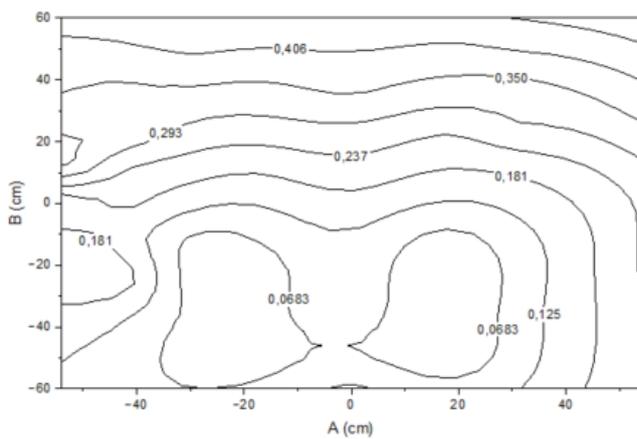
(b)



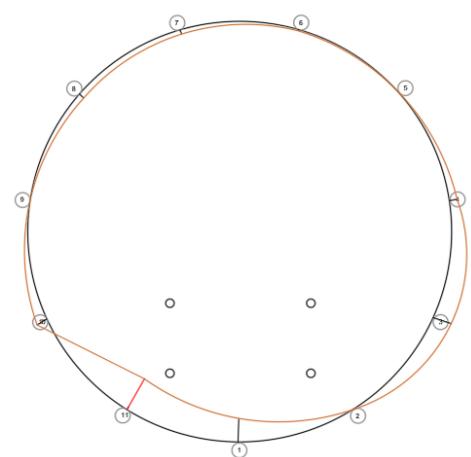
(c)



(d)



(e)



(f)

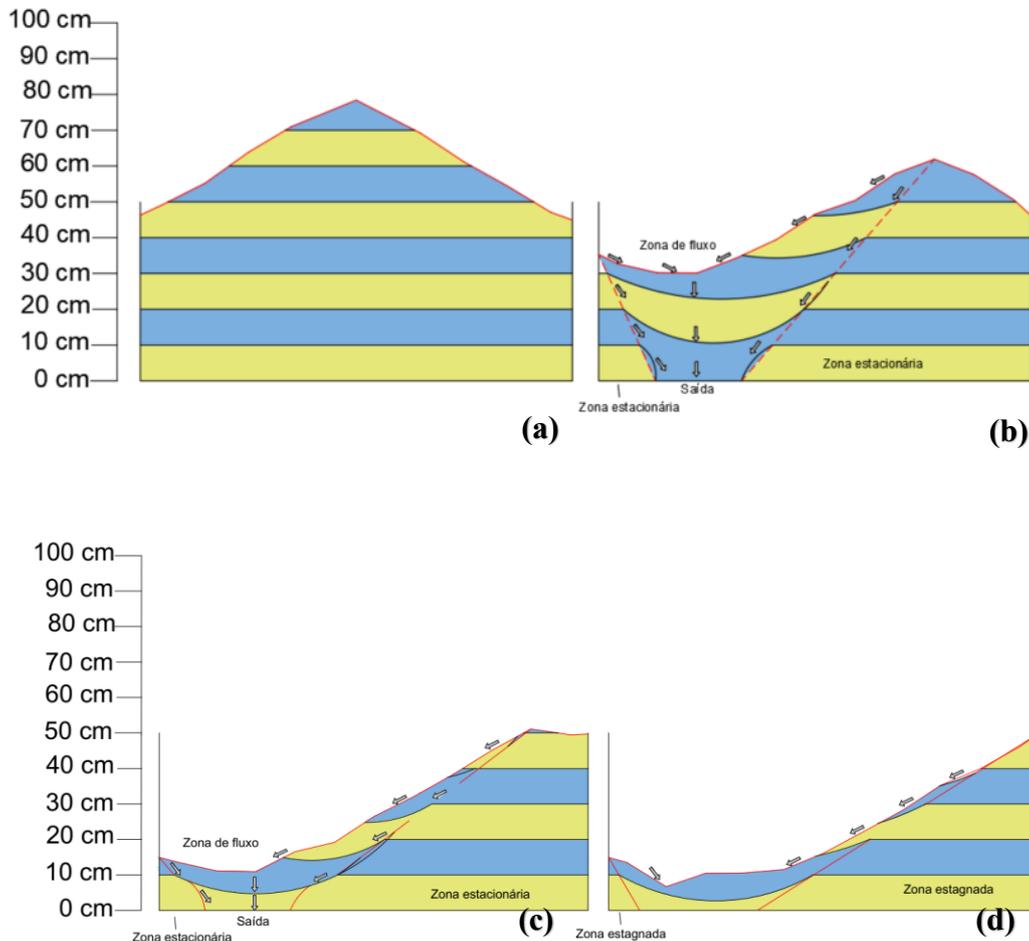
Fonte: O autor.

Tabela 5 – Deslocamento dos relógios do ensaio 3.

		Deslocamento Radial (mm) *				
		Volume de carga (%)				
		100	80	60	40	20
RELÓGIOS MEDIDORES	1	0	-0,303	-0,773	-0,663	-
	2	0	-0,133	0,050	0,007	-
	3	0	0,377	0,510	0,540	-
	4	0	0,123	0,223	0,223	-
	5	0	-0,017	0,003	0,007	-
	6	0	-0,037	-0,047	-0,037	-
	7	0	-0,037	-0,063	-0,130	-
	8	0	-0,033	-0,103	-0,167	-
	9	0	0,073	0,220	0,040	-
	10	0	0,247	0,287	0,327	-
	11	0	-0,130	-0,417	-1,010	-
* d_r , Positivo pela convenção de sinais conforme a Figura 31						

Fonte: O autor.

Figura 65 – Representação da evolução do fluxo no processo de descarregamento entre as zonas de limites: (a) Descarregamento em 80 % (b) Descarregamento em 60 %, (c) Descarregamento em 40 %, (d) Produto estagnado.



Fonte: O autor.

5.7 Aplicação da teoria de Coulomb – Uma análise do empuxo ativo máximo, das pressões máximas e do coeficiente de empuxo do modelo 1:50

O comportamento estrutural de silos durante o descarregamento de grãos ou outros produtos é fortemente influenciado pela distribuição dos esforços laterais e pela configuração geométrica do produto armazenado. A presença de taludes acentuados, assim como descargas parciais ou assimétricas, pode gerar concentrações significativas de pressão e empuxo em pontos específicos da parede, podendo alterar a concepção inicial de carregamento previsto no projeto.

Neste estudo foi elaborada uma análise das pressões, empuxo ativo e coeficiente de empuxo ativo e dos três cenários, nos estágios de 80% e 40% da carga total a fim de comparar e analisar de forma analítica o momento e o local onde o empuxo ativo é máximo entre os quadrantes de cada estágio e cenário. A análise foi elaborada dividindo a circunferência do silo em 8 quadrantes, com ângulo de 45° para cada fatia, utilizando as coordenadas propostas na Figura 31.

O objetivo é oferecer uma visão integrada dos resultados, destacando as implicações práticas para a prevenção de descarregamentos excêntricos e a consequente redução de riscos estruturais em silos.

5.7.1 Condição 1 – Variações em 80%

Os empuxos ativos E_a variam aproximadamente entre 0,19 kN/m e 0,59 kN/m, com picos concentrados (Tabela 6) nas regiões onde os taludes são maiores (lado esquerdo), indicando maior esforço lateral nesses quadrantes (Figura 66).

As pressões p_h situam-se na faixa de 0,98 kN/m² a 2,62kN/m², atingindo o valor máximo nas proximidades dos taludes mais acentuados no quadrante G (coordenadas H-1). O coeficiente de empuxo K_a apresenta variação aproximada entre 0,17 e 0,40, com os maiores K_a coincidindo com as mesmas regiões de acumulação.

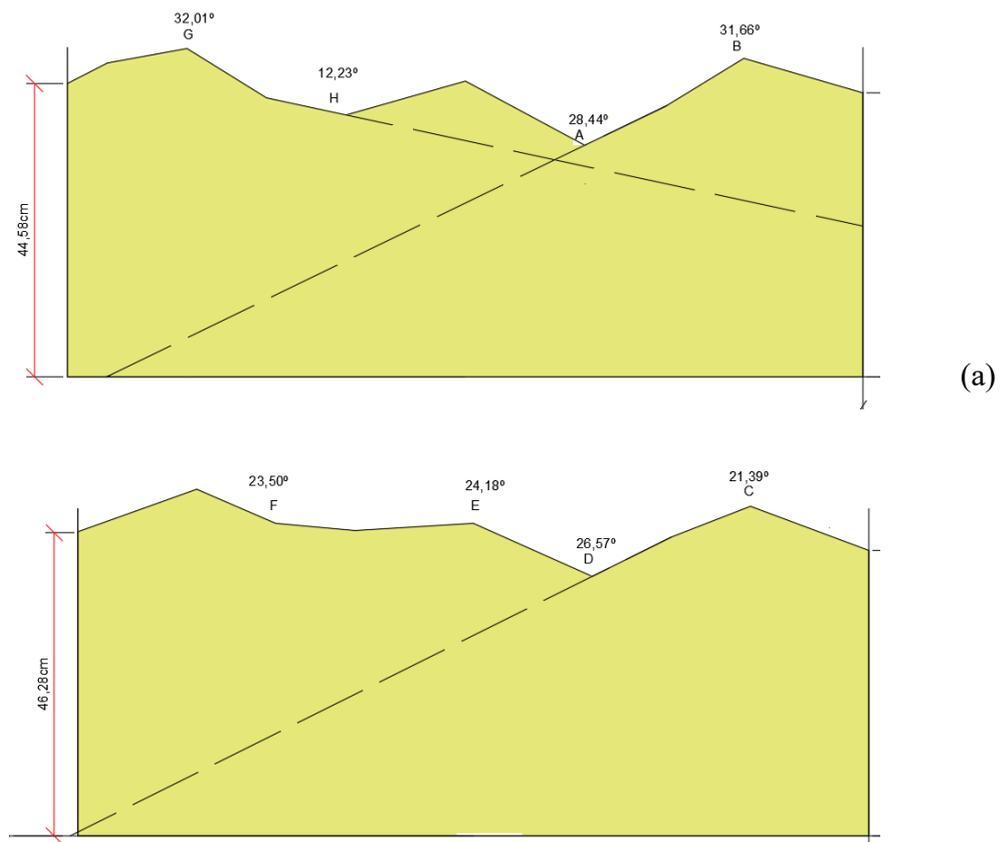
Em resumo, os maiores E_a , p_h e K_a concentram-se nas parcelas do perímetro onde o produto estagnou e formou taludes (onde há assimetria), o que explica os picos de deslocamento das paredes e o aumento de pressões laterais (Figura 67).

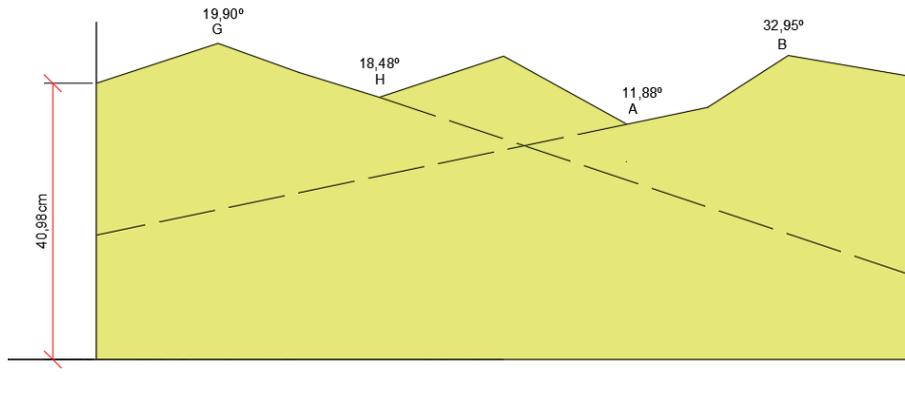
Tabela 6 – Alturas obtidas em leitura no cenário 1 a 80% da carga total (cm).

K	0	0	0	0,388	0,432	0,346	0	0	0
J	0	0	0,391	0,349	0,414	0,344	0,355	0	0
I	0	0,469	0,426	0,389	0,450	0,349	0,374	0,451	0
H	0,477	0,499	0,424	0,398	0,453	0,352	0,410	0,484	0,449
G	0,472	0,522	0,472	0,440	0,500	0,399	0,442	0,503	0,454
F	0,487	0,534	0,489	0,444	0,532	0,395	0,447	0,512	0,451
E	0,487	0,529	0,477	0,466	0,477	0,396	0,456	0,503	0,458
D	0,473	0,511	0,479	0,453	0,488	0,386	0,445	0,484	0,445
C	0	0,474	0,433	0,439	0,483	0,402	0,431	0,452	0
B	0	0	0,426	0,419	0,476	0,383	0,427	0	0
A	0	0	0	0,444	0,452	0,421	0	0	0
	0	1	2	3	4	5	6	7	8

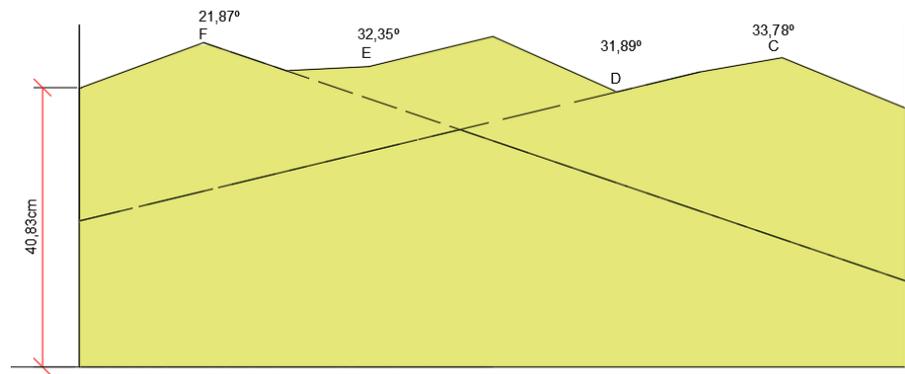
Fonte: O autor.

Figura 66 – Ângulos obtidos em leitura no cenário 1 a 80% da carga total.



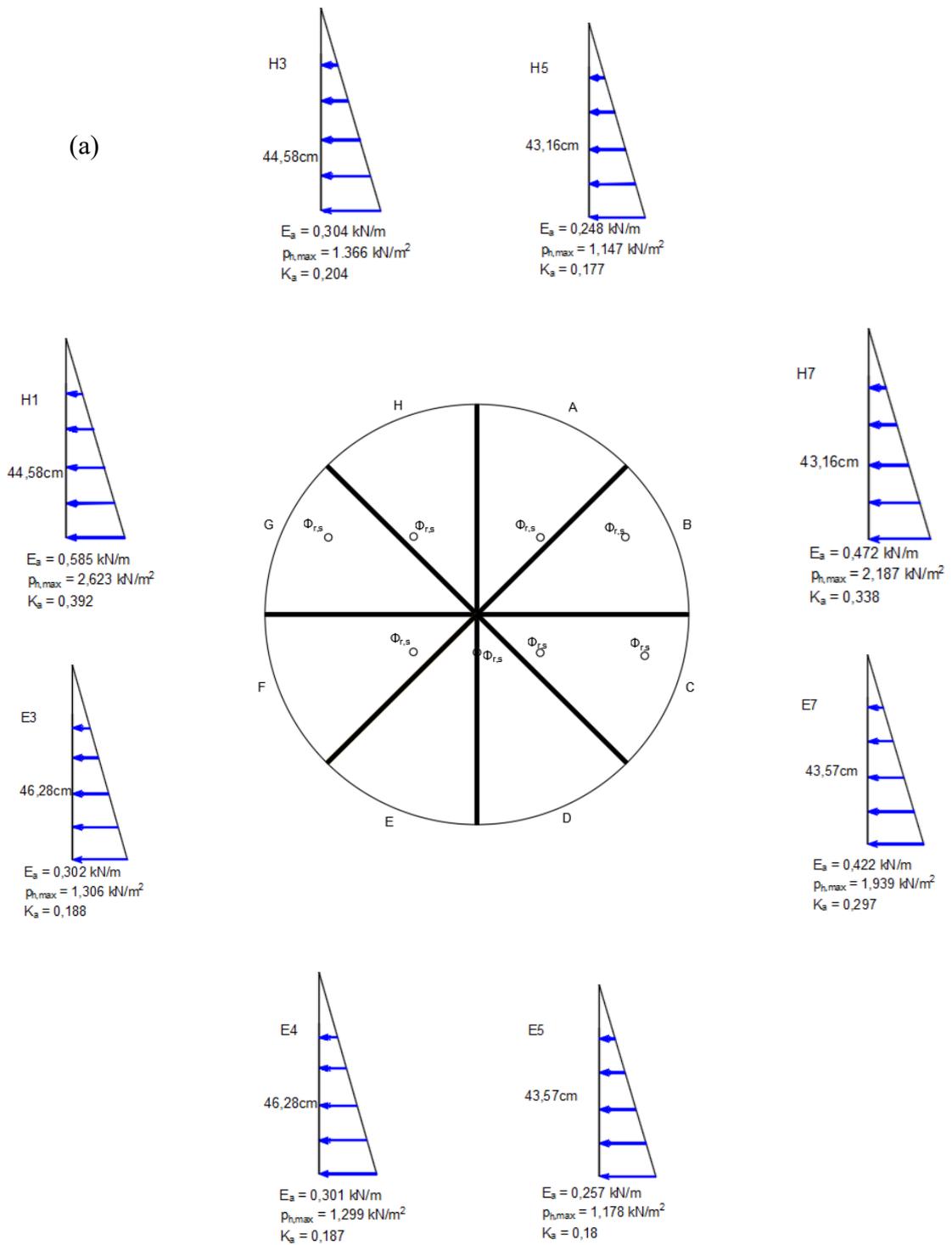


(b)

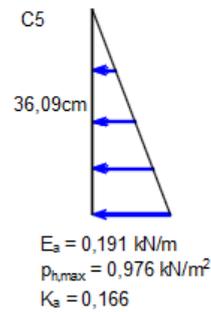
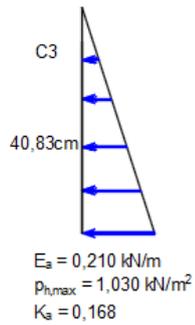
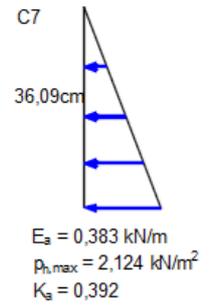
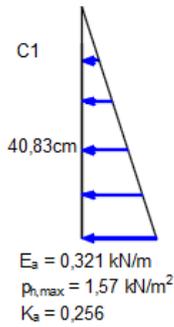
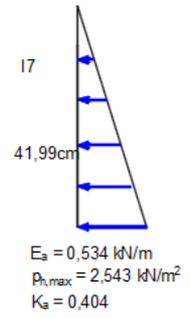
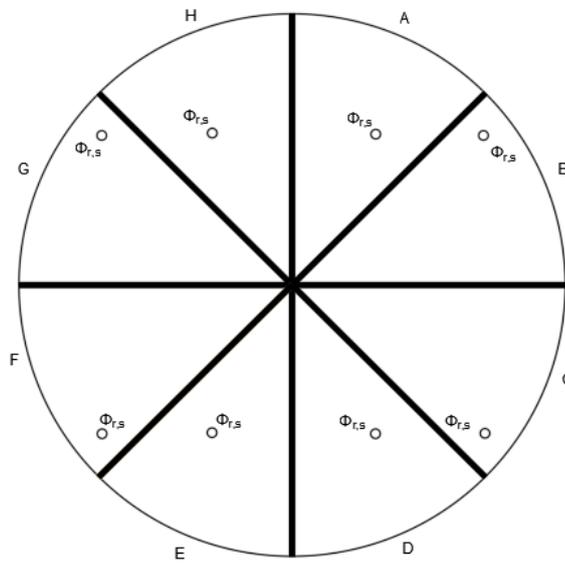
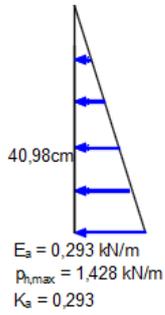
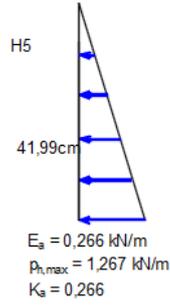
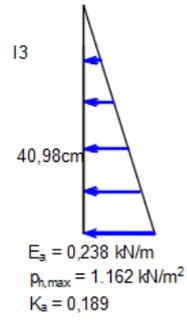


Fonte: O autor.

Figura 67 – Resultados do cálculo da pilha inclinada com talude simples e duplo talude no cenário 1 a 80% da carga total.



(b)



Fonte: O autor.

5.7.2 Condição 1 – Variações em 40%

Comparando o volume de carga anterior (80%) com o atual (40%), todos os indicadores reduzem para a metade, pois o empuxo ativo máximo (E_a) reduziu de $0,585 \text{ kN/m}$ para $0,283 \text{ kN/m}$ (51,62%), a pressão máxima de $2,623 \text{ kN/m}^2$ para $1,223 \text{ kN/m}^2$ (53%) e o coeficiente K_a de 0,392 para 0,189 (52%) (Figura 69) (Tabela 7).

Além da redução absoluta, as distribuições ficaram mais homogêneas (Figura 68) no caso de 40% (faixas menores e menos picos localizados), indicando menor concentração de esforços laterais e menor tendência a deslocamentos extremos observados no volume maior.

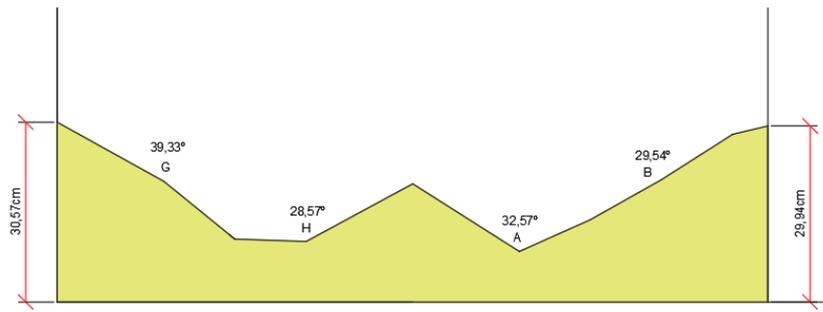
Reduzir o volume para 40% diminui significativamente pressões e empuxos e atenua a assimetria, mas ainda há formação de taludes e pontos críticos portanto manter monitoramento focalizado nos quadrantes com maiores valores e revisar geometria/acionamento das saídas continua recomendado.

Tabela 7 – Alturas obtidas em leitura no cenário 1 a 40% da carga total (cm).

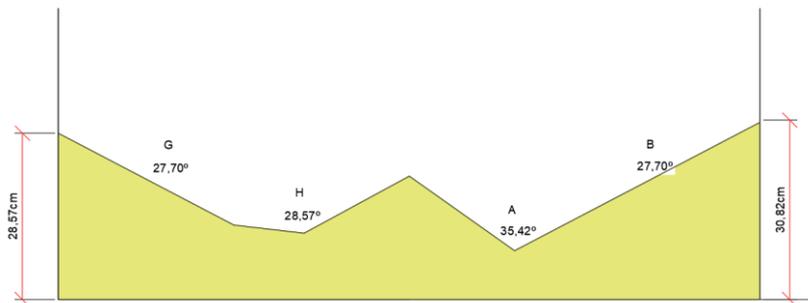
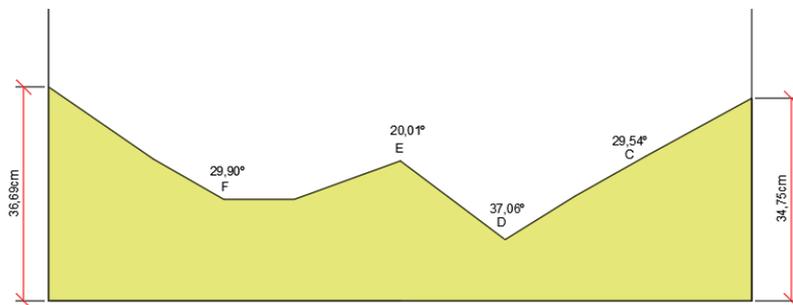
K	0	0	0	0,137	0,176	0,121	0	0	0
J	0	0	0,100	0,064	0,156	0,058	0,115	0	0
I	0	0,191	0,128	0,114	0,212	0,084	0,147	0,210	0
H	0,272	0,205	0,107	0,103	0,201	0,086	0,140	0,208	0,285
G	0,303	0,224	0,146	0,126	0,264	0,100	0,142	0,215	0,259
F	0,314	0,230	0,156	0,143	0,256	0,097	0,156	0,226	0,300
E	0,326	0,243	0,174	0,173	0,240	0,105	0,180	0,248	0,314
D	0,343	0,268	0,182	0,161	0,236	0,117	0,185	0,250	0,298
C	0	0,266	0,190	0,179	0,235	0,134	0,204	0,272	0
B	0	0	0,184	0,193	0,248	0,157	0,212	0	0
A	0	0	0	0,243	0,261	0,203	0	0	0
	0	1	2	3	4	5	6	7	8

Fonte: O autor.

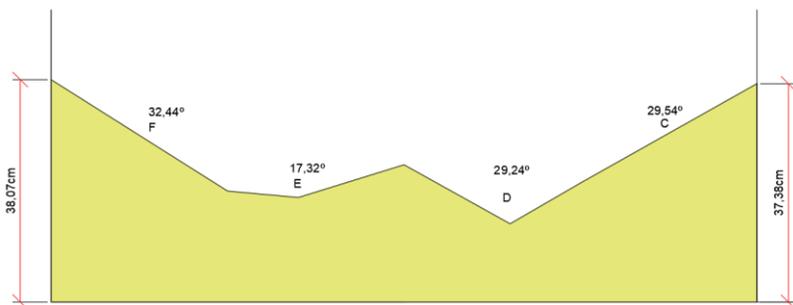
Figura 68 – Ângulos obtidos em leitura no cenário 1 a 40% da carga total.



(a)

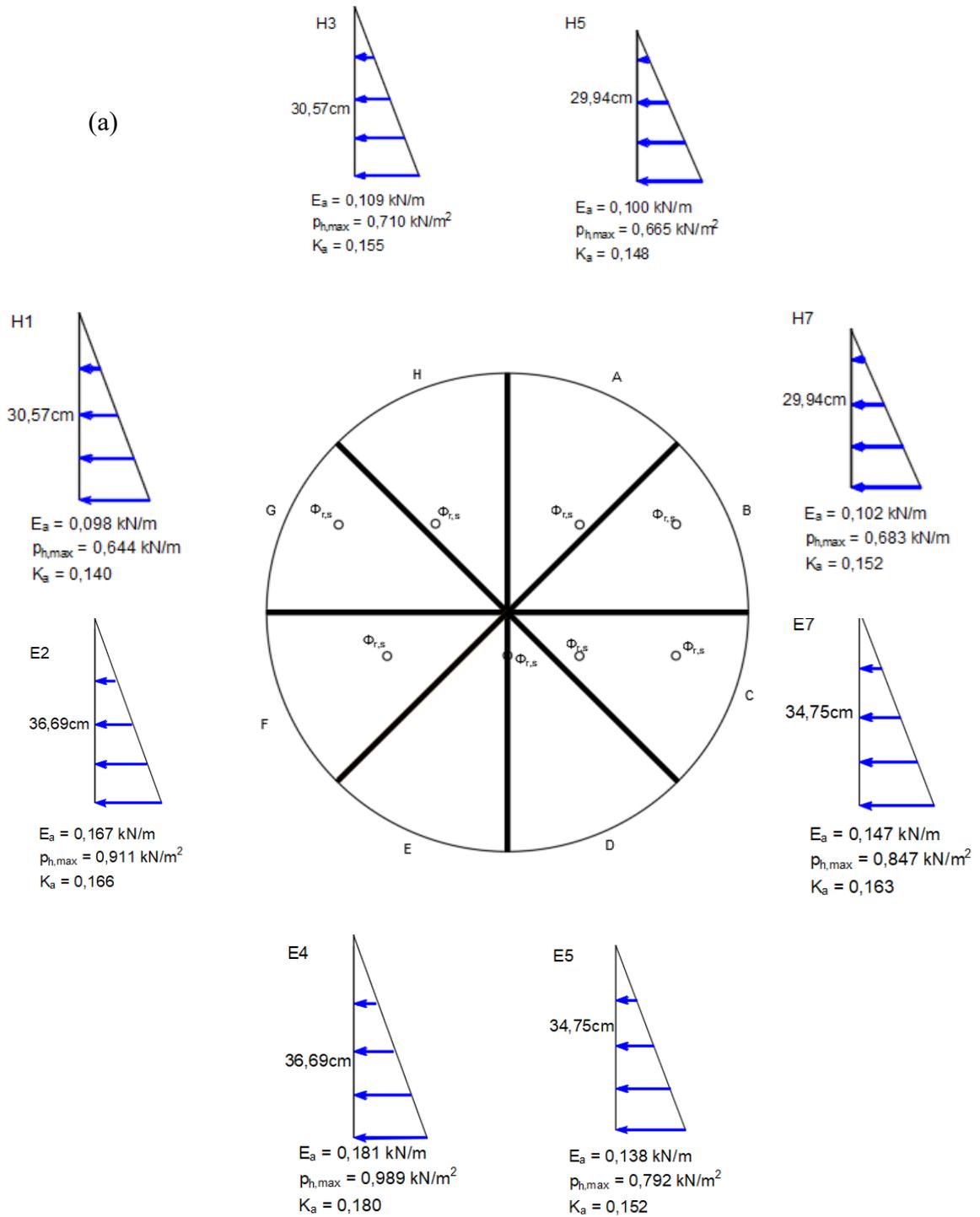


(b)

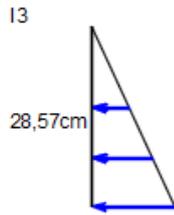


Fonte: O autor.

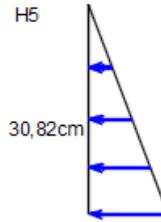
Figura 69 – Resultados do cálculo da pilha inclinada com talude simples e duplo talude no cenário 1 a 40% da carga total.



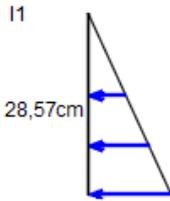
(b)



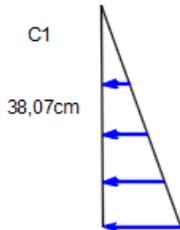
$E_a = 0,283 \text{ kN/m}$
 $p_{h,max} = 1,223 \text{ kN/m}^2$
 $K_a = 0,176$



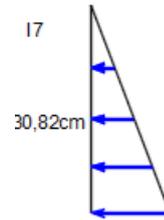
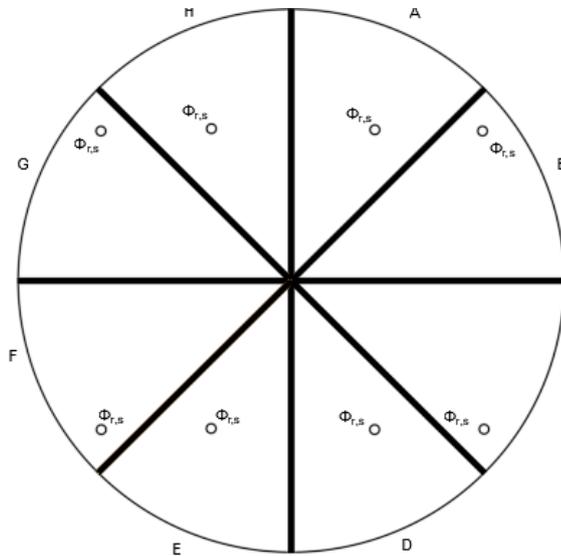
$E_a = 0,104 \text{ kN/m}$
 $p_{h,max} = 0,676 \text{ kN/m}^2$
 $K_a = 0,146$



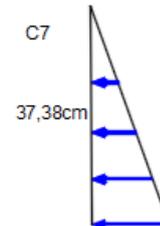
$E_a = 0,092 \text{ kN/m}$
 $p_{h,max} = 0,646 \text{ kN/m}^2$
 $K_a = 0,151$



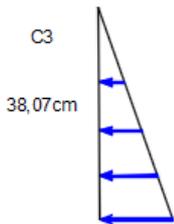
$E_a = 0,178 \text{ kN/m}$
 $p_{h,max} = 0,164 \text{ kN/m}^2$
 $K_a = 0,178$



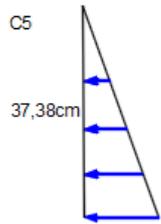
$E_a = 0,112 \text{ kN/m}$
 $p_{h,max} = 0,724 \text{ kN/m}^2$
 $K_a = 0,157$



$E_a = 0,175 \text{ kN/m}$
 $p_{h,max} = 0,937 \text{ kN/m}^2$
 $K_a = 0,167$



$E_a = 0,202 \text{ kN/m}$
 $p_{h,max} = 1,064 \text{ kN/m}^2$
 $K_a = 0,186$



$E_a = 0,176 \text{ kN/m}$
 $p_{h,max} = 0,940 \text{ kN/m}^2$
 $K_a = 0,168$

Fonte: O autor.

5.7.1 Condição 2 – Variações em 80%

A análise dessa condição evidencia que a distribuição assimétrica das pressões laterais no silo, resultante de um fluxo excêntrico do produto, gera concentrações de esforços significativas em pontos específicos da estrutura.

Esse comportamento aumenta o risco de deformações e desgaste em alguns pontos da parede do silo, além de reduzir a eficiência operacional e a capacidade útil de armazenamento num geral, pois, com 80% da carga total, os indicadores mostram esforços laterais elevados e assimetria. O empuxo ativo E_a varia entre 0,331 e 0,566 kN/m , a pressão p_h entre 1,763 e 2,444 kN/m^2 , e o coeficiente K_a entre 0,291 e 0,364.

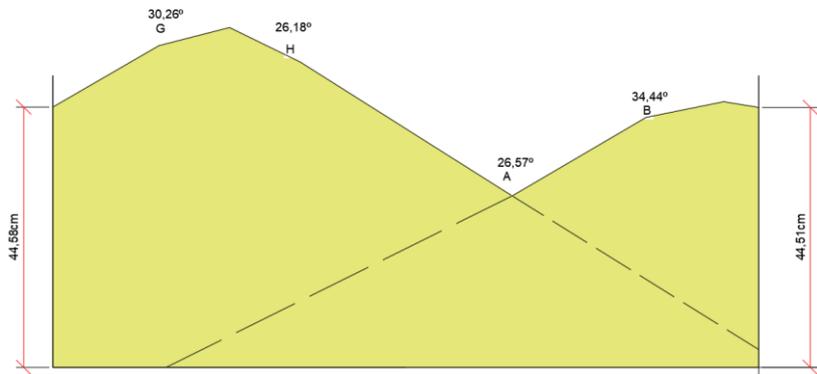
Os maiores valores concentram-se nos quadrantes (E; G) onde os taludes são mais pronunciados (lado esquerdo do silo), confirmando uma canalização do fluxo e acúmulo assimétrico, isso explica os picos de deslocamento e o aumento de pressão lateral (Figura 70 e 71) (Tabela 8).

Tabela 8 – Alturas obtidas em leitura no cenário 2 a 80% da carga total (cm).

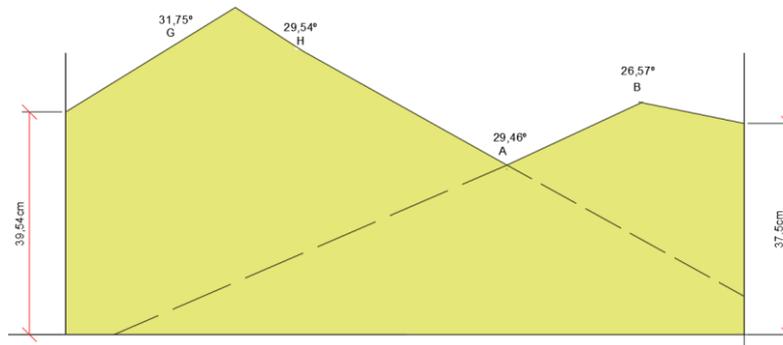
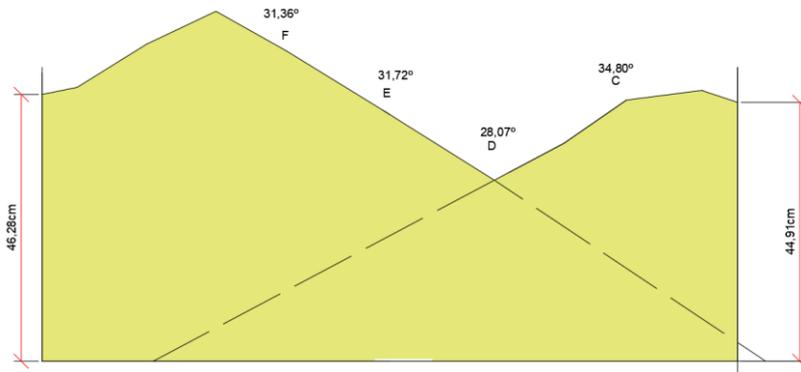
K	0	0	0	0,485	0,439	0,345	0	0	0
J	0	0	0,505	0,495	0,375	0,278	0,330	0	0
I	0	0,507	0,581	0,503	0,401	0,301	0,353	0,413	0
H	0,481	0,551	0,582	0,523	0,407	0,294	0,354	0,428	0,455
G	0,483	0,556	0,612	0,542	0,429	0,320	0,373	0,439	0,474
F	0,484	0,558	0,621	0,547	0,426	0,313	0,380	0,445	0,469
E	0,475	0,550	0,607	0,539	0,428	0,314	0,378	0,453	0,454
D	0,467	0,527	0,579	0,551	0,424	0,319	0,374	0,446	0,470
C	0	0,488	0,536	0,539	0,425	0,313	0,367	0,444	0
B	0	0	0,482	0,511	0,419	0,316	0,367	0	0
A	0	0	0	0,462	0,443	0,364	0	0	0
	0	1	2	3	4	5	6	7	8

Fonte: O autor.

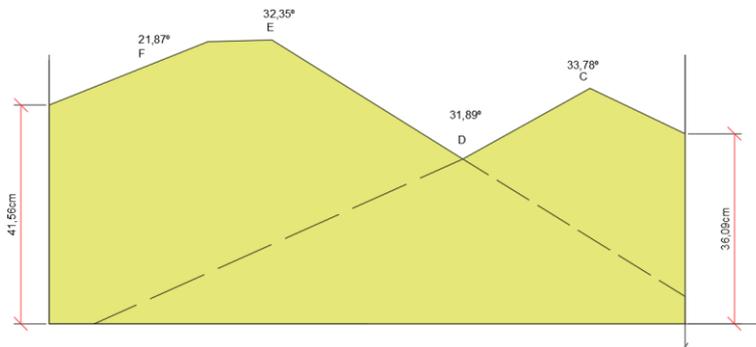
Figura 70 – Ângulos obtidos em leitura no cenário 2 a 80% da carga total.



(a)

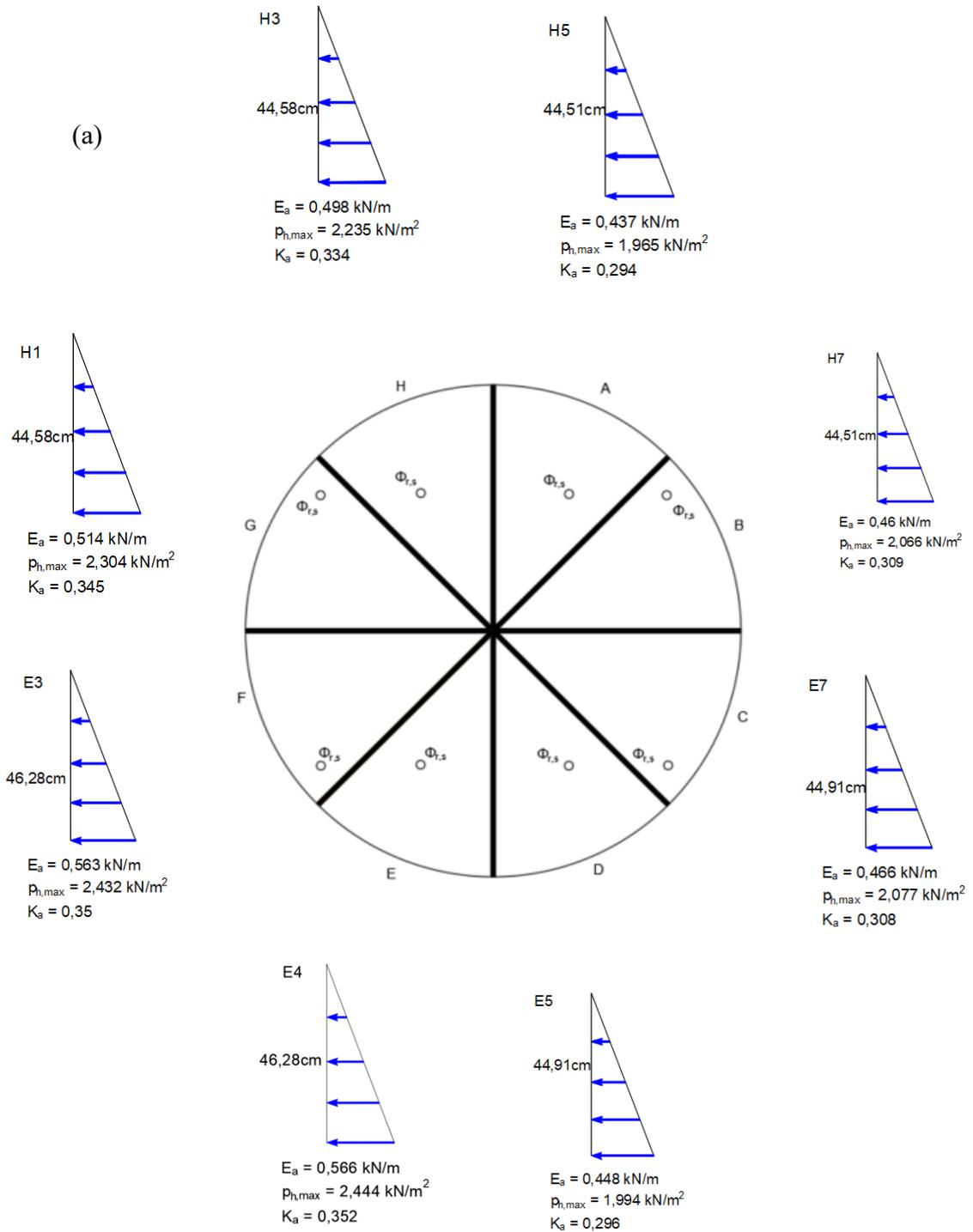


(b)

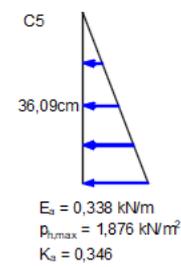
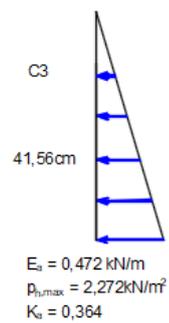
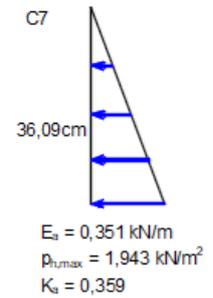
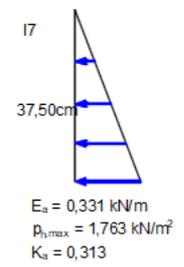
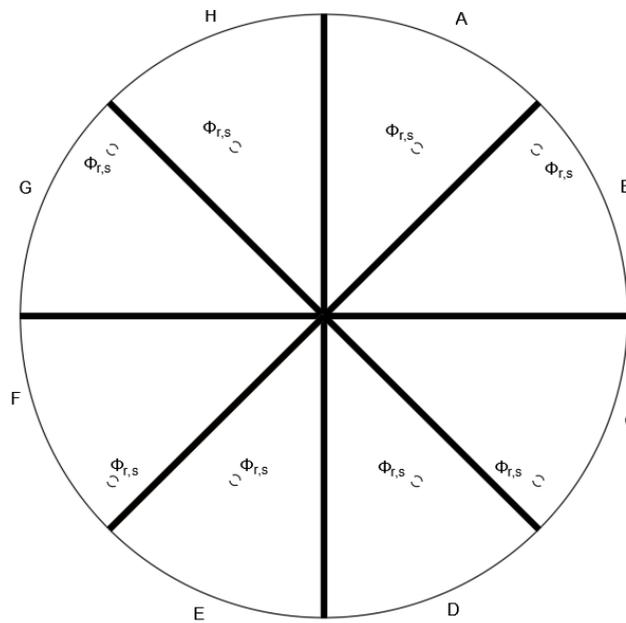
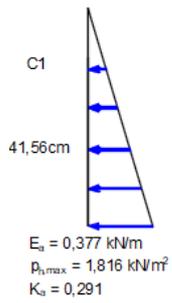
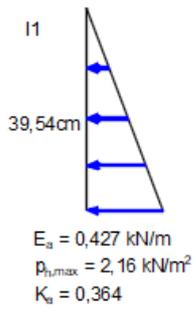
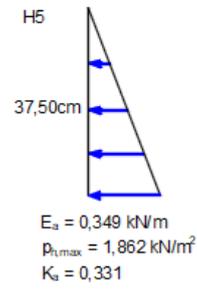
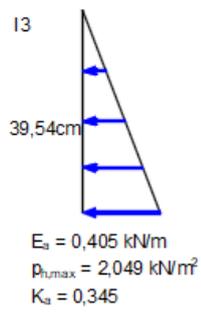


Fonte: O autor.

Figura 71 – Resultados do cálculo da pilha inclinada com talude simples e duplo talude no cenário 2 a 80% da carga total.



(b)



Fonte: O autor.

5.7.2 Condição 2 – Variações em 40%

Aos 40% de carga os esforços laterais diminuem, no entanto, os valores máximos são identificados exatamente na região dos taludes. O quadrante F mostra o maior valor de E_a com $0,354 \text{ kN/m}$ tendo uma redução de 37%.

A pressão máxima atinge $1,377 \text{ kN/m}^2$, reduzindo 43%, e o K_a 0,269. Em termos gerais, este estágio apresenta menores picos de E_a , $p_{h_{Max}}$ e K_a se comparado aos 80%, porém, nota-se que o valor máximo se expressa do quadrante G para o F, mostrando que o produto tem sua pressão máxima deslocada em diferentes pontos do silo. (Figura 72 e 73) (Tabela 9).

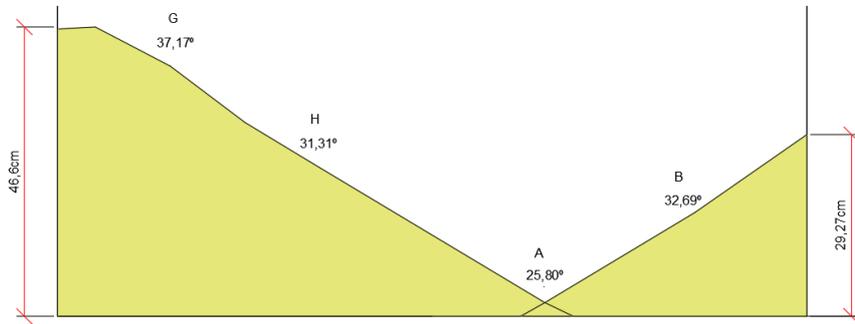
Comparado à condição 1, os valores de empuxo e pressão desta configuração são próximos, o que mostra que as paredes que não foram projetadas para receber tamanha pressão podem eventualmente sofrer um colapso, pois diferente da condição 1, os taludes permanecerão estagnados.

Tabela 9 – Alturas obtidas em leitura no cenário 2 a 40% da carga total (cm).

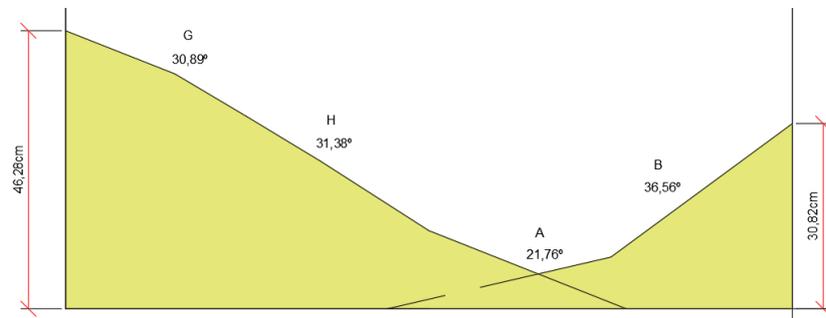
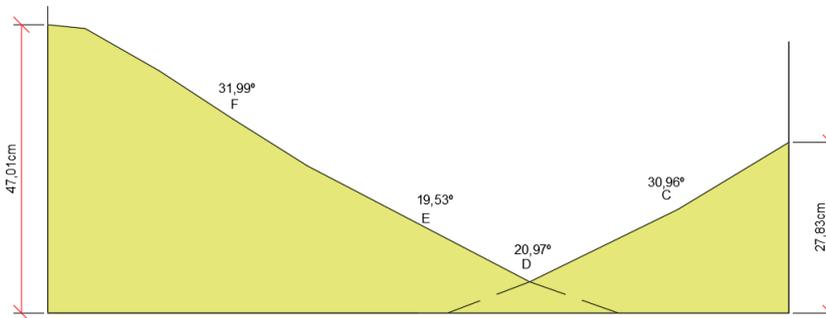
K	0	0	0	0,274	0,143	0,086	0	0	0
J	0	0	0,317	0,236	0,122	0,004	0,073	0	0
I	0	0,391	0,320	0,246	0,130	0,058	0,086	0,175	0
H	0,466	0,403	0,312	0,239	0,109	0,022	0,090	0,167	0,251
G	0,469	0,401	0,333	0,250	0,134	0,040	0,100	0,165	0,251
F	0,471	0,413	0,329	0,248	0,123	0,029	0,083	0,163	0,244
E	0,464	0,395	0,316	0,240	0,115	0,051	0,097	0,169	0,242
D	0,451	0,402	0,321	0,247	0,116	0,040	0,086	0,160	0,211
C	0	0,395	0,316	0,240	0,113	0,032	0,089	0,165	0
B	0	0	0,312	0,239	0,113	0,037	0,079	0	0
A	0	0	0	0,246	0,139	0,066	0	0	0
	0	1	2	3	4	5	6	7	8

Fonte: O autor.

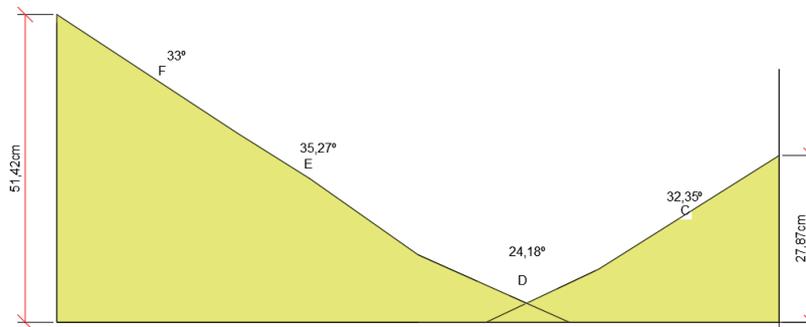
Figura 72 – Ângulos obtidos em leitura no cenário 2 a 40% da carga total.



(a)

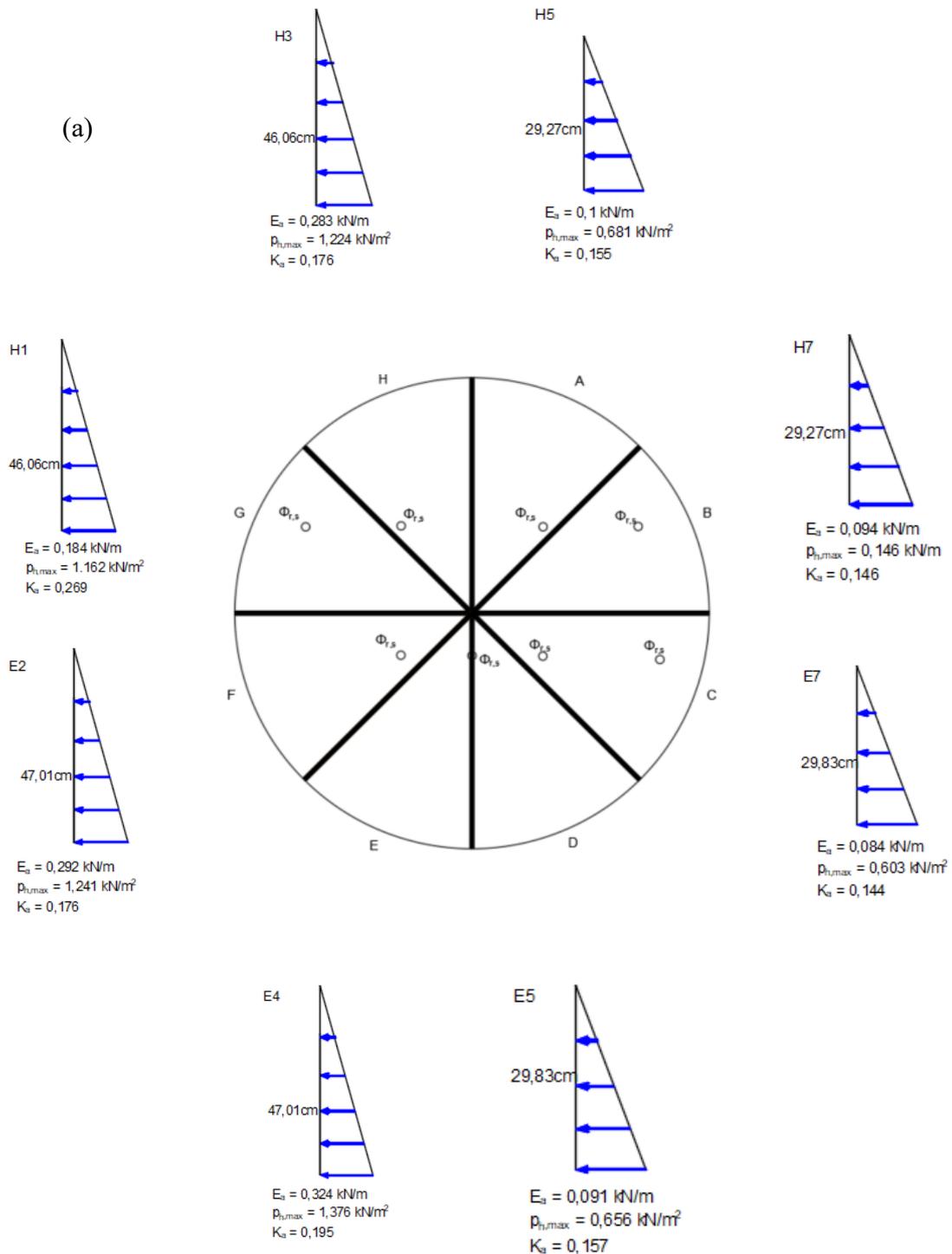


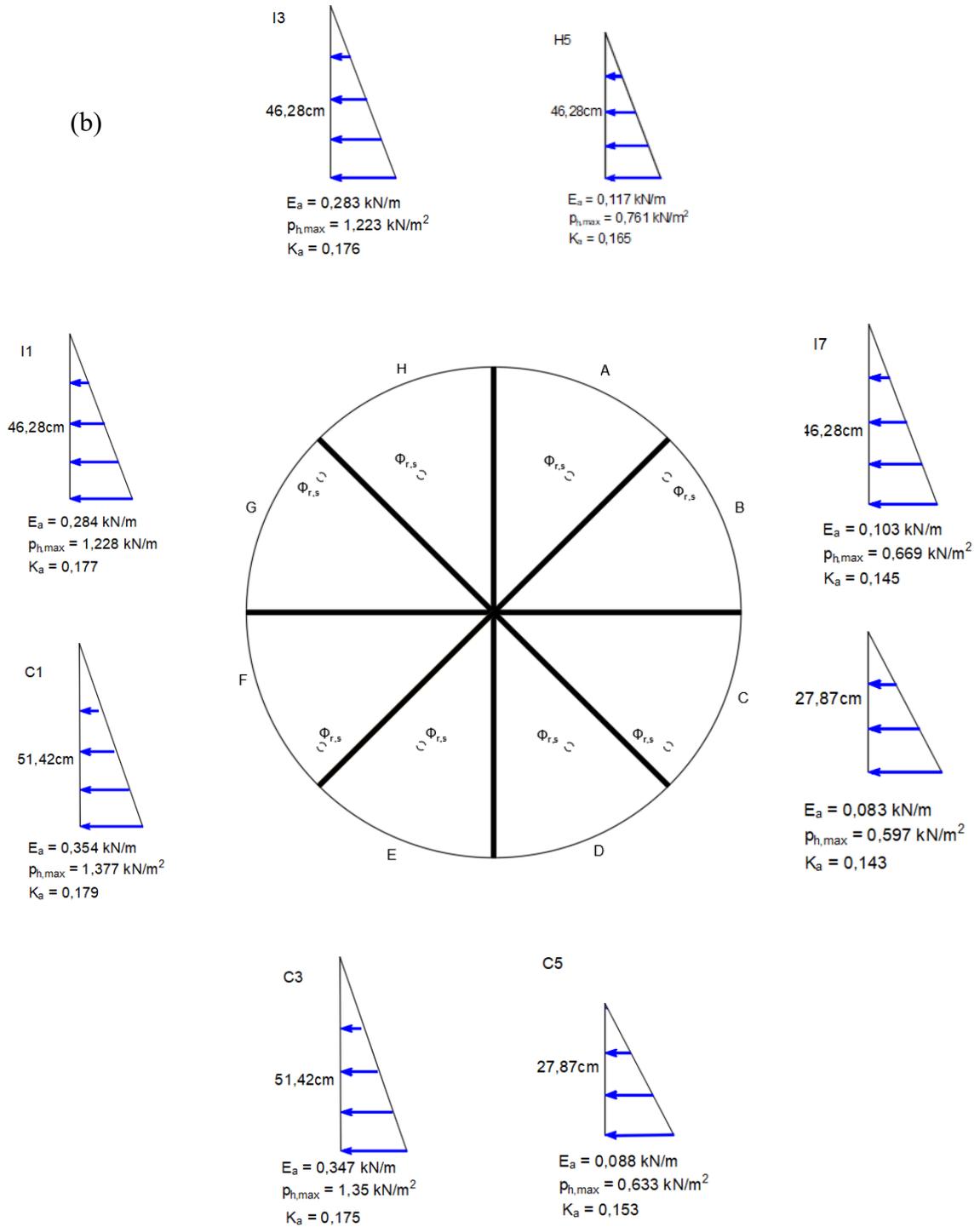
(b)



Fonte: O autor.

Figura 73 – Resultado do cálculo da pilha inclinada com duplo talude no cenário 2 a 40% da carga total.





Fonte: O autor.

5.7.3 Condição 3 – Variações em 80%

Na condição de 80% da carga total, observa-se que os esforços laterais atingem níveis elevados, concentrando-se em determinados quadrantes. O empuxo ativo varia de

aproximadamente 0,113 a 0,510 kN/m , enquanto as pressões máximas por quadrante ficam entre 0,744 e 1,787 kN/m^2 , e o coeficiente K_a oscila entre 0,153 e 0,209.

Os maiores valores ocorrem em regiões com taludes mais íngremes e zonas de escoamento estagnado, evidenciando comportamento excêntrico e aumento do risco de picos de pressão lateral e deslocamentos localizados. Diferente do Cenário 2, o quadrante que mais apresentou os valores máximos de empuxo ativo e pressão foi C, seguido do quadrante F.

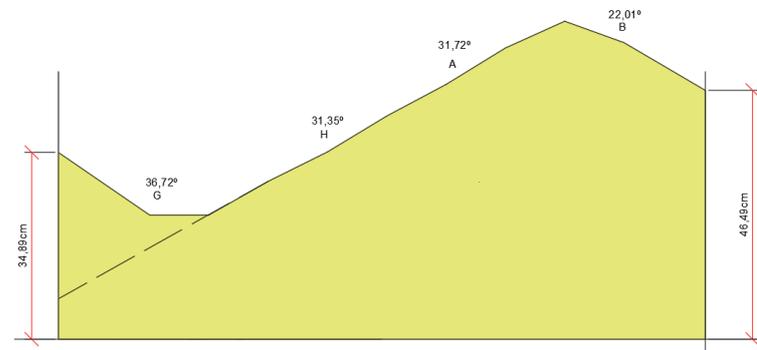
Em termos práticos, operar nesta condição implica maior solicitação estrutural, demandando atenção especial à geometria de descarga, sincronismo das saídas, adoção de medidas de alívio e monitoramento direcionado de pressões e deslocamentos nos quadrantes mais críticos (Figura 74 e 75) (Tabela 10).

Tabela 10 – Alturas obtidas em leitura no cenário 3 a 80% da carga total (cm).

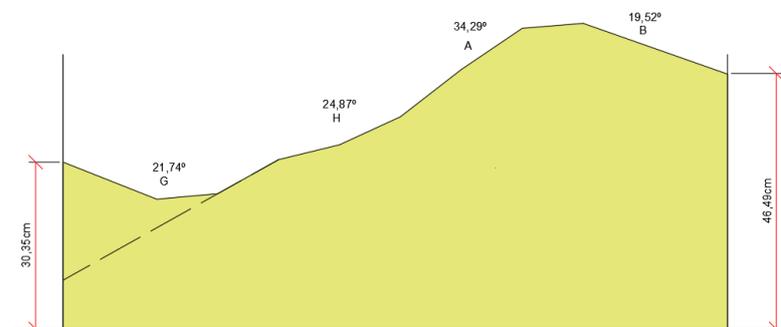
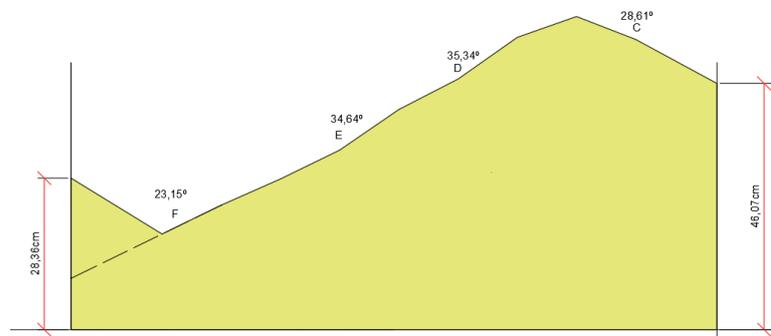
K	0	0	0	0,489	0,506	0,483	0	0	0
J	0	0	0,517	0,554	0,576	0,543	0,505	0	0
I	0	0,494	0,556	0,594	0,619	0,586	0,546	0,491	0
H	0,468	0,527	0,547	0,544	0,578	0,547	0,540	0,511	0,452
G	0,481	0,505	0,472	0,476	0,504	0,469	0,473	0,510	0,466
F	0,487	0,453	0,386	0,417	0,466	0,412	0,413	0,462	0,464
E	0,462	0,405	0,335	0,350	0,394	0,336	0,347	0,410	0,430
D	0,425	0,365	0,308	0,295	0,343	0,282	0,294	0,360	0,430
C	0	0,326	0,246	0,233	0,301	0,223	0,268	0,354	0
B	0	0	0,236	0,232	0,302	0,179	0,267	0	0
A	0	0	0	0,308	0,327	0,247	0	0	0
	0	1	2	3	4	5	6	7	8

Fonte: O autor.

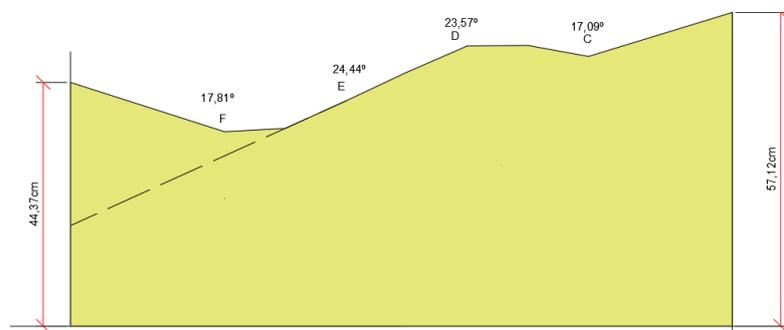
Figura 74 – Ângulos obtidos em leitura no cenário 3 a 80% da carga total.



(a)

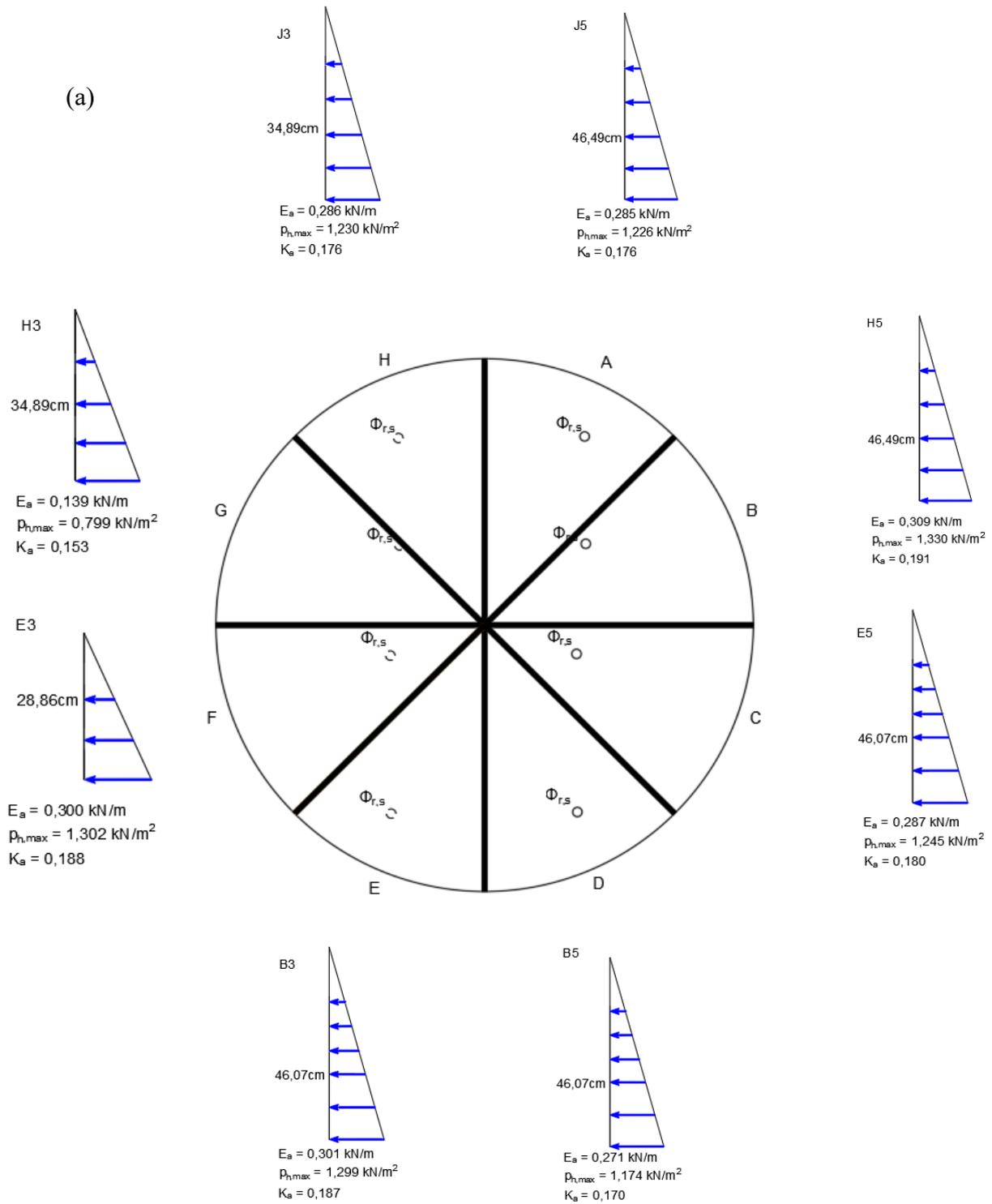


(b)

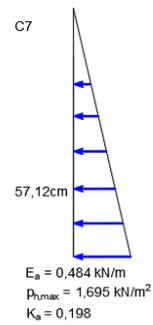
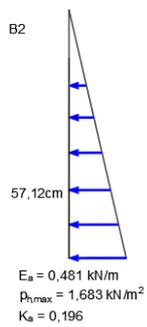
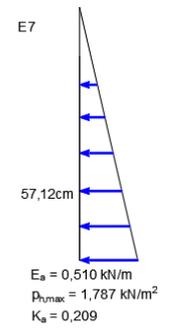
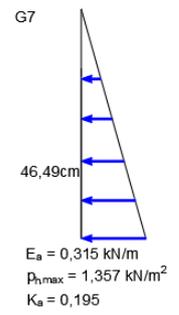
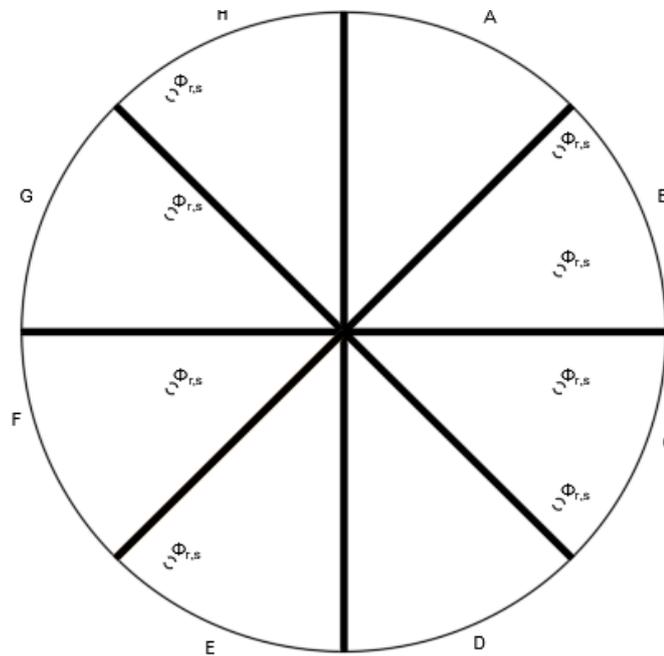
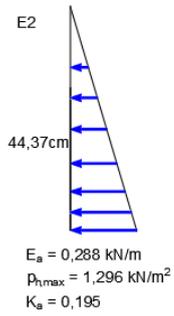
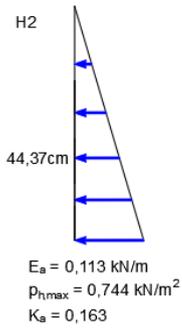
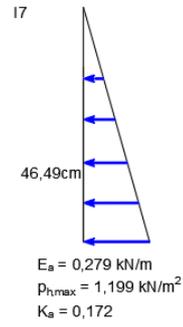
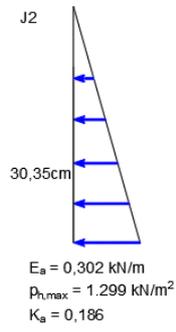


Fonte: O autor.

Figura 75 – Resultados do cálculo da pilha inclinada com talude simples e duplo talude no cenário 3 a 80% da carga total.



(b)



Fonte: O autor.

5.7.4 Condição 3 – Variações em 40%

Em 40% da carga, os empuxos e as pressões são significativamente menores que o estágio de 80%, no entanto, nos quadrantes E e A, observa-se os valores máximos de E_a entre 0,347 e 0,325 kN/m , com pressões p_h variando entre 1,347 e 1,316 kN/m^2 .

Os coeficientes K_a apresentam pouca variação relativa, mas refletem o comportamento mais ativo da estrutura sob maior carregamento (Figura 76 e 77) (Tabela 11).

Observa-se que esta configuração apresentou valores de empuxo e pressão próximos a configuração da condição 2, porém pouco menores, o que nos mostra que a condição 2 continua sendo a pior configuração possível, seguido da condição 3.

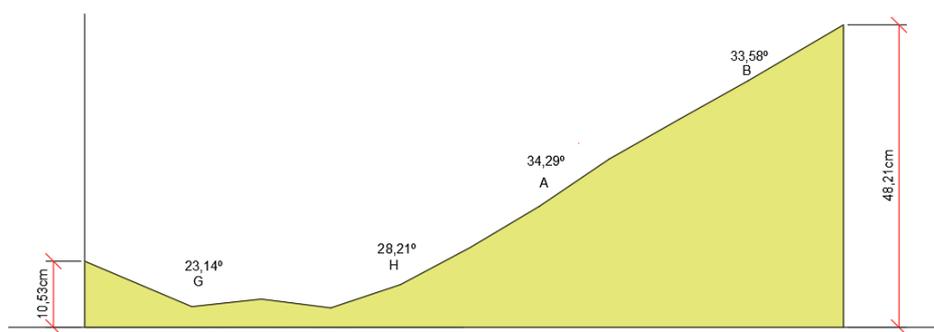
Comparado à condição 1, os valores de empuxo e pressão desta configuração se distanciam pouco, no entanto, sabe-se que as paredes que não foram projetadas para receber tamanha pressão e podem eventualmente sofrer um colapso, pois diferente da condição 1, os taludes permanecerão estagnados.

Tabela 11 – Alturas obtidas em leitura no cenário 3 a 40% da carga total (cm).

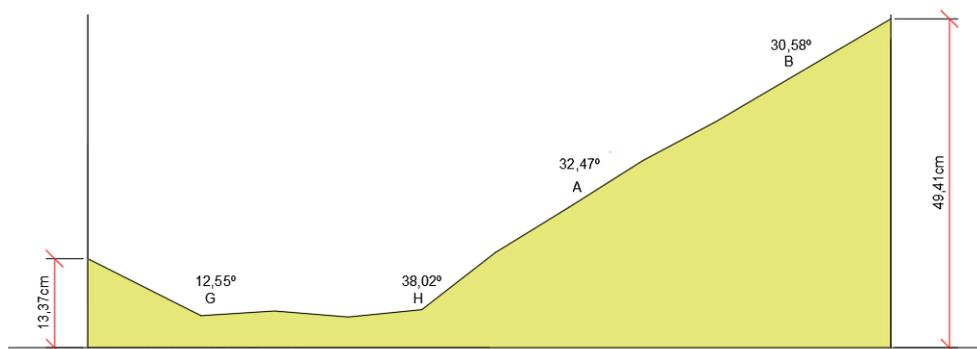
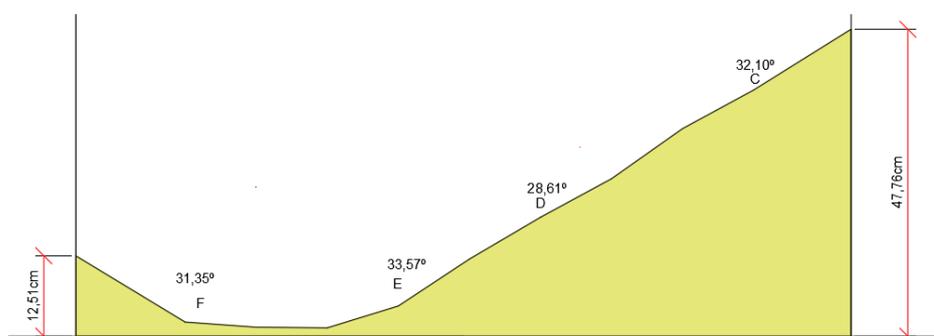
K	0	0	0	0,458	0,462	0,452	0	0	0
J	0	0	0,405	0,393	0,399	0,383	0,397	0	0
I	0	0,339	0,340	0,331	0,354	0,323	0,320	0,348	0
H	0,343	0,341	0,281	0,268	0,281	0,245	0,283	0,296	0,339
G	0,357	0,240	0,211	0,193	0,221	0,185	0,197	0,229	0,282
F	0,139	0,191	0,143	0,127	0,161	0,120	0,139	0,183	0,245
E	0,214	0,152	0,057	0,068	0,115	0,047	0,097	0,160	0,242
D	0,204	0,204	0,046	0,031	0,105	0,013	0,083	0,158	0,240
C	0	0,132	0,055	0,045	0,104	0,014	0,090	0,158	0
B	0	0	0,048	0,033	0,067	0,022	0,090	0	0
A	0	0	0	0,080	0,135	0,089	0	0	0
	0	1	2	3	4	5	6	7	8

Fonte: O autor.

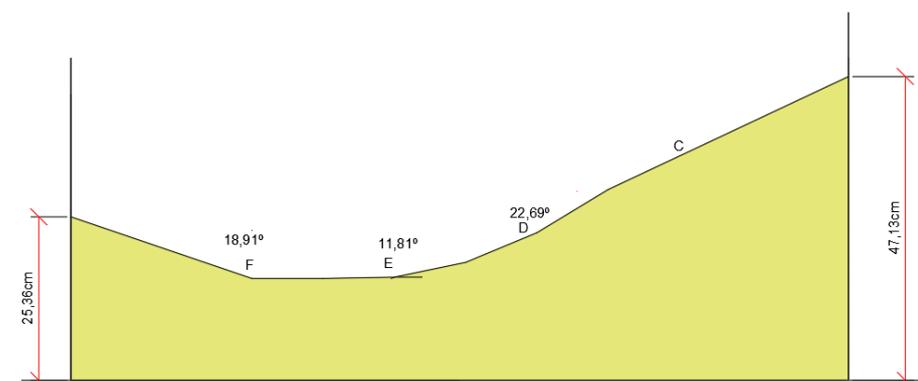
Figura 76 – Ângulos obtidos em leitura no cenário 3 a 40% da carga total.



(a)

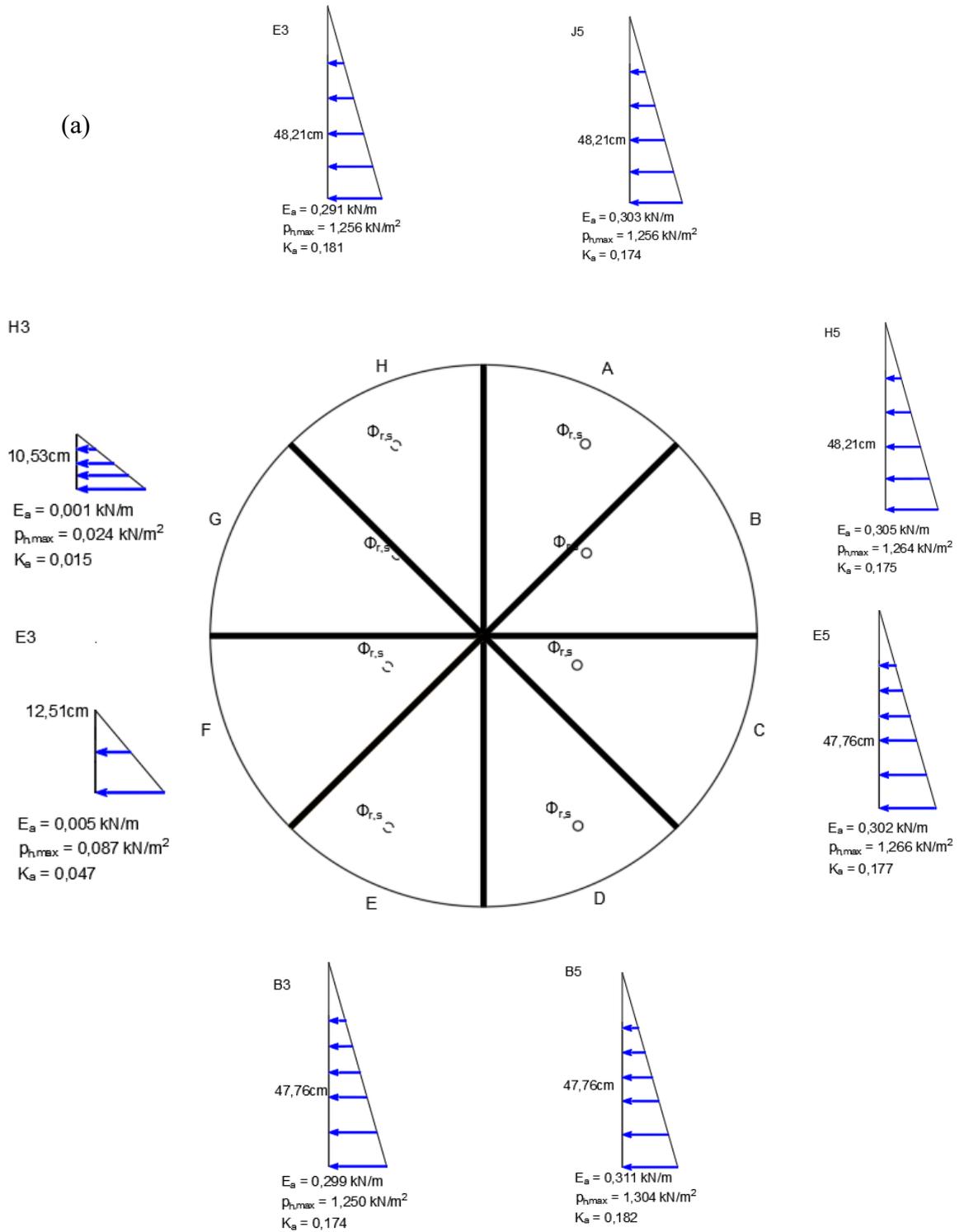


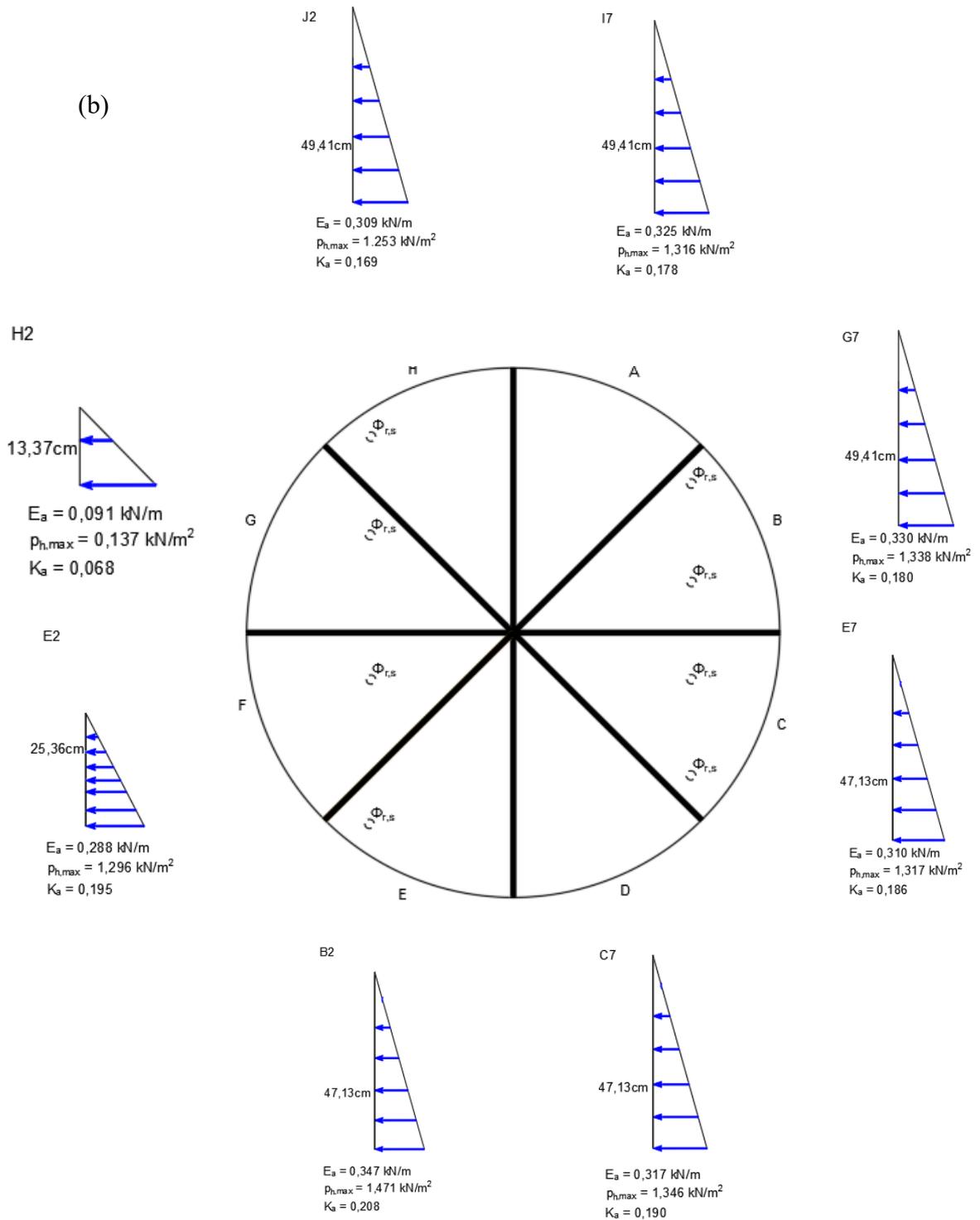
(b)



Fonte: O autor.

Figura 77 – Resultados do cálculo da pilha inclinada com talude simples e duplo talude no cenário 3 a 40% da carga total.





Fonte: O autor.

Dos resultados experimentais gerados nos três cenários, destacam-se como o maior empuxo e pressão lateral observados no Condição 1 - Quadrante G, 80% com $E_{a_{Max}} = 0,585 \text{ kN/m}$, $p_{h_{Max}} = 2,623 \text{ kN/m}^2$, enquanto os menores valores ocorreram no Condição 3 - Quadrante G, 40% com $E_{a_{Max}} = 0,001 \text{ kN/m}$ e $p_{h_{Min}} = 0,024 \text{ kN/m}^2$.

O coeficiente de empuxo ativo K_a apresentou variação ampla (de 0,015 a 0,404), com $K_{a_{Max}}$ associado a Condição 1 - Quadrante B, 80%. Esses achados refletem respostas muito distintas entre configurações: a Condição 1 apresentou comportamento predominantemente simétrico e fluxo livre, mas com zonas estacionárias e retenção final de aproximadamente 208,3 kg (Tabela 12).

A Condição 2 mostrou acúmulo mais expressivo e pressões laterais elevadas, e a Condição 3 apresentou formação precoce de taludes, escoamento fortemente assimétrico e maiores riscos de descarga excêntrica, todavia pouco menores, o que nos mostra que a condição 2 continua sendo a pior configuração possível, seguido da condição 3.

Tabela 12 – Os maiores e menores resultados de pressão, empuxo ativo e K_a de 80% e 40% para cada cenário.

	Ea	Quadrante	Ph	Quadrante	Ka	Quadrante	Carga
	Max/Min (kN/m)		Max/Min (kN/m ²)		Max/Min		
Cenário 1	0,585	G	2,623	G	0,404	B	80%
	0,092	G	0,164	F	0,140	H	40%
Cenário 2	0,566	E	2,444	E	0,364	E; G	80%
	0,083	C	0,146	B	0,143	C	40%
Cenário 3	0,510	C	1,787	C	0,209	C	80%
	0,001	G	0,024	G	0,015	G	40%

Ea	Ph	Ka	Condição	Quadrante
Max/Min (kN/m)	Max/Min (kN/m ²)	Max/Min		
0,585	2,623	0,404	Cenário 1	G
0,001	0,024	0,015	Cenário 3	G

Fonte: O autor.

5.8 Fator de escala dos modelos 1:120 e 1:50

No presente estudo, que compara modelos reduzidos de silos nas escalas geométricas 1:50 e 1:120, identificou-se que o único parâmetro físico coincidente entre ambos é o ângulo de repouso de descarregamento do produto. Por se tratar de uma grandeza adimensional, o ângulo de repouso não sofre influência direta da escala geométrica, desde que sejam preservadas as propriedades intrínsecas do produto e as condições experimentais, e, considerando-se que ambos possuem geometria similar, adota-se um fator de escala λ , pela equação 27:

$$\lambda_{\phi} = \frac{\phi_{r,d}(1:50)}{\phi_{r,d}(1:120)} \quad 27$$

Portanto, utiliza-se os ângulos de repouso de descarregamento $\phi_{r,d}$ de ambos os modelos na fase de 100% da carga do produto:

- Cenário 1:

$$\lambda_{\phi} = \frac{30^{\circ}}{35,20^{\circ}} = 0,85$$

- Cenário 2:

$$\lambda_{\phi} = \frac{32,51^{\circ}}{35,52^{\circ}} = 0,91$$

- Cenário 3:

$$\lambda_{\phi} = \frac{29,14^{\circ}}{32,98^{\circ}} = 0,88$$

Com base nos resultados obtidos para o fator de escala λ_{ϕ} , observa-se que, nos três cenários analisados, os valores variaram entre 0,85 e 0,91, indicando que os ângulos de repouso de descarregamento do modelo em escala 1:50 são ligeiramente inferiores aos do modelo em escala 1:120. Essa diferença, embora relativamente pequena, sugere que, apesar da preservação da geometria e do material, há influência de efeitos de escala sobre o comportamento granular, possivelmente associados a variações nas condições de descarregamento, na interação produto-parede ou na distribuição de tensões internas. Considerando que o ângulo de repouso é uma grandeza adimensional e, teoricamente, independente da escala, tais desvios podem refletir ajustes experimentais, heterogeneidades do produto ou limitações inerentes à reprodução exata das condições entre modelos de diferentes dimensões.

5.9 Proposta para projetistas e proprietários de silos

A segurança estrutural de silos de armazenamento depende não apenas de um bom projeto inicial, mas também de práticas operacionais rigorosas e manutenção contínua. Com base nos resultados obtidos neste estudo, em relação ao comportamento do produto sob condições de descarga excêntrica, foi possível obter dados com relação as características de pressão, empuxo e coeficiente ativo do silo em diferentes estágios. Para projetos de silo, este

estudo propõe como aplicar a teoria de Coulomb em padrões de produto estagnado para a obtenção das pressões nos taludes inclinados variando ao longo do perímetro.

6 CONCLUSÕES

Os ensaios foram reproduzidos seguindo as tendências observadas na literatura, demonstrando a validade do arranjo experimental. O silo modelo 1:50 teve seus ensaios realizados com base nos resultados do modelo 1:120, demonstrando que a geometria e a operação definem se o silo segue as previsões simétricas da teoria de pressões ou se desenvolve pressões excêntricas capazes de comprometer a segurança. A teoria de Coulomb é adequada para estimar E_a , K_a e p_h em silos baixos, no entanto, efeitos de escala, atrito superficial, rugosidade e interação produto-parede podem apresentar comportamento não linear ao passar para o protótipo.

Com base no modelo experimental 1:50, as medições detalhadas com os ângulos de repouso, deslocamentos por relógio, e de massas retidas, permitiram relacionar variações de K_a , p_h e E_a às mudanças físicas internas, como a formação de taludes e zonas estacionárias.

Foi observado que a Condição 1 demonstrou que com saídas corretamente operadas, o fluxo livre e a simetria reduzem risco de maiores estagnações do produto, uma evidência prática de que procedimentos operacionais influenciam diretamente as pressões. Nesta condição, observou-se os valores máximos de $E_a = 0,585 \text{ kN/m}$, $p_h = 2,623 \text{ kN/m}^2$ e $K_a = 0,404$ concentrados nos quadrantes G, e B, no estágio de 80% da carga total, e o talude obteve um ângulo médio do canal de fluxo mais íngreme como $32,01^\circ$ durante a mobilização do produto, enquanto que no estágio de 40% de carga observou-se os valores máximos de $E_a = 0,283 \text{ kN/m}$, $p_h = 1,223 \text{ kN/m}^2$ e $K_a = 0,186$ concentrados no quadrante H, com um ângulo médio do canal de fluxo de $28,57^\circ$. As zonas estacionárias da condição 1 representaram uma retenção final de até 208 kg, cerca de 19,97% do total da massa inicial, e para ordens de grandeza, podemos considerar que a massa retida em uma escala real seria o equivalente a $1,07 \times 10^4 \text{ kg}$.

Na Condição 2, foi observada uma assimetria visível, pois o produto deslocou-se lateralmente, gerando perfis de taludes diversificados entre os quadrantes do silo, evidência consistente em leituras dos relógios comparadores e fotos. Nesta condição, observou-se os valores máximos de $E_a = 0,566 \text{ kN/m}$, $p_h = 2,444 \text{ kN/m}^2$ e $K_a = 0,364$ concentrados nos

quadrantes E, e G, no estágio de 80% da carga total, e o talude obteve ângulo médio do canal de fluxo mais íngreme como $31,75^\circ$ durante a mobilização do produto, enquanto que no estágio de 40% de carga observou-se os valores máximos de $E_a = 0,354 \text{ kN/m}$, $p_h = 1,377 \text{ kN/m}^2$ e $K_a = 0,269$ concentrados no quadrante F, com um ângulo de repouso de 33° . Esta configuração no modelo de 1:50 é altamente crítica em termos de pressões não simétricas e deslocamentos locais, é o cenário que mais exige uma checagem estrutural detalhada nos quadrantes E, G e F, e a consideração de reforços ou modificações geométricas das saídas. A redução do produto aos 20% de carga atenua amplitudes, mas não elimina a concentração de esforços em quadrantes específicos, como observado. As zonas estacionárias da condição 2 representaram uma retenção final de até 242,96 kg, cerca de 19,99% do total da massa inicial, e para ordens de grandeza, podemos considerar que a massa retida em uma escala real seria o equivalente a $1,24 \times 10^4$ kg.

Na Condição 3, considerado o segundo pior cenário, o escoamento tendeu-se a desenvolver canais de fluxo internos e zonas de produto estagnado próximas às paredes, resultando em pressões laterais não homogêneas e concentrações de empuxo em quadrantes específicos. Esses comportamentos foram consistentes nas leituras e nas observações fotográficas durante o ensaio. Nesta condição, observou-se os valores máximos de $E_a = 0,510 \text{ kN/m}$, $p_h = 1,787 \text{ kN/m}^2$ e $K_a = 0,209$ concentrados no quadrante C, no estágio de 80% da carga total, e o talude obteve ângulo médio do canal de fluxo como $34,64^\circ$ durante a mobilização do produto, enquanto que no estágio de 40% de carga observou-se os valores máximos de $E_a = 0,347 \text{ kN/m}$, $p_h = 1,471 \text{ kN/m}^2$ e $K_a = 0,208$ concentrados no quadrante E, com um ângulo de canal de fluxo de $33,57^\circ$. Portanto, o cenário apresenta aumento de risco de flexão/ruptura local da parede devido a concentração dos esforços, o que requer uma atenção necessária para a região do quadrante C e E. Comparado com os demais cenários, há uma maior fração do produto estagnado, o que implica em possíveis interferências operacionais do silo. As zonas estacionárias da condição 3 representaram uma retenção final de até 594,208 kg, cerca de 46,78% do total da massa inicial, e para ordens de grandeza, podemos considerar que a massa retida em uma escala real seria o equivalente a $3,05 \times 10^4$ kg.

Por fim, a Condição 2 (saídas unilaterais) mostrou-se a mais crítica, apresentando maior assimetria e taludes concentrados nos quadrantes E e G, e a Condição 3 (saídas inferiores) foi a segunda mais severa, com canais de fluxo e picos em E e A, e, enquanto a Condição 1 (todas as saídas) forneceu o escoamento mais uniforme. Os quadrantes mais afetados foram, em geral,

E e G (com A e F em alguns estágios). Os ângulos de canal de fluxo observados aproximam-se do ângulo efetivo de atrito interno $\phi_e = 33,23^\circ$, porém, somente representa adequadamente a resistência ao cisalhamento e deve ser usada para modelar pressões e empuxos laterais.

Com base nos resultados experimentais obtidos nos modelos analisados, evidencia-se de forma inequívoca a significativa assimetria induzida pelo descarregamento excêntrico em silos de grande diâmetro. A condição do descarregamento excêntrico gera distribuições de pressões não uniformes, que podem comprometer a estabilidade estrutural e a eficiência operacional do sistema de armazenagem. Este estudo apresentou uma abordagem analítica robusta para incorporar tais efeitos, fundamentada na dedução de expressões baseadas na Teoria de Coulomb. Portanto, a formulação proposta contribui para uma melhor compreensão dos mecanismos de interação entre o produto granular e as paredes do silo sob condições assimétricas, oferecendo subsídios relevantes para o dimensionamento mais seguro e preciso dessas estruturas.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Validar a formulação com ensaios adicionais utilizando materiais de diferentes propriedades (granulometria, coesão e rugosidade) e em escalas variadas;
- Implementar modelagem numérica (elementos finitos) para estudar a sensibilidade dos empuxos à excentricidade e à dinâmica do escoamento;
- Analisar a velocidade e fluxo do descarregamento com modelo de material transparente (plexiglass);
- Realizar ensaios em escala real ou em protótipos industriais para verificar a aplicabilidade das correlações obtidas em laboratório sob condições operacionais reais;
- Realizar análise de durabilidade e desgaste causado por fluxos assimétricos (abrasão localizada, concentração de tensões de fadiga) e propor medidas de manutenção preventiva;
- Promover estudos de normalização e diretrizes de projeto que incorporem explicitamente descarregamento excêntrico, com colaboração entre academia, indústria e órgãos de normalização.

7 REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 313-16: **Design Specification for Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials and Commentary**. Farmington Hills, MI: ACI, 2016.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. ANSI/ASAE S433.1: **Loads Exerted by Free-Flowing Grain on Bins**. St. Joseph, MI: ASABE, 2019.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). **Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures** (ASCE/SEI 7-22). Reston, VA, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Solo - Análise granulométrica**. ABNT NBR 7181, Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregados - Amostragem**. ABNT NBR 16915, Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. ABNT NBR 17054, Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Silos metálicos de chapas corrugadas**. ABNT NBR 17066. Rio de Janeiro, 2022.

BRITTON, M. G., and Hawthorne, C. R. J., **Dynamic behavior of wheat in a lamellar bin**, Amer. Soc. of Agric. Engrs., vol 84, p. 501, 1984.

BROWN, Chris J.; NIELSEN, Jørgen. **Silos: Fundamentals of theory, behaviour and design**. CRC Press, 1998. <https://doi.org/10.1201/9781482271744>

CALIL Jr., C. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos verticais cilíndricos de pequena relação altura/diâmetro**. v. 3, p. 229-243, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1987.

CARR, Michael J. et al. **Calibration procedure of Discrete Element Method (DEM) parameters for cohesive bulk materials**. In: International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation. p. 693-707, Barton, ACT: Engineers Australia, 2023 <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118919>

CHEUNG, Andrés Batista et al. **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos**. São Carlos, 2007.

CHEUNG, Andrés Batista; JUNIOR, C. CALIL; BERTOCINI, Sandra Regina. **Investigação estrutural de silos metálicos e de concreto no Brasil**. Lisboa: CONPAT, v. 10, 2015.

DE SOUZA, Leandro Faria et al. **Dimensionamento de um silo industrial**. 2022.

DIN. 1055-6: **Basis of Design and Actions on Structures—Part 6: Design 623 Loads for Buildings and Loads in Silo Bins**. Verlag: Berlin, Germany, 2005.

CEN, EN 1991-4. **Eurocode 1—Actions on structures—Part 4: Silos and tanks**. European Committee for Standardization, 2006.

FREITAS, Edna das Graças Assunção. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano**. 2001. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GANDIA, Rômulo Marçal et al. **The influence of flow pattern and hopper angle on static and dynamic pressures in slender silos**. *Powder Technology*, v. 427, p. 118756, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118756>

GERSCOVICH, Denise MS. **Estabilidade de Taludes** (2ª edição). Oficina de textos, 2016.

GLOBO. Bom dia, Mirante. **Desabamento de telhado de um silo no terminal portuário de São Luís, Maranhão**. 2023. 1 vídeo (2 min 34 seg). Disponível em: <https://globoplay.globo.com/v/3816386/>. Acesso em: 05 fev. 2024.

HAMPE, E.; KAMIŃSKI, M. Der **Einfluss exzentrischer Entleerung auf die Druckverhältnisse in Silos**. *Bautechnik*, Jg, v. 61, n. 1, p. 73-82, 1984.

HAN, Yanlong et al. **Numerical analysis of flow pattern transition in a conical silo with ellipsoid particles**. *Advanced Powder Technology*, v. 30, n. 9, p. 1870-1881, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.06.004>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11697:2012: **Bases for design of structures** — Loads due to bulk materials. ISO, 2012.

JENIKE, A. W., **Denting of circular bins whits eccentric drawpoints**, *ASCE J. Struct. Div.*, v. 93, no. 1, p. 27-35, 1967.

JENIKE, Andrew W.; JOHANSON, Jerry R. **Bins loads**. *Journal of the structural division*, v. 94, n. 4, p. 1011-1041, 1968.

JENIKE, A. W.; JOHANSON, J. R.; CARSON, J. W. **Bin loads—Part 2: concepts**. 1973.

JENIKE & JOHANSON. **Eccentric Discharge from Silos**. 2014. Disponível em: <https://jenike.com/eccentric-discharge-silos/>. Acesso em: 29 de fevereiro de 2024.

MCLEAN, A. G.; ARNOLD, P. C.; BRAVIN, B. **Eccentric discharge silo wall loads**. Proc. "Reliable Flow of Bulk Solids", EFCE Publ. Ser, n. 49, p. 194-209, Bergen, Norway, 1985.

MADRONA, Fernanda Scaramal. **Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/9>. Acesso em: 14 de novembro de 2023.

PALMA, Giovano. **Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d > 1, 5$)**. Escola de Engenharia de São Carlos. USP, São Carlos, 2005.

PIEPER, K., and WAGNER, K., **The influence of different types of discharging on side pressures in silo compartments**, Aufbereitungs -Technik, v. 10, p. 542- 546, 1969.

REIMBERT, A. **Pressure and overpressures in vertical and horizontal silos**. In: Proc. Int. Conf. on Design of Silos for Strength and Flow. University of Lancaster, 1980.

ROSS, I. J., Moore, D. W., Loewer, O. J., and whitre, G. M., **Model studies of grain silo failures, Winter Meeting**, Amer. Soc. Agric. Engrs., p. 2-264, Chicago 1980.

ROTTER, J. M, **Buckling under axial compression**, Design of Steel Bins for the Storage of Bulk Solids, p. 122-137. The Univ. of Sydney School of Civ. And Mining Engrg., 1985.

ROTTER, J. M.; HULL, T. S. **Wall loads in squat steel silos during earthquakes**. Engineering Structures, v. 11, n. 3, p. 139-147, 1989.

ROTTER, J. Michael, OOI, J. Y, et al. **Prediction of static wall pressures in coal silos**. Construction and Building Materials, v. 10, n. 2, p. 109-116, 1996.

ROTTER, J. Michael; DING, Xiaoli; COLEMAN, Richard. **Technique for precise measurement of large-scale silos and tanks**. Journal of Surveying Engineering, v. 122, n. 1, p. 14-25, 1996.

ROTTER, J. Michael. **Pressures, stresses and buckling in metal silos containing eccentrically discharging solids**. Festschrift Richard Greiner, celebration volume for the 60th birthday of Prof. Richard Greiner, p. 85-104, 2001.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.12.040>

SADOWSKI, Adam J.; ROTTER, J. Michael. **Structural behavior of thin-walled metal silos subject to different flow channel sizes under eccentric discharge pressures.** Journal of Structural Engineering, v. 138, n. 7, p. 922-931, 2012.

SAGARNAGA, Jesus Chavez; CARSON, John W. **Beyond Silo Failures: Legal Implications and Lessons Learned.** In: Forensic Engineering 2022. p. 922-931, 2022.

SALEH, Khashayar; GOLSHAN, Shahab; ZARGHAMI, Reza. **A review on gravity flow of free-flowing granular solids in silos–Basics and practical aspects.** Chemical Engineering Science, v. 192, p. 1011-1035, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.08.028>

SIELAMOWICZ, Irena; CZECH, Michał; KOWALEWSKI, Tomasz A. **Empirical description of flow parameters in eccentric flow inside a silo model.** Powder Technology, v. 198, n. 3, p. 381-394, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.12.003>

STANDARD, Australian. **Loads on bulk solids containers.** Standards Association of Australia, AS, v. 3774, p. 23, 1996.

SUN, Weiwei et al. **Multi-scale experimental study on filling and discharge of squat silos with aboveground conveying channels.** Journal of Stored Products Research, v. 88, p. 101679, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101679>

TAYLOR, Donald W. **Fundamentals of soil mechanics.** LWW, 1948.

TRUNG, Nguyen Tuan; THANG, Nguyen Truong; TUNG, Vo Manh. **Granular material pressure to reinforced concrete walls of cylindrical slender silos: Analysis and Experimental studies according to Eurocodes.** In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. p. 052045. doi: 10.1088/1757-899X/869/5/052045

WEBER, E. A. **Armazenagem agrícola.** Porto Alegre: Kepler Weber Industrial, 1995.

WIĄCEK, Joanna et al. **Experimental analysis of wheat-wall friction and grain flow in a steel silo with corrugated walls.** Biosystems Engineering, v. 209, p. 216-231, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.07.003>

XU, Zhijun et al. **Reduction mechanism of the normal stress exerted on silo wall with chutes during eccentric discharge.** Powder Technology, v. 407, p. 117659, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117659>

ZACCARI, Nicola; CUDEMO, Michele. **Steel silo failure and reinforcement proposal. Engineering failure analysis,** v. 63, p. 1-11, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.02.009>

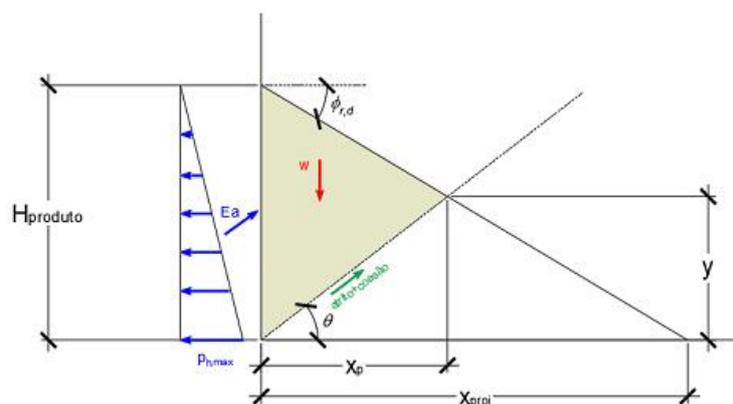
ZHU, Y. Z.; MENG, S. P.; SUN, W. W. **Lateral pressure in squat silos under eccentric discharge.** Int. J. Civil, Environ. Structural, Constr. Archit. Eng, v. 6, p. 536-544, 2012.

APÊNDICE

CÁLCULO DE PILHA INCLINADA SIMPLES PELA TEORIA DE COULOMB

EXEMPLO: CENÁRIO 1 – 80% DA CARGA – QUADRANTE G

PARÂMETROS INICIAIS:



Inicialmente, definem-se os valores dos parâmetros de cálculo:

1. $\phi_e = \phi_i$ - Ângulo efetivo de atrito interno

$$\phi_i := 33.23 \text{ deg}$$

2. $\phi_{r,d}$ - Ângulo de repouso de descarregamento ou canal de fluxo medido na fase

$$\phi_{r,d} := 12.23 \text{ deg}$$

3. c - Coesão aparente

$$c := 0.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

4. γ - Densidade da areia

$$\gamma := 15 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

5. $H_{produto}$ - Altura do produto na fase delimitada

$$H_{produto} := 44.5 \text{ m}$$

6. $\phi_w = \delta_1$ - Ângulo de atrito na interface solo-parede

$$\delta_1 := 0 \text{ deg}$$

RESULTADOS

7. Delimita-se um intervalo de ângulos de ruptura para trabalhar

$$\theta := 80\text{deg}, 79\text{deg} .. 45\text{deg}$$

8. Calcula-se a distância x do produto

$$x := \frac{H_{\text{produto.}}}{\tan(\phi_{r.d})} = 2.057\text{m}$$

9. Calcula-se a altura y do produto

$$y(\theta) := \frac{H_{\text{produto.}}}{\left(1 + \frac{\tan(\phi_{r.d})}{\tan(\theta)}\right)}$$

10. Calcula-se a área de corte A_c do produto

$$A_c(\theta) := \frac{0.5 \cdot H_{\text{produto.}}}{\tan(\phi_{r.d})} \cdot (H_{\text{produto.}} - y(\theta))$$

11. l é o comprimento do plano de ruptura.

$$l(\theta) := \frac{y(\theta)}{\sin(\theta)}$$

12. Calcula-se o peso da cunha W do produto

$$W_{\text{peso}}(\theta) := A_c(\theta) \cdot \gamma$$

13. Calcula-se empuxo ativo do produto em um ângulo variado

$$E_a(\theta) := \frac{W_{\text{peso}}(\theta) \cdot \sin(\theta - \phi_j) - c \cdot l(\theta) \cdot \sin(90\text{deg} + \phi_j)}{\sin(90\text{deg} + \delta_1 - \theta + \phi_j)}$$

14. É feito uma varredura e otimização do ângulo crítico

$c \cdot l(\theta) \cdot \sin(90\text{deg} + \phi_i)$	$W_{\text{peso}}(\theta) =$	$E_a(\theta) =$	$A_c(\theta) =$	$l(\theta) =$
$\frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$\frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$\frac{\text{kN}}{\text{m}}$	m^2	m
0.073	0.253	0.163	0.017	0.436
0.073	0.278	0.181	0.019	0.436
0.073	0.303	0.198	0.02	0.436
0.073	0.328	0.213	0.022	0.436
0.073	0.353	0.227	0.024	0.436
0.073	0.377	0.239	0.025	0.436
0.073	0.402	0.251	0.027	0.437
0.073	0.427	0.261	0.028	0.437
0.073	0.452	0.269	0.03	0.438
0.073	0.478	0.277	0.032	0.439
0.074	0.503	0.284	0.034	0.44
0.074	0.528	0.29	0.035	0.441
0.074	0.554	0.294	0.037	0.442
0.074	0.579	0.298	0.039	0.443
0.074	0.605	0.301	0.04	0.445
...

15. Sugere-se um valor inicial para otimização

$$\theta := 50\text{deg}$$

$$E_a(50\text{deg}) = 0.233 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

16. Calcula-se empuxo ativo máximo no ponto de ruptura no ângulo encontrado pelo algoritmo

$$\theta_{\text{rup}} := \text{Maximize}(E_a, \theta) = 63.207\text{deg}$$

$$E_a(\theta_{\text{rup}}) = 0.304 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

17. Calcula-se a pressão máxima no ponto de ruptura no ângulo encontrado pelo algoritmo

$$P_h := \frac{(E_a(\theta_{\text{rup}}) \cdot 2)}{H_{\text{produto}}} = 1.366 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

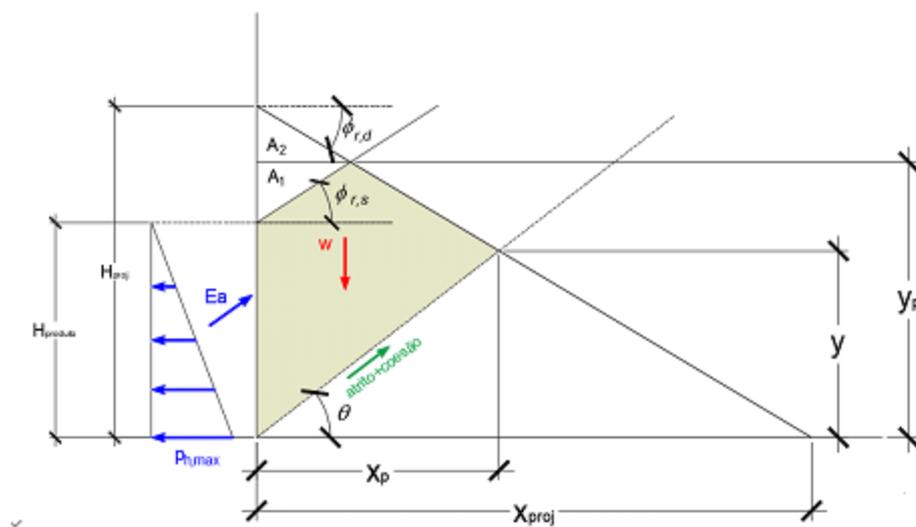
18. Calcula-se o coeficiente de empuxo ativo máximo no ponto de ruptura no ângulo encontrado pelo algoritmo

$$K_a := \frac{P_h}{\gamma \cdot H_{\text{produto}}} = 0.204$$

CÁLCULO DE PILHA INCLINADA COM TALUDE DUPLO PELA TEORIA DE COULOMB

EXEMPLO: CENÁRIO 1 – 80% DA CARGA – QUADRANTE G

PARÂMETROS INICIAIS:



1. $\phi_{r,d} = \phi_i$ - Ângulo efetivo de atrito interno

$$\phi_i := 33.23 \text{ deg}$$

$$\phi_{r,d} := \phi_i$$

2. $\phi_{r,s}$ - Ângulo de repouso superficial

$$\phi_{r,s} := 32.0 \text{ deg}$$

3. c - Coesão aparente

$$c := 0.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

4. γ - Densidade da areia

$$\gamma := 15 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

5. $H_{produto}$ - Altura do produto na fase delimitada

$$H_{produto} := 44.5 \text{ m}$$

6. $\phi_w = \delta_1$ - Ângulo de atrito na interface solo-parede

$$\delta_1 := 0 \text{deg}$$

7. x_{proj} - Projecção da distância do produto escoado

$$x_{proj} := 225.73 \text{m}$$

RESULTADOS

8. Delimita-se um intervalo de ângulos de ruptura para trabalhar

$$\theta := 80 \text{deg}, 79 \text{deg} \dots 45 \text{deg}$$

9. Calcula-se a projecção de altura do produto

$$h_{proj} := \tan(\phi_{r,d}) \cdot x_{proj} = 147.882 \text{m}$$

10. Calcula-se o pico em distância e altura do produto

$$x_{pico} := \frac{h_{proj} - H_{produto.}}{\tan(\phi_{r,s}) + \tan(\phi_{r,d})} = 0.807 \text{m}$$

$$y_{pico} := -\tan(\phi_{r,d}) \cdot x_{pico} + h_{proj} = 0.95 \text{m}$$

$$x_p := x_{pico}$$

$$y(\theta) := \frac{h_{proj}}{\left(1 + \frac{\tan(\phi_{r,d})}{\tan(\theta)}\right)}$$

11. Calcula-se a área de corte A_c e área total do produto

$$A_c(\theta) := \frac{0.5 \cdot h_{proj}}{\tan(\phi_{r,d})} \cdot (h_{proj} - y(\theta))$$

$$A_1 := (y_{pico} - H_{produto.}) \cdot \frac{x_{pico}}{2} = 0.204 \text{m}^2$$

$$A_2 := (h_{proj} - y_{pico}) \cdot \frac{x_{pico}}{2} = 0.213 \text{m}^2$$

$$A_T(\theta) := (A_c(\theta) - A_1 - A_2)$$

12. l é o comprimento do plano de ruptura.

$$l(\theta) := \frac{y(\theta)}{\sin(\theta)}$$

13. Calcula-se o peso da cunha W do produto

$$W_{\text{peso}}(\theta) := A_T(\theta) \cdot \gamma$$

14. Calcula-se empuxo ativo do produto em um ângulo variado

$$E_a(\theta) := \frac{W_{\text{peso}}(\theta) \cdot \sin(\theta - \phi_i) - c \cdot l(\theta) \cdot \sin(90\text{deg} + \phi_i)}{\sin(90\text{deg} + \delta_1 - \theta + \phi_i)}$$

15. É feita uma varredura e otimização do ângulo crítico

$E_a(\theta) =$	$c \cdot l(\theta) \cdot \sin(90\text{deg} + \phi_i)$	$W_{\text{peso}}(\theta) =$	$A_T(\theta) =$	$l(\theta) =$
$\frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$\frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$\frac{\text{kN}}{\text{m}}$	m^2	m
-4.221	0.225	-3.659	-0.244	1.346
-3.837	0.224	-3.424	-0.228	1.336
-3.479	0.222	-3.191	-0.213	1.327
-3.143	0.221	-2.962	-0.197	1.318
-2.83	0.219	-2.736	-0.182	1.31
-2.537	0.218	-2.513	-0.168	1.302
-2.263	0.217	-2.292	-0.153	1.295
-2.006	0.216	-2.074	-0.138	1.288
-1.767	0.214	-1.858	-0.124	1.282
-1.544	0.213	-1.643	-0.11	1.276
-1.335	0.213	-1.431	-0.095	1.271
-1.14	0.212	-1.221	-0.081	1.266
-0.959	0.211	-1.012	-0.067	1.261
-0.791	0.21	-0.804	-0.054	1.257
-0.634	0.21	-0.598	-0.04	1.253
...

16. Sugere-se um valor inicial para otimização

$$E_a(50\text{deg}) = 0.575 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\theta := 50\text{deg}$$

17. Calcula-se empuxo ativo máximo no ponto de ruptura no ângulo encontrado pelo algoritmo

$$\theta_{\text{rup}} := \text{Maximize}(E_a, \theta) = 48.317\text{deg}$$

$$E_a(\theta_{rup}) = 0.585 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

18. Calcula-se a pressão máxima no ponto de ruptura no ângulo encontrado pelo algoritmo

$$p_h := \frac{(E_a(\theta_{rup}) \cdot 2)}{H_{\text{produto.}}} = 2.623 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

19. Calcula-se o coeficiente de empuxo ativo máximo no ponto de ruptura no ângulo encontrado pelo algoritmo

$$K_a := \frac{p_h}{\gamma \cdot H_{\text{produto.}}} = 0.392$$