

**UNIVERSIDADE SANTA CECILIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANDRÉ LUIZ CARDOSO**

**QUANTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE FLUXO E VAZÃO DE SOJA EM**  
**SILO PRISMÁTICO COM TREMONHA RETANGULAR**

**SANTOS – SP/ 2020**

**ANDRÉ LUIZ CARDOSO**

**QUANTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE FLUXO E VAZÃO DE SOJA EM  
SILO PRISMÁTICO COM TREMONHA RETANGULAR**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de Mestre no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação do Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior e Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marlene Silva de Moraes.

**SANTOS – SP/ 2020**

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

633.20868 Cardoso, André Luiz.  
C26c Quantificação experimental de fluxo e vazão de soja  
em silo prismático com tremonha retangular.  
/André Luiz Cardoso.  
2020.  
90 f.

Orientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Junior.  
Coorientador: Prof. Dra. Marlene Silva de Moraes.

Dissertação (Mestrado)-- Universidade Santa Cecília,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos,  
SP, 2020.

1. Silo de grãos. 2. Padrão de fluxo. 3. Vazão.  
4. Tremonha retangular. I. Moraes Junior, Deovaldo de.  
II. Moraes, Marlene Silva de. III. Características de  
Fluxo e vazão de soja em silos prismáticos com tremonhas  
retangulares cuneiformes.

## DEDICATÓRIA

“Dedico este trabalho primeiramente aos meus Pais, Luiz C. Cardoso e Ivone L.S Cardoso, que em todo tempo me ensinou a ser gente e humano, pela educação que me deram, pelo exemplo de Papai ou a dedicação da Mamãe. No exemplo do Papai batalhador que rompia madrugadas em sua oficina improvisada, Ele, seu copo de café, instrumentos de medição e esquemáticos eletrônicos, **Ele me ensinou que é possível sonhar.** No exemplo da Mamãe que sempre buscou fazer o melhor para sua família de quatro filhos. Eu vi todo seu empenho e dedicação, vejo seu amor, **Ela me ensinou a sonhar com amor.**

Dedico também a minha esposa Thais L.S Cardoso que me apoiou nesta jornada, me dando forças e energia para prosseguir e a não desistir jamais. Ela me ensinou que não perdemos, a não ser que antes desistamos dos nossos sonhos. **Ela me ensinou a jamais desistir dos sonhos.** Ao meu filho Arthur S. Cardoso pela compreensão madura ainda na sua infância, nos dias em que era necessário estudar Ele me dizia “vai lá Papai”, **Ele me permitiu continuar sonhando.**

Dedico a toda minha família, e agradeço pelo exemplo, todos vocês são exemplos de que **sonhos se realizam.**

Dedico a Deus e ao Senhor Jesus Cristo que me iluminou e fez-me pensado em sua Graça, e que derramou de sua Dádiva e Dom perfeito para compreensão destas coisas, e que **tornou este sonho uma realidade”**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus orientadores e amigos Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marlene Silva de Moraes e Prof. Dr. Vitor da Silva Rosa, por toda a paciência e apoio no desenvolvimento deste trabalho, sobretudo pelos exemplos de ser humano e humildade.

Ao Terminal XXXIX de Santos S/A, aos Gerentes Ademilson Vitorino, Sérgio Santos e Marcos Silva, aos Diretores Antônio Ismael Ballan e Joaquim Sepulveda por investirem e acreditarem em meu potencial, também devo a vocês esta conquista!

A toda Equipe do Terminal XXXIX de Santos S/A, em particular as de manutenção que contribuíram muito no desenvolvimento experimental.

À todas as equipes do laboratório de operações unitárias, em especial ao meu amigo Volnei de Lemos por todo o suporte.

Ao meu companheiro de pesquisa de campo e fabricação da unidade experimental Jovêncio José de Sousa Filho, amigo e excelente Profissional com quem aprendo muito todos os dias.

À Universidade Santa Cecília e ao Prof. Dr. Felipe Bertelli, pelo privilégio de poder ingressar no programa de Mestrado em Engenharia mecânica.

“Ainda que eu falasse a língua dos homens e dos anjos, sem amor, seria como o metal que soa ou como o sino que tine. E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios da ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, eu nada seria”

(Apóstolo Paulo)

## RESUMO

Silo é a principal unidade de armazenamento de grãos disponível no Brasil e representa 48,3% da capacidade Nacional. Segundo o (IBGE) o Brasil retoma dos Estados Unidos a posição de maior produtor de soja do mundo em 2020. Consequentemente, ocorrências com silo são registradas e as principais causas são colapso por falha no projeto estrutural, falta de manutenção e obstrução de fluxo. Acidentes fatais por soterramento devido a intervenções manuais de trabalhadores no interior de silos ainda são comuns no Brasil e podem ser evitados pelo adequado manuseio e projeto de fluxo. A caracterização do padrão de fluxo e vazão dos produtos granulares é essencial para o projeto de silos destinados ao seu armazenamento. A definição do padrão de fluxo no interior de um silo é o primeiro estágio do projeto e deve ser precedido pela caracterização física dos grãos. A determinação das propriedades físicas dos produtos granulares podem ser obtidas a partir de tabelas disponíveis em normas ou determinados em testes padronizados. As normas internacionais e estrangeiras apresentam gráficos para a determinação da ocorrência dos padrões de fluxo no interior de um silo a partir de tremonhas do tipo cônicas e retangulares, porém contendo áreas de incerteza e diferenças entre si. O presente trabalho teve por objetivo quantificar experimentalmente o fluxo e a vazão de soja em um silo prismático com tremonha retangular, considerando a área de incerteza da norma (EUROCODE, 2006). Os resultados obtidos pela norma apresentaram padrão de fluxo mássico e vazão de 0.23 Kg/s para inclinação da parede da tremonha em 37.5° e fluxo funil entre 45 e 67.5° com vazão entre 0.158 e 0.118 Kg/s respectivamente. A predição de fluxo pela norma EUROCODE apresentou exatidão somente para os fluxos mássico e funil em 37, 5 e 67, 5°.

Palavras-chave: Silo prismático; Silo retangular; características de fluxo; tremonhas retangulares; produtos granulares; Eurocode.

## ABSTRACT

Silo is the main grain storage unit available in Brazil and represents 48.3% of the national capacity. According to (IBGE), Brazil resumes from the United States the position of the largest soybean producer in the world in 2020. Consequently, occurrences with silo are registered and the main causes are collapse due to failure in the structural design, lack of maintenance and flow obstruction. Fatal burial accidents due to manual interventions by workers inside silos are still common in Brazil and can be avoided by proper handling and flow design.

The characterization of the flow and flow pattern of granular products is essential for the adequate design of silos for their storage. The definition of the flow pattern inside a silo is the first stage of the project and must be preceded by the physical characterization of the grains. The determination of the physical properties of granular products can be obtained from tables available in standards or determined in standardized tests. International and foreign standards present graphs for determining the occurrence of flow patterns within a silo from conical and rectangular hoppers, but containing areas of uncertainty and differences between them. The present work aimed to experimentally quantify the flow and flow of soybeans in a prismatic silo with a rectangular hopper, considering the area of uncertainty of the standard (EUROCODE, 2006). The results obtained corroborate the norm and presented a mass flow pattern and a flow rate of 0.23 Kg / s for the hopper wall inclination at 37.5° and a funnel flow between 45 and 67.5° with a flow between 0.158 and 0.118 Kg / s respectively. The flow prediction by the EUROCODE standard showed accuracy only for the mass and funnel flows at 37, 5 and 67, 5°.

Keywords: Prismatic silo; Rectangular silo; flow characteristics; rectangular hoppers; granular products; Eurocode.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1-</b> Total da capacidade útil dos silos por Grande Região.....                                                                                                                                     | 18 |
| <b>Figura 2-</b> Colapso de silos. (a) México, (b) Brasil.....                                                                                                                                                 | 19 |
| <b>Figura 3-</b> Acidentes com silos (a, b) colapso de silos por falha estrutural.....                                                                                                                         | 20 |
| <b>Figura 4-</b> Acidente com silo. (a) deformação inicial, (b) rompimento, (c) colapso estrutural e formação de atmosfera explosiva pela poeira em suspensão e (d) explosão.....                              | 20 |
| <b>Figura 5-</b> Poeira de farelo de soja em suspensão durante descarga de caminhão em moega rodoviária.....                                                                                                   | 21 |
| <b>Figura 6-</b> Estudo de classificação de área 3D.....                                                                                                                                                       | 21 |
| <b>Figura 7-</b> Poeira em combustão sobre superfície aquecida.....                                                                                                                                            | 22 |
| <b>Figura 8-</b> Equipamentos para ensaio da EMI (Mike 3).....                                                                                                                                                 | 23 |
| <b>Figura 9-</b> Explosão na Imperial sugar, Estados Unidos.....                                                                                                                                               | 23 |
| <b>Figura 10-</b> Condições de risco, (a) moegueiro, (b) trabalhos em pátio de minério.....                                                                                                                    | 24 |
| <b>Figura 11-</b> Registros fotográficos de resgate de vítima fatal. (a) interior do silo, (b) exterior do silo.....                                                                                           | 25 |
| <b>Figura 12-</b> Produtos granulares. (a) soja, (b) arroz, (c) feijão, (d) milho.....                                                                                                                         | 26 |
| <b>Figura 13-</b> Representação do critério de Mohr.....                                                                                                                                                       | 28 |
| <b>Figura 14-</b> Representação do critério de ruptura de Coulomb.....                                                                                                                                         | 29 |
| <b>Figura 15-</b> Representação do critério de ruptura de Mohr-Coulomb.....                                                                                                                                    | 29 |
| <b>Figura 16-</b> Representação do lugar geométrico de deslizamento .....                                                                                                                                      | 30 |
| <b>Figura 17-</b> Aparelho de cisalhamento de Jenike, modelo TSG 70-140. (a) vista superior, (b) vista lateral. ....                                                                                           | 30 |
| <b>Figura 18-</b> Esquema aparelho de cisalhamento de Jenike, modelo TSG 70-140. (a) célula de Jenike, (b) massa para aplicação de força normal, (c) eixo força cisalhante, (d) conjunto eletromecânico. ....  | 31 |
| <b>Figura 19-</b> Célula de cisalhamento direto de Jenike. (a) anel fixo, (b) força de cisalhamento, (c) suporte, (d) tampa, (e) força normal, (f) amostra do material granular, (g) anel móvel, (h) base..... | 32 |
| <b>Figura 20-</b> Representação dos ângulos de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno no diagrama de tensões.....                                                                                   | 32 |
| <b>Figura 21-</b> Banco de consolidação. (a) peso, (b) capa, (c) célula de Jenike.....                                                                                                                         | 33 |
| <b>Figura 22-</b> Representação do critério de ruptura com a influência do tempo .....                                                                                                                         | 33 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 23-</b> Célula de cisalhamento direto de Jenike. (a) força de cisalhamento, (b) suporte, (c) amostra do material granular, (d) força normal, (e) tampa, (f) anel, (g) amostra do material constitutivo da parede.....                                                                                                                                                                          | 34 |
| <b>Figura 24-</b> Curva do teste de cisalhamento direto (a) regime permanente, (b) pontos medidos, (c) lugar geométrico do deslizamento na parede, (d) ângulo de atrito do produto com a parede.....                                                                                                                                                                                                     | 34 |
| <b>Figura 25 -</b> Vista geral da pilha de farelo de soja NGMO. E o ângulo de repouso a 0, 6 m do solo.....                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 35 |
| <b>Figura 26-</b> Previsão da capacidade estática e inclinação da cobertura de um armazém graneleiro. a) pilha de grão, b) cobertura, c) ângulo de repouso com inclinação de 35° e d) parede de contenção.....                                                                                                                                                                                           | 36 |
| <b>Figura 27-</b> Projeto de capacidade estática e inclinação da cobertura de silo vertical. a) cobertura, b) ângulo de repouso do produto armazenado, c) grãos e d) corpo do silo...                                                                                                                                                                                                                    | 36 |
| <b>Figura 28-</b> Esboço do equipamento A. 1) placa frontal de policarbonato transparente; 2) placa lateral em poliuretano de ultra alto peso molecular; 3) material granular retido; 4) base de retenção plana; 5) nível; 6) goniômetro; 7) bocal de descarga; 8) placa de fundo em poliuretano de ultra alto peso molecular.....                                                                       | 37 |
| <b>Figura 29-</b> Equipamento B. 1) ajuste de inclinação; 2) caçamba inclinável; 3) placa de fundo em polietileno de ultra alto peso molecular; 4) placa frontal em poliuretano transparente; 5) placa lateral em polietileno de ultra alto peso molecular; 6) Material granular estagnado; 7) nível; 8) goniômetro; 9) válvula guilhotina de abertura e fechamento de fluxo; 10) bocal de descarga..... | 37 |
| <b>Figura 30-</b> Sistema para medição do ângulo de repouso em pilhas reais.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 38 |
| <b>Figura 31-</b> Ângulos de repouso do farelo de soja nas pilhas reais.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 38 |
| <b>Figura 32-</b> Curva de variação da densidade do carvão.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 39 |
| <b>Figura 33-</b> Condições de fluxo dos materiais granulares em estado consolidado.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 40 |
| <b>Figura 34-</b> Estado do farelo de soja após período de consolidação.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 40 |
| <b>Figura 35-</b> Tipos de silos. (a) elevados de madeira, (b) multicelulares poligonais, (c) elevados, (d) pré- moldados de concreto, (e) em tela metálica e tecido, (f) horizontal semi-subterrâneo.....                                                                                                                                                                                               | 41 |
| <b>Figura 36-</b> Silos metálicos. (a) prismático com tremonha cuneiforme, (b) cilíndrico com tremonha tipo cinzel.....                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 42 |
| <b>Figura 37-</b> Tipos de tremonha. (a) transição, (b) bisel , (c) piramidal, (d) quadrada, (e) cônica , (f) cunha.....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 43 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 38-</b> Tipos de tremonha. (a) transição, (b) bisel , (c) piramidal, (d) quadrada, (e) cônica , (f) cunha.....                                                                                                                                                                                                              | 43 |
| <b>Figura 39-</b> Tipos de obstruções de fluxo, (a) arco mecânico, (b) arco coesivo, (c) efeito tubo .....                                                                                                                                                                                                                            | 44 |
| <b>Figura 40-</b> Medida da saída da boca de descarga, (a) quadrada, (b) retangular, (c) circular.....                                                                                                                                                                                                                                | 45 |
| <b>Figura 41-</b> Padrões de fluxo. (a) mássico, (b) funil.....                                                                                                                                                                                                                                                                       | 47 |
| <b>Figura 42-</b> Padrões de fluxo para tremonhas retangulares.....                                                                                                                                                                                                                                                                   | 48 |
| <b>Figura 43-</b> Predição dos fluxos pela norma.....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 49 |
| <b>Figura 44-</b> Esquemático da unidade experimental.....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 49 |
| <b>Figura 45-</b> Fotografia da unidade experimental.....                                                                                                                                                                                                                                                                             | 50 |
| <b>Figura 46-</b> Dispositivos de fixação. Dispositivos de fixação. (a) abertura da boca de descarga; (b, c) inclinação das paredes da tremonha.....                                                                                                                                                                                  | 50 |
| <b>Figura 47-</b> Ajuste do bocal de descarga. (a) dispositivo para o ajuste da abertura superior e inferior da tremonha, (b) dispositivo de ajuste de inclinação das paredes, (c) dispositivo de fixação dos ajustes do corpo do silo, (d) dispositivo de fixação dos ajustes de abertura e inclinação da tremonha , (e) escada..... | 51 |
| <b>Figura 48-</b> Ajuste de inclinação das paredes da tremonha. (a) dispositivo de ajuste da inclinação das paredes da tremonha, (b) dispositivo de fixação dos ajustes de inclinação das paredes da tremonha, (c) dispositivo de ajuste da abertura inferior e superior da tremonha, (d) goniômetro.....                             | 51 |
| <b>Figura 49-</b> Instrumentos utilizados. (a) Goniômetro, (b) Paquímetro.....                                                                                                                                                                                                                                                        | 52 |
| <b>Figura 50-</b> Equipamentos utilizados. (a) Medidor digital, (b) cronômetro digital, (c) balança semi-analítica.....                                                                                                                                                                                                               | 52 |
| <b>Figura 51-</b> Índice de enchimento do silos durante o descarregamento à 37, 5°.....                                                                                                                                                                                                                                               | 53 |
| <b>Figura 52-</b> Índice de enchimento do silos durante o descarregamento à 45°.....                                                                                                                                                                                                                                                  | 54 |
| <b>Figura 53-</b> Índice de enchimento do silos durante o descarregamento à 52,5°.....                                                                                                                                                                                                                                                | 55 |
| <b>Figura 54-</b> Índice de enchimento do silos durante o descarregamento à 60°.....                                                                                                                                                                                                                                                  | 56 |
| <b>Figura 55-</b> Índice de enchimento do silos durante o descarregamento à 67,5°.....                                                                                                                                                                                                                                                | 56 |
| <b>Figura 56-</b> Efeito da inclinação das paredes sobre a vazão e padrão de fluxo.....                                                                                                                                                                                                                                               | 58 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1-</b> Número de estabelecimentos e capacidade útil instalada.....            | 17 |
| <b>Tabela 2-</b> Quantidade de silos e capacidade de armazenamento útil por região..... | 19 |
| <b>Tabela 3-</b> Histórico regional de incêndios e explosões envolvendo poeira.....     | 24 |
| <b>Tabela 4-</b> Propriedades físicas da soja.....                                      | 27 |
| <b>Tabela 5 -</b> Classificação de fluidez dos materiais granulares.....                | 38 |
| <b>Tabela 6-</b> Classificação do tipo de silos pela relação (H/D).....                 | 42 |
| <b>Tabela 7-</b> Limites operacionais do aparelho.....                                  | 50 |
| <b>Tabela 8-</b> Padrão de fluxo previsto por norma.....                                | 53 |
| <b>Tabela 9-</b> Ocorrência de fluxo à 37, 5°.....                                      | 54 |
| <b>Tabela 10-</b> Ocorrência de fluxo à 45°.....                                        | 54 |
| <b>Tabela 11-</b> Ocorrência de fluxo à 52,5°.....                                      | 55 |
| <b>Tabela 12-</b> Ocorrência de fluxo à 60°.....                                        | 56 |
| <b>Tabela 13-</b> Ocorrência de fluxo à 67, 5°.....                                     | 56 |
| <b>Tabela 14-</b> Resultados previstos pela norma e resultados experimentais.....       | 57 |
| <b>Tabela 15-</b> Resumo dos resultados.....                                            | 58 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Quadro 1-</b> Determinação de superfície de parede.....              | 27 |
| <b>Quadro 2-</b> Vantagens e desvantagens para os padrões de fluxo..... | 47 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EUROCODE - Norma de responsabilidade do Comité Europeu de Normalização TC250

Terminal XXXIX - Terminal portuário localizado em Santos/SP.

UHMW - Polietileno de ultra-alto peso molecular

IBGE - Instituto brasileiro de geografia e estatística

CONAB - Comissão nacional de abastecimento

CONPAT - Campanha Nacional de Prevenção de Acidentes do Trabalho

kN/ m<sup>3</sup> - Unidade de medida de densidade em Kilo-Newton por metro cúbico

kg/ s - Unidade de medida de vazão em quilograma por segundo

Øm - Ângulo inclinação da parede da tremonha com a vertical

H/D - Relação da altura e diâmetro/ diagonal do corpo do silos

Øe- Efetivo ângulo de atrito interno no produto

Øi- Ângulo de atrito interno do produto

Øw- Ângulo de atrito do produto com a parede

## SUMÁRIO

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1- INTRODUÇÃO.....                                                                                  | 17 |
| 1.1-GENERALIDADES.....                                                                              | 17 |
| 1.1.1- Acidentes com silos.....                                                                     | 19 |
| 1.1.2- Colapsos estruturais.....                                                                    | 21 |
| 1.1.3- Riscos envolvidos no armazenamento e manuseio de grãos.....                                  | 21 |
| 1.1.4- Temperatura de ignição de camada de pó.....                                                  | 22 |
| 1.1.5- Energia mínima de ignição de nuvem de pó.....                                                | 22 |
| 1.1.6-Acidentes envolvendo poeiras combustíveis em silos de grãos.....                              | 23 |
| 1.1.7- Problemas de fluxo.....                                                                      | 24 |
| 1.2- OBJETIVOS.....                                                                                 | 25 |
| 1.2.1-Objetivo geral.....                                                                           | 25 |
| 1.2.2- Objetivos específicos.....                                                                   | 26 |
| 2- FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....                                                                        | 26 |
| 2.1- Produtos granulares.....                                                                       | 26 |
| 2.1.1- Propriedades físicas dos produtos granulares.....                                            | 26 |
| 2.2- Teoria de Jenike e Johanson.....                                                               | 27 |
| 2.2.1- Célula e ensaio de cisalhamento direto de Jenike.....                                        | 30 |
| 2.2.2- Efetivo ângulo de atrito ( $\phi_e$ ) e ângulo de atrito interno dos grãos ( $\phi_i$ )..... | 31 |
| 2.2.3-Ângulo de atrito do produto com a parede ( $\phi_w$ ).....                                    | 34 |
| 2.3- Influencia nas propriedades físicas dos grãos.....                                             | 35 |
| 2.3.1- Ângulo de repouso ( $\phi_r$ ).....                                                          | 35 |
| 2.3.2- Peso específico.....                                                                         | 39 |
| 2.3.3- Compressividade.....                                                                         | 39 |
| 2.4-Silos.....                                                                                      | 41 |
| 2.4.1-Tipos de silos.....                                                                           | 41 |
| 2.4.2- Classificação de silos.....                                                                  | 42 |
| 2.5- Tremonhas.....                                                                                 | 43 |
| 2.5.1- Tipos de tremonhas de descarga.....                                                          | 43 |
| 2.5.2- Inclinação das paredes das tremonhas.....                                                    | 43 |
| 2.5.3- Abertura mínima da boca de descarga da tremonha.....                                         | 44 |
| 2.5.4- Potencial de vazão de descarga.....                                                          | 45 |

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.6- Padrão de fluxo.....                                                                                                                         | 47 |
| 2.6.1- Determinação do padrão de fluxo.....                                                                                                       | 48 |
| 3- MATERIAL E MÉTODOS.....                                                                                                                        | 49 |
| 4- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                                                                                                    | 53 |
| 4.1- Padrão de fluxo.....                                                                                                                         | 53 |
| 4.2- Efeito da inclinação das paredes sobre a vazão e padrão de fluxo.....                                                                        | 58 |
| 5- CONCLUSÃO.....                                                                                                                                 | 59 |
| 5.1-Sugestão para trabalhos futuros.....                                                                                                          | 59 |
| REFERÊNCIAS UTILIZADAS.....                                                                                                                       | 60 |
| APÊNDICE A1- Artigo publicado.....                                                                                                                | 63 |
| APÊNDICE A2- Aferição e cálculo do diâmetro médio dos grãos de soja.....                                                                          | 81 |
| APÊNDICE A3- Cálculo da inclinação mínima da parede da tremonha.....                                                                              | 83 |
| APÊNDICE A4- Dimensionamento da abertura mínima da boca de descarga.....                                                                          | 84 |
| APÊNDICE B1- Estudo da abertura mínima de descarga e padrão de fluxo ocorrente com geometrias cônicas e retangulares e grãos entre 2 e 19 mm..... | 85 |
| APÊNDICE B2-Análise do efeito da inclinação das paredes da tremonha sobre a vazão de descarga utilizando esferas de vidro de 17 e 18 mm.....      | 87 |
| ANEXO 1-Tabela E.1:EUROCODE: Propriedades dos particulados sólidos.....                                                                           | 88 |
| ANEXO 2- Anexo F: EUROCODE: Determinação do padrão de fluxo.....                                                                                  | 89 |
| ANEXO 3- Tabela 4.1:EUROCODE: Definição de superfície da parede.....                                                                              | 90 |



## 1- INTRODUÇÃO

### 1.1- GENERALIDADES

Segundo pesquisa realizada pelo instituto brasileiro de geografia e estatística (IBGE) [1], o Brasil armazenou 169,5 milhões de toneladas de grãos no segundo semestre de 2018, sendo que o estoque de produtos granulares agrícolas totalizou 24,2 milhões de toneladas, indicando forte potencial agrícola Nacional.

De acordo com o boletim publicado pela comissão nacional de abastecimento CONAB [2], houve crescimento de 6,4 % na safra de grãos, passando de 227,7 milhões em 2017/18 para 242,1 milhões de toneladas na safra 2018/19 devido à maior produção de algodão e milho. A soja teve crescimento de 2,1% na área de plantio e redução de 3,6% na produção, atingindo 115 milhões de toneladas.

Das unidades de armazenamento e conservação disponíveis como área útil para armazenamento de produtos granulares de origem agrícola no Brasil, há predominância dos silos, alcançando 81,8 milhões de toneladas no segundo semestre de 2018, representando 48,3% da capacidade útil nacional (Tabela 1).

**Tabela 1:** Número de estabelecimentos e capacidade útil instalada, por tipo, segundo as unidades da federação - Brasil - 2º semestre 2018.

| UF            | Número de Estabelecimentos | Capacidade (t) |                  |            |            |
|---------------|----------------------------|----------------|------------------|------------|------------|
|               |                            | Total          | Convencional (1) | Graneleiro | Silo       |
| <b>BRASIL</b> | 7.789                      | 169.469.182    | 23.960.569       | 63.681.754 | 81.826.859 |
| <b>RO</b>     | 26                         | 310.234        | 86.974           | 134.300    | 88.960     |
| <b>AC</b>     | 14                         | 38.124         | 15.434           | -          | 22.690     |
| <b>AM</b>     | 10                         | 352.162        | 25.140           | 300.000    | 27.022     |
| <b>RR</b>     | 6                          | 90.860         | 12.110           | -          | 78.750     |
| <b>PA</b>     | 70                         | 1.114.236      | 172.126          | 91.810     | 850.300    |
| <b>AP</b>     | 10                         | 128.168        | 66.168           | -          | 62.000     |
| <b>TO</b>     | 87                         | 2.163.133      | 363.288          | 619.640    | 1.180.205  |
| <b>MA</b>     | 61                         | 2.143.146      | 78.853           | 1.600.250  | 464.043    |
| <b>PI</b>     | 110                        | 2.351.656      | 264.675          | 807.382    | 1.279.599  |
| <b>CE</b>     | 80                         | 1.038.542      | 636.535          | 79.400     | 322.607    |
| <b>RN</b>     | 14                         | 100.109        | 100.109          | -          | -          |
| <b>PB</b>     | 13                         | 240.228        | 105.698          | 2.480      | 132.050    |

(continua)

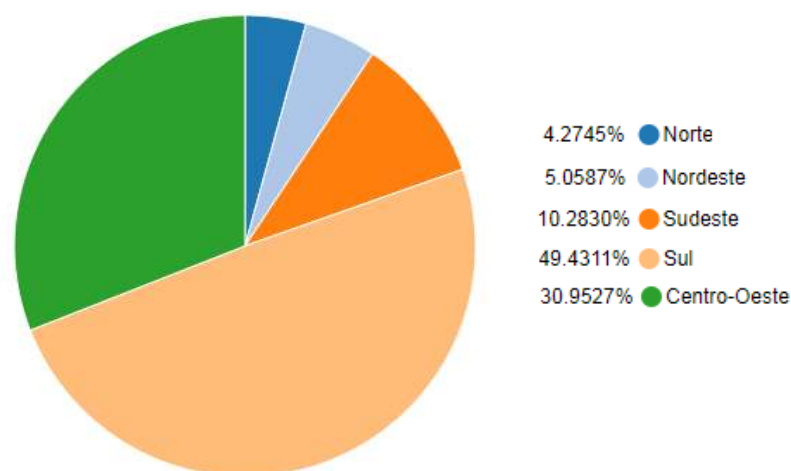
**Tabela 1:** Número de estabelecimentos e capacidade útil instalada, por tipo, segundo as unidades da federação - Brasil - 2º semestre 2018. (Continuação).

| UF            | Número de Estabelecimentos | Capacidade (t) |                  |            |            |
|---------------|----------------------------|----------------|------------------|------------|------------|
|               |                            | Total          | Convencional (1) | Graneleiro | Silo       |
| <b>BRASIL</b> | 7.789                      | 169.469.182    | 23.960.569       | 63.681.754 | 81.826.859 |
| <b>PE</b>     | 28                         | 409.802        | 160.472          | 40         | 249.290    |
| <b>AL</b>     | 6                          | 55.004         | 17.504           | 3.000      | 34.500     |
| <b>SE</b>     | 10                         | 94.128         | 31.688           | 16.440     | 46.000     |
| <b>BA</b>     | 163                        | 4.025.758      | 497.812          | 1.858.304  | 1.669.642  |
| <b>MG</b>     | 487                        | 8.560.301      | 3.607.507        | 1.617.228  | 3.335.566  |
| <b>ES</b>     | 76                         | 1.257.181      | 687.107          | 442.050    | 128.024    |
| <b>RJ</b>     | 23                         | 342.516        | 216.570          | 12.333     | 113.613    |
| <b>SP</b>     | 676                        | 11.498.011     | 3.905.875        | 2.304.706  | 5.287.430  |
| <b>PR</b>     | 1.315                      | 31.275.556     | 3.866.152        | 10.110.681 | 17.298.723 |
| <b>SC</b>     | 324                        | 5.312.320      | 588.502          | 1.013.264  | 3.710.554  |
| <b>RS</b>     | 1.925                      | 31.797.275     | 3.064.261        | 8.083.783  | 20.649.231 |
| <b>MS</b>     | 480                        | 10.074.143     | 514.619          | 3.669.384  | 5.890.140  |
| <b>MT</b>     | 1.238                      | 39.789.052     | 3.425.582        | 22.964.155 | 13.399.315 |
| <b>GO</b>     | 515                        | 14.421.915     | 1.101.646        | 7.921.344  | 5.398.925  |
| <b>DF</b>     | 22                         | 485.622        | 348.162          | 29.780     | 107.68     |

**Fonte:** Adaptado de IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Pesquisa de Estoques, 2º semestre de 2018

Ainda conforme o (IBGE) o Brasil retoma dos Estados Unidos a posição de maior produtor de soja do mundo, apesar do enfrentamento a pandemia do covid-19. No total, o Brasil deverá colher um recorde de 247,4 milhões de toneladas de grãos na safra que se encerra em 2020. É mostrado na Figura 1 a distribuição percentual do total da capacidade útil dos silos por região e na Tabela 2.

**Figura 1:** Total da capacidade útil dos silos por Grande Região. **Fonte:** IBGE, 2º semestre 2019.



**Tabela 2:** Quantidade de silos e capacidade de armazenamento útil por região Brasileira.

| Regiões      | Unidades | Capacidade útil (t) |
|--------------|----------|---------------------|
| Brasil       | 5 900    | 86 578 296          |
| Sul          | 3 004    | 42 796 622          |
| Centro-Oeste | 1 840    | 26 798 294          |
| Sudeste      | 643      | 8 902 845           |
| Nordeste     | 254      | 4 379 755           |
| Norte        | 159      | 3 700 780           |

**Fonte:** Adaptado de IBGE, 2º semestre 2019.

### 1.1.1- Acidentes com silos

Um levantamento inédito realizado pela BBC News Brasil [3] revelou que pelo menos 106 pessoas morreram em silos agrícolas no país na última década, sendo a maioria por soterramento. O ano de 2017 foi o de maior incidência com 24 mortes.

### 1.1.2- Colapsos estruturais

As falhas mais comuns de acidentes em estruturas de silos no Brasil são devidas a erros de projeto e execução do projeto, operação inadequada e deficiência ou ausência de manutenção preventiva [4].

Falhas decorrentes do incorreto dimensionamento dos elementos metálicos e de concreto, operações incorretas, falta de informações das propriedades físicas dos produtos armazenados por parte dos projetistas e a influência da umidade são alguns exemplos mais evidenciados nos estudos de causa realizados por CHEUNG. et al. [5], conforme é apresentado na Figura 2 e 3.



**Figura 2:** Colapso de silos. (a) no porto de vera cruz, (b) Brasil. **Fontes:** Google, 2019, CONPAT, 2015.



(a)



(b)

**Figura 3:** Acidentes com silos (a, b) colapso de silos por falha estrutural. Fonte: Google, 2020.

Colapsos estruturais de silos podem evoluir para explosões causadas pela nuvem de poeira em contato com fontes de ignição (Figura 4).



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 4:** Acidente com silo. (a) deformação inicial, (b) rompimento, (c) colapso estrutural e formação de atmosfera explosiva pela poeira em suspensão e (d) explosão. Fonte: Google, 2020.

### 1.1.3- Riscos envolvidos no armazenamento e manuseio de grãos

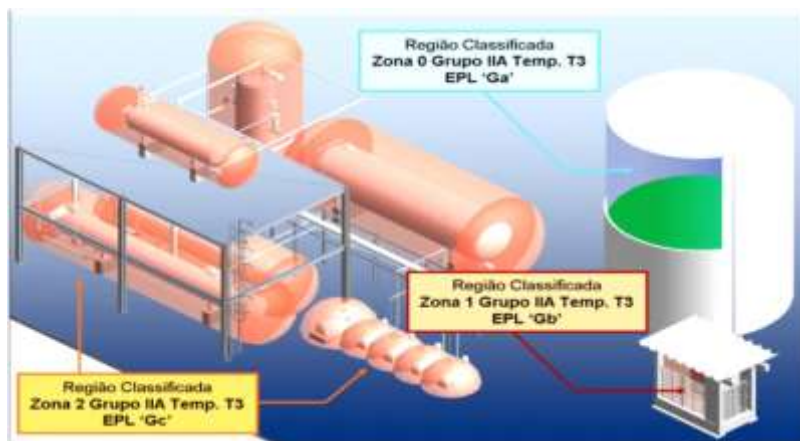
Poeiras combustíveis são partículas sólidas finas (500  $\mu\text{m}$  ou menos) susceptíveis a formação de misturas explosivas quando em suspensão ou a queima quando do acúmulo em camada. No manuseio dos grãos há geração de atmosferas explosivas pela formação de nuvens de poeira e a deposição das partículas finas (pó) sobre as superfícies, (Figura 5).



**Figura 5:** Poeira de farelo de soja em suspensão durante descarga de caminhão em moega rodoviária.

A atmosfera explosiva é formada pela mistura com o ar de substâncias combustíveis na forma de gases, vapores, névoas, poeiras ou fibras. Área classificada define-se como sendo todo local sujeito a existência ou a probabilidade da formação de atmosfera explosiva.

Para a segurança de pessoas e instalações o projeto de unidades destinadas ao manuseio de substâncias combustíveis devem ser precedidos do estudo de área classificada, que consiste em um método de análise para a classificação do ambiente explosivo (Figura 6), caracterizado pela norma brasileira por zonas, grupos e subgrupos [6].



**Figura 6:** Estudo de classificação de área em 3D. Fonte: Bullgareli (2017).

É imprescindível na elaboração do estudo de área classificada a apresentação da ficha de informação de segurança do produto químico (FISPQ) e a determinação de pelo menos duas variáveis do material, isto é, a temperatura de ignição de camada e a energia mínima de ignição.

#### 1.1.4- Temperatura de ignição de camada de pó

A temperatura de ignição de camada é a menor temperatura na qual uma camada de poeira inflama quando em contato com uma superfície aquecida, como por exemplo projetores, luminárias, motores elétricos ou a combustão.

O ensaio de inflamação de pós em camada consiste em determinar a menor temperatura em graus ( $^{\circ}$ ) para ignizar uma camada de pós em repouso sobre uma superfície [7], (Figura 7).



**Figura 7:** Poeira em combustão sobre superfície aquecida. Fonte: Cetac (2016).

#### 1.1.5- Energia mínima de ignição de nuvem de pó (EMI)

Define-se energia mínima de ignição como sendo a energia necessária para ignizar a mistura inflamável, por exemplo arco elétrico gerado por curto circuito.

No ensaio para determinação da energia mínima de ignição de uma nuvem, a poeira é lançada em forma de nuvem em direção a uma fonte de ignição.

O equipamento utilizado para determinação do (EMI) esta apresentado na Figura 8.





**Figura 8:** equipamento para ensaio da EMI (Mike 3). Fonte: Cetac (2016).

Os equipamentos eletromecânicos empregados em instalações contendo a presença de atmosferas explosivas devem ser adequados quanto ao tipo, nível, grau de proteção e temperatura máxima de superfície [8].

#### 1.1.6- Acidentes envolvendo poeiras combustíveis em silos de grãos

Conforme o relatório da C.S.B (Chemical Safety Board) [9] houveram 82 explosões envolvendo poeiras combustíveis no período de janeiro de 2006 a julho de 2009 no Estados Unidos. Um dos mais graves acidentes registrados ocorreu em 7 de fevereiro de 2008 na fábrica imperial sugar, com 14 mortos e 38 feridos, (Figura 9).



**Figura 9:** Explosão na Imperial Sugar, Estados Unidos. Fonte: U.S. Chemical Safety Board, 2009.

Nos últimos sete anos onze acidentes envolvendo poeiras combustíveis ocorreram no país, sendo três considerados de grande proporção (Tabela 3).

**Tabela 3:** Histórico regional de incêndios e explosões envolvendo poeiras

| Empresa                  | Data da ocorrência |
|--------------------------|--------------------|
| Tgrão Cargo              | 14/04/2013         |
| Coopersucar              | 18/10/2013         |
| Rumo Logística           | 11/02/2014         |
| Rumo Logística           | 03/08/2014         |
| Teag                     | 20/10/2014         |
| Ultracargo               | 02/04/2015         |
| Tgrão Cargo              | 08/02/2016         |
| Localfrio                | 15/01/2016         |
| Rumo Logisitca           | 14/07/2016         |
| VLI – Vale Fertilizantes | 05/01/2017         |
| Cutrale                  | 27/11/2019         |

Fonte: Google (2020).

#### 1.1.7- Problemas de fluxo

A falha no dimensionamento de um silo pode provocar o incorreto funcionamento e até acidentes fatais, como os ocorridos na ultima década devido a intervenções operacionais manuais dos trabalhadores para desobstrução forçada das vias de fluxo. É necessário antecipar problemas de fluxo durante as fases de projeto [10] de modo a evitar a exposição dos trabalhadores a riscos ocupacionais e acidentes, conforme ilustra- se na Figura 10.



(a)



(b)

**Figura 10:** Condições de risco, (a) moegueiro, (b) operador de pátio. Fonte: Google (2020).



Não são raros os registros de morte por soterramento em silos, o mais atual ocorreu em 10/08/2020 as 9: 50hs, numa empresa de armazém de grãos situado na MT-242, sentido Nova Ubiratã, na cidade de Sorriso/MT. Visando a desobstrução de fluxo a vítima de 39 anos de idade foi soterrada pelos grãos.



**Figura 11:** Registros fotográficos de resgate de vítima fatal. (a) interior do silo, (b) exterior do silo.  
Fonte: <https://r9news.com.br/>. Acesso em 11/08/2020 as 22:20 hs.

É possível observar pela Figura 11 a presença de zonas de estagnação dos grãos e acentuado ângulo de repouso da soja, indicando consolidação pelo tempo de armazenamento. Nota-se que o plugue de ligação elétrica do motor da rosca varredora (responsável pela desobstrução de fluxo e esvaziamento total do silo) é interno ao silo, obrigando o acesso de Pessoas para conexão.

## 1.2- OBJETIVOS

### 1.2.1- Objetivo geral

Este trabalho teve por objetivo geral caracterizar experimentalmente os padrões de fluxo e vazão dos grãos de soja em silos verticais prismáticos com tremonhas retangulares do tipo cuneiformes.

### 1.2.2- Objetivos específicos

Esta pesquisa teve como objetivos específicos:

- a) Determinar experimentalmente os padrões de fluxo da soja, para os ângulos de inclinação da tremonha de descarga em 37.5, 45, 52.5, 60 e 67.5°(graus).
- b) Comparar os resultados obtidos através da norma EUROCODE com os resultados experimentais.
- c) Obter curvas dos padrões de fluxo em função dos ângulos de inclinação de das paredes da tremonha e vazão de descarga;
- d) Estudar a influência da inclinação das paredes sobre o padrão de fluxo e vazão.

## 2- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1- Produtos granulares

Produto granular é todo aquele de origem industrial ou agrícola semelhante a grão e ou que apresenta uma estrutura composta por grânulos [11], (Figura 12).



**Figura 12:** Produtos granulares. (a) soja, (b) arroz, (c) feijão, (d) milho.

#### 2.1.1- Propriedades físicas dos produtos granulares.

A determinação das propriedades físicas dos produtos granulares é o primeiro passo para o projeto de fluxo e estrutural de silos, podendo ser obtidas a partir de tabelas disponíveis em normas ou determinados em testes padronizados.

Por ser a soja um produto comum no meio agrícola, as suas propriedades físicas estão descritas em norma [12], conforme Tabela 4.

**Tabela 4:** Propriedades físicas da soja.

|                | Peso específico ( $\gamma$ )<br>(kN/m <sup>3</sup> ) |     | Atrito interno ( $\phi_i$ )<br>Graus Fator |      | Coeficiente de atrito com a parede ( $\mu$ )<br>$\mu = \tan \phi_w$ |      |      |      |
|----------------|------------------------------------------------------|-----|--------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------|------|------|------|
|                | Min                                                  | Máx | (°)                                        | -    | D1                                                                  | D2   | D3   | -    |
| <b>Produto</b> |                                                      |     |                                            |      |                                                                     |      |      |      |
| <b>Soja</b>    | 7                                                    | 8   | 25                                         | 1,16 | 0,24                                                                | 0,38 | 0,48 | 1,16 |

Nota: Essas propriedades podem ser adequadas para pequenas instalações. No entanto, levarão a projetos muito econômicos para grandes silos, e os testes devem sempre ser preferidos. **Fonte:** Adaptado da EUROCODE-1991-4:2006.

A categoria de atrito da tremonha de descarga é descrita em função do material constitutivo de suas paredes (Quadro 1).

**Quadro 1:** Determinação de superfície de parede.

| Categoria | Descrição                                           | Materiais típicos de parede                                                                                                                                                                       |
|-----------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>D1</b> | Baixo Atrito<br>(classificado como<br>eskorregadio) | Polietileno de ultra- alto peso molecular<br>Aço inoxidável laminado a frio<br>Aço inoxidável polido<br>Superfície revestida projetada para baixo atrito<br>Alumínio polido                       |
| <b>D2</b> | Atrito moderado<br>(classificado como<br>suave)     | Aço carbono suave (construção soldada ou parafusada)<br>Acabamento em aço inoxidável<br>Aço carbono galvanizado<br>Alumínio oxidado<br>Superfície revestida projetada para resistência à corrosão |
| <b>D3</b> | Atrito alto (classificado<br>como áspero)           | Concreto fora de forma, concreto acabado ou envelhecido<br>Aço carbono envelhecido (corroído)<br>Aço resistente à abrasão<br>Telhas de cerâmica                                                   |
| <b>D4</b> | Irregular                                           | Paredes onduladas horizontalmente<br>Folhas perfiladas com nervuras horizontais<br>Paredes não padronizadas com grandes aberrações                                                                |

**Fonte:** Adaptado da EUROCODE-1991-4: 2006.

## 2.2- Teoria de Jenike e Johanson

Os estudos de Jenike e Johanson tiveram início na década de 1960 devido ausência de métodos e critérios para projetos de fluxo e estrutural de silos [13,14].

Baseado nos estudos de mecânica dos solos a teoria visa o conhecimento das tensões cisalhantes necessárias ao início do escoamento do material ensilado, utilizando

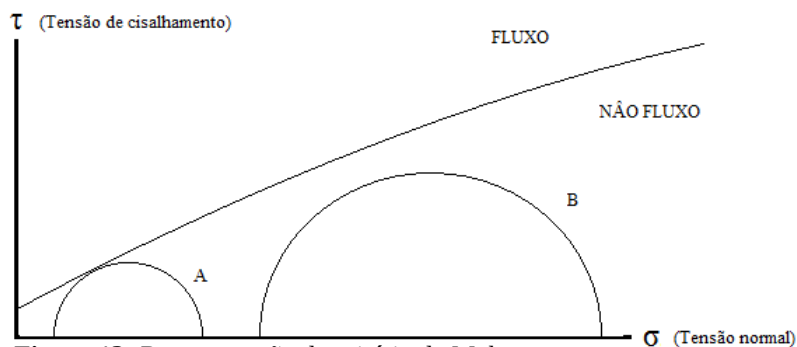
dois critérios de ruptura para a determinação dos estados de tensão em que ocorre o deslizamento.

O objetivo principal dos estudos empregados em mecânica dos solos é de antecipar o não deslizamento de um talude, já na teoria de Jenike e Johanson objetiva-se que o material escoe sempre. Os critérios de ruptura empregados são o de Mohr - Coloumb.

Segundo o critério de Mohr não ocorrerá ruptura ou fluxo de material enquanto o círculo representativo do estado de tensões se encontrar no interior de uma curva, que é a envoltória dos círculos relativos aos estados de ruptura obtidos experimentalmente para cada material [15].

Na Figura 13 é mostrado a envoltória de Mohr que relaciona a tensão normal a de cisalhamento. O semi círculo “B” representa um estado de tensões em que não há ruptura e o semi círculo “A” (tangenciando a envoltória) o representativo de um estado de tensão na ruptura.

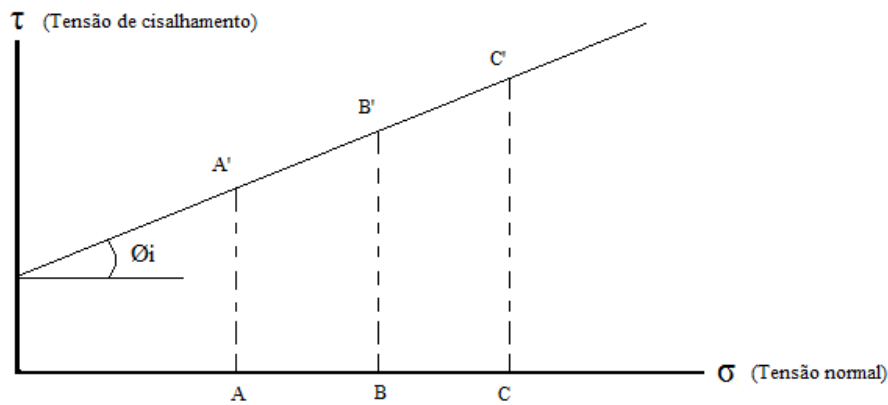
Se o sólido granular estiver submetido a um estado de tensão acima da envoltória haverá fluxo ou se abaixo não ocorrerá o escoamento.



**Figura 13:** Representação do critério de Mohr.

No critério de Coulomb não há ruptura se a tensão de cisalhamento não ultrapassar um valor dado pela expressão  $(c + f \cdot \sigma)$ , sendo  $(c$  e  $f)$  constantes do material (Equação 1), e  $\sigma$  a tensão normal atuante no plano de cisalhamento.

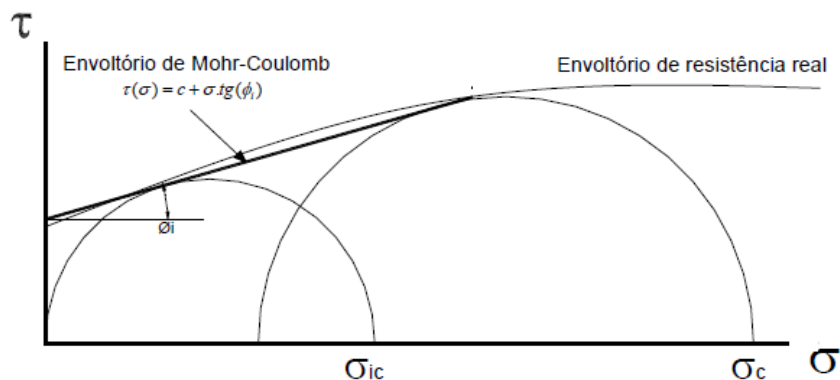
O ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ) pelo critério de Coulomb pode ser calculado pela tangente do ângulo. Tem-se na Figura 14 a representação do critério de ruptura de Coulomb.



**Figura 14:** Representação do critério de ruptura de Coulomb.

$$\tau(\sigma) = c + \sigma \cdot \tan(\phi_i) \quad (\text{Eq. 1})$$

Admite-se a envoltória de Mohr como sendo uma reta tornando o critério similar ao de Coulomb, passando a denominar-se critério de Mohr - Coulomb, (Figura 15).

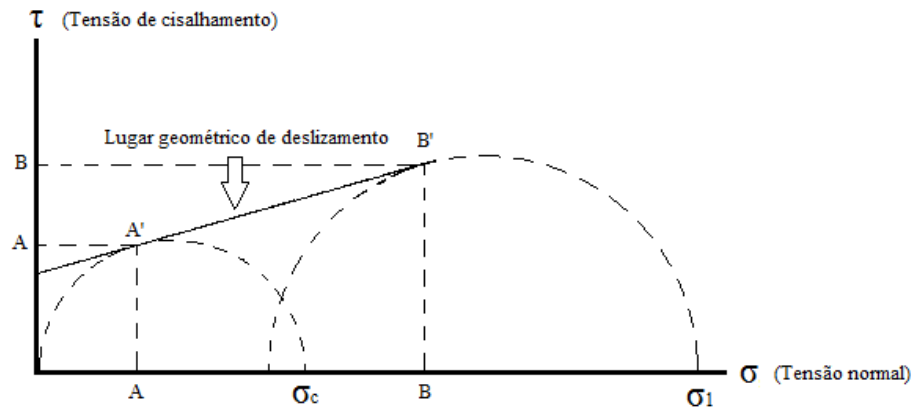


**Figura 15:** Representação da combinação dos critérios de Mohr - Coulomb.

Jenike e Johanson enfatizam a necessidade de se conhecer as tensões cisalhantes suficientes para a determinação do “lugar geométrico de deslizamento” (Yiel Locus - YL) no diagrama de tensões.

Observa-se na Figura 16 que o primeiro semi círculo passa através da origem do diagrama que relaciona a tensão cisalhante com a normal (intersecção A'), cujo diâmetro é a tensão inconfina (σ<sub>ic</sub> -unconfined yield stress), uma medida de resistência relacionada ao estado de tensão em que o material não esta confinado. O ponto de intersecção B' é a resultante de resistência relativa ao estado de tensão onde o material esta confinado.

O lugar geométrico de deslizamento é identificado como sendo a tangente que envolve todos os círculos de Mohr e ou a reta que intercepta os pontos A' e B' que representam os estados de tensões em que o sólido sofre ruptura e ou inicia o seu escoamento.



**Figura 16:** Representação do lugar geométrico de deslizamento.

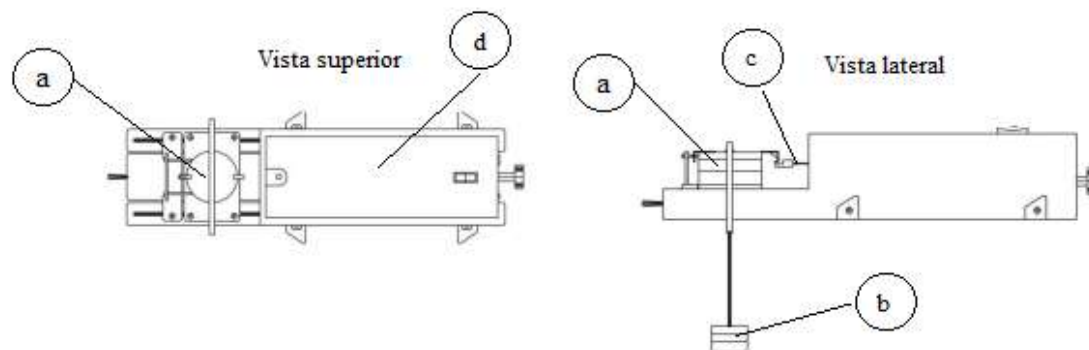
### 2.2.1- Célula e ensaio de cisalhamento direto de Jenike

O aparelho denominado célula de cisalhamento de Jenike foi desenvolvido em 1964 [13] baseado nos equipamentos aplicados nos ensaios de cisalhamento direto em mecânica dos solos e é adotado em norma estrangeira [12] e internacional [16], (Figura 17).



**Figura 17:** Aparelho de cisalhamento de Jenike, modelo TSG 70-140. (a) vista superior, (b) vista lateral. Fonte: SILVA. F. et.al, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG.

Ilustra-se na Figura 18 o esquema básico.



**Figura 18:** Esquema aparelho de cisalhamento de Jenike, modelo TSG 70-140. (a) célula de Jenike, (b) massa para aplicação de força normal, (c) eixo força cisalhante, (d) conjunto eletromecânico. Fonte: Neto. L (2009).

A célula consiste basicamente de dois anéis sobrepostos, um fixo e outro móvel dentro dos quais é depositada uma amostra dos grãos.

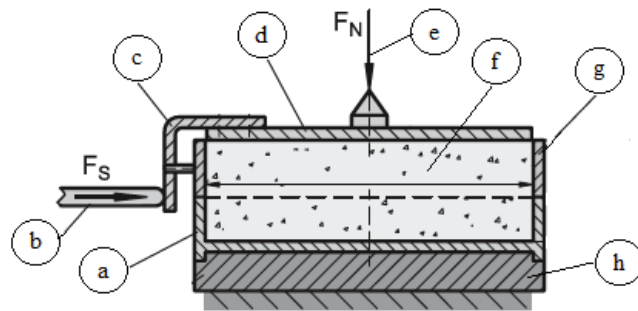
O aparelho de cisalhamento tem a finalidade de exercer forças verticais e horizontais a uma velocidade constante sobre o material contido na célula e de registrar as forças atuantes nos dois eixos.

Os procedimentos de execução são descritos na norma ASTM D6128-97 [17] e são utilizados para a determinação das propriedades físicas dos materiais granulares.

As principais propriedades físicas obtidas a partir dos testes de cisalhamento direto de Jenike são o ângulo de atrito interno do material ( $\phi_i$ ), ângulo de atrito do produto com a parede ( $\phi_w$ ) e o efetivo ângulo de atrito interno do material ( $\phi_e$ ) e a função de fluxo do material (FF).

#### 2.2.2- Efetivo ângulo de atrito ( $\phi_e$ ) e ângulo de atrito interno dos grãos ( $\phi_i$ ).

A obtenção do ângulo de atrito do produto granular é realizado a partir de uma amostra do material submetida ao cisalhamento pela célula de Jenike [18], (Figura 19).

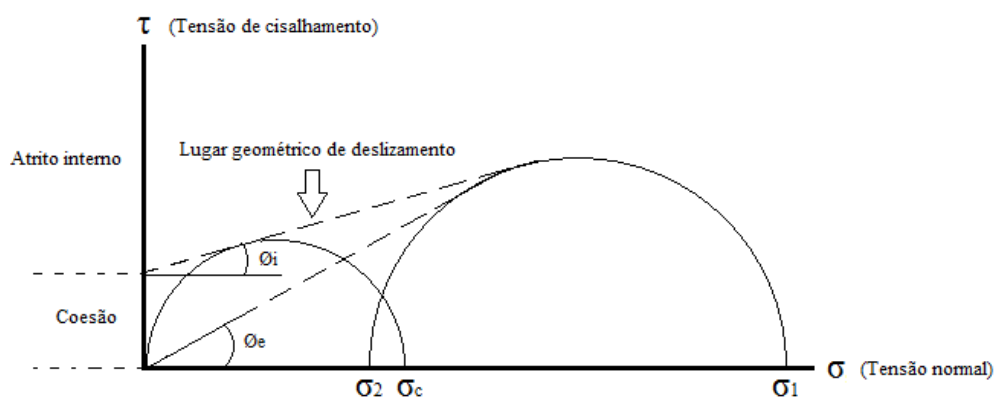


**Figura 19:** Célula de cisalhamento direto de Jenike. (a) anel fixo, (b) força de cisalhamento, (c) suporte, (d) tampa, (e) força normal, (f) amostra do material granular, (g) anel móvel, (h) base. Fonte: adaptado de Schulze. D (2007).

O ensaio de cisalhamento direto para obtenção do atrito do “material- material” consiste basicamente na aplicação de uma força normal vertical ( $F_N$ ) sobre a tampa e amostra do produto. Posteriormente o material é cisalhado pelo anel móvel movido em uma velocidade constante obtendo-se a força cisalhante ( $F_S$ ).

Portanto, a tensão cisalhante obtida ( $\tau$ ) é função da tensão normal aplicada ( $\sigma$ ), que são plotados em um diagrama de tensões dando origem ao local geométrico de deslizamento. São necessários duas combinações de tensões para a determinação do lugar geométrico de deslizamento.

A partir do local geométrico de deslizamento o ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito pode ser determinado (Figura 20).



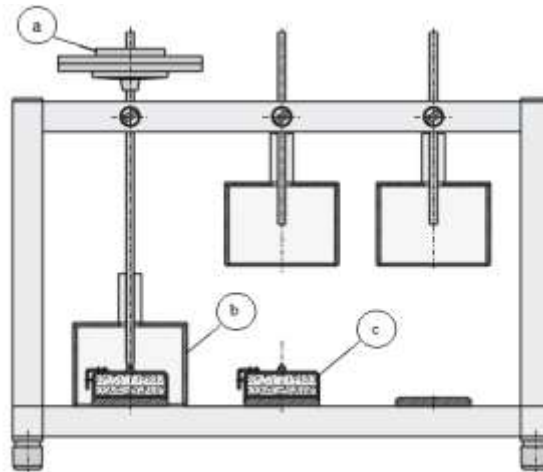
**Figura 20:** Representação dos ângulos de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno no diagrama de tensões. Fonte: adaptado de Schulze. D (2007).

Os ângulos de atrito não são propriedades físicas intrínsecas dos materiais granulares, isto é pode variar em função do estado de compactação, consolidação, peso específico e do tempo.



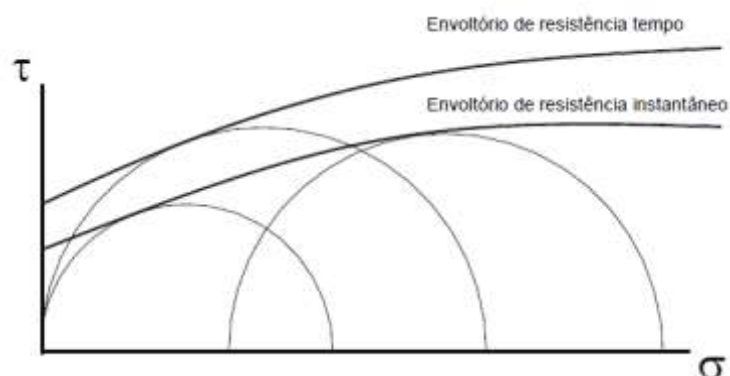
Produtos granulares desconsolidados não possuem resistência, mas ganham por meio da consolidação e do confinamento quando estão armazenados no silo [19].

Com o intuito de simular condições reais de armazenamento em silos em que os materiais particulados ficam submetidos a consolidação pelo tempo o equipamento representado na (Figura 21) é utilizado.



**Figura 21:** Banco de consolidação. (a) peso, (b) capa, (c) célula de Jenike. Fonte: adaptado de Schulze, D (2007).

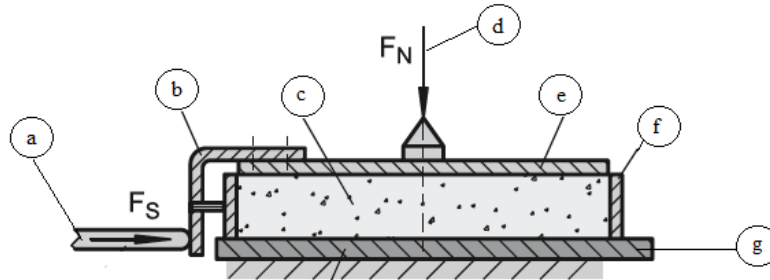
A representação dos envoltórios de resistência instantâneo e sob a influencia do tempo estão na Figura 22.



**Figura 22:** Representação do critério de ruptura com a influência do tempo. Fonte: adaptado de Calil (2007).

### 2.2.3- Ângulo de atrito do produto com a parede ( $\phi_w$ )

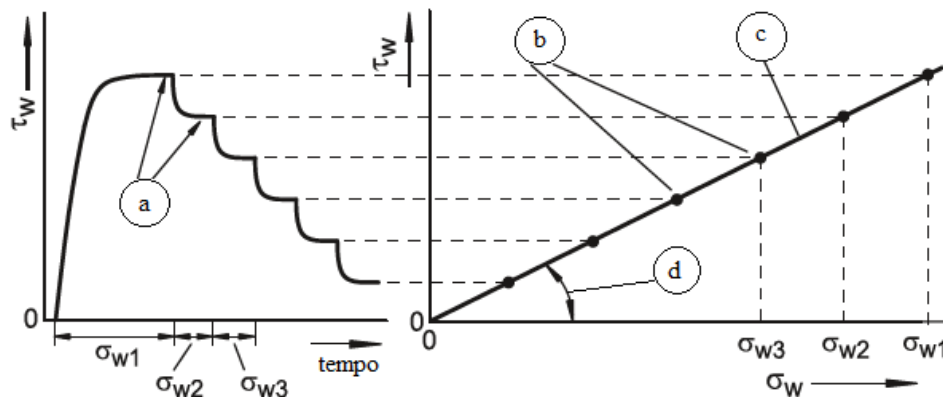
O procedimento para a obtenção do ângulo de atrito do produto granular com a parede é realizado a partir da fixação de uma amostra do material da parede na placa de base da célula de cisalhamento de Jenike [18], (Figura 23).



**Figura 23:** Célula de cisalhamento direto de Jenike. (a) força de cisalhamento, (b) suporte, (c) amostra do material granular, (d) força normal, (e) tampa, (f) anel, (g) amostra do material constitutivo da parede. Fonte: adaptado de Schulze, D (2007).

Uma força normal vertical ( $F_N$ ) é aplicada sobre a amostra do produto e do material da parede. Em seguida, a amostra do produto granular é movida em uma velocidade constante sobre a amostra da parede obtendo-se a força cisalhante ( $F_S$ ).

Portanto, a tensão cisalhante obtida ( $\tau_w$ ) é função da tensão normal aplicada ( $\sigma_w$ ). Inicia-se o ensaio com a maior tensão normal ( $\sigma_w$ ), em seguida a tensão é reduzida e o procedimento repetido. Os pares de tensão normal ( $\sigma_w$ ) e de cisalhamento ( $\tau_w$ ) são plotados em um diagrama e uma reta é definida pela intersecção dos pontos, dando origem ao local geométrico de deslizamento entre o sólido a granel e o material da parede. A partir do local de deslizamento na parede o ângulo de atrito pode ser determinado (Figura 24). O coeficiente de atrito é obtido pela tangente do ângulo.



**Figura 24:** Curva do teste de cisalhamento direto (a) regime permanente, (b) pontos medidos, (c) lugar geométrico do deslizamento na parede, (d) ângulo de atrito do produto com a parede. Fonte: adaptado de Schulze, D (2007).

### 2.3- Influencia nas propriedades físicas dos grãos

Algumas propriedades físicas influenciam diretamente nas propriedades de fluxo e vazão dos materiais particulados, destaca-se o ângulo de repouso, peso específico, compactação, compressibilidade, tamanho das partículas, degradação, corrosão e abrasão [6].

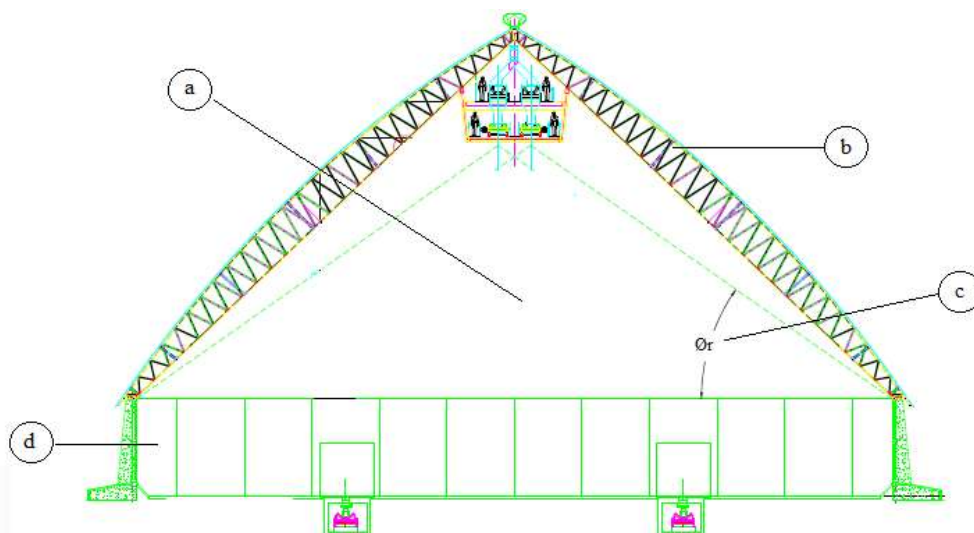
#### 2.3.1- Ângulo de repouso ( $\phi_r$ )

Define-se ângulo de repouso como a inclinação em relação a horizontal formada naturalmente em uma pilha [19], ou a inclinação mais íngreme do material granular não confinado empilhado sem colapsar [20]. Pode ainda ser definido no âmbito da mecânica dos solos, como sendo o ângulo de inclinação da encosta no qual o solo é quase estável [21], Figura 25.



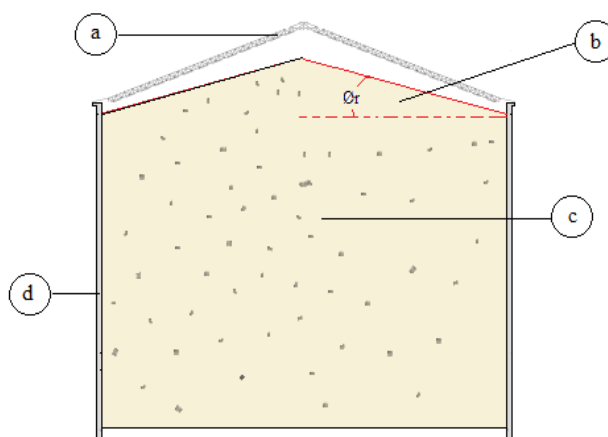
**Figura 25:** Vista geral da pilha de farelo de soja NGMO. E o ângulo de repouso a 0,6 m do solo. Fonte: Cardoso et.al (2020).

O ângulo de repouso é aferido na pilha de grãos após a sua formação por derramamento do material sobre uma superfície plana, ou obtido através do total preenchimento e posterior escoamento de um volume útil por drenagem [18], sendo um parâmetro fundamental no projeto da capacidade de fluxo de correias transportadoras [22,23,24], elevadores de caçambas, alimentadores, correias tubulares e transportadores de corrente. É também relevante no cálculo de volume de uma pilha de estocagem de minério e de material em moegas e pátios [25] e dimensionar a capacidade estática de armazéns graneleiros [26], (Figura 26).



**Figura 26:** Previsão da capacidade estática e inclinação da cobertura de um armazém graneleiro. a) pilha de grão, b) cobertura, c) ângulo de repouso com inclinação de 35° e d) parede de contenção.

O ângulo de repouso é imprescindível para se prever o volume útil de silos verticais e o adequado projeto de sua cobertura (Figura 27).

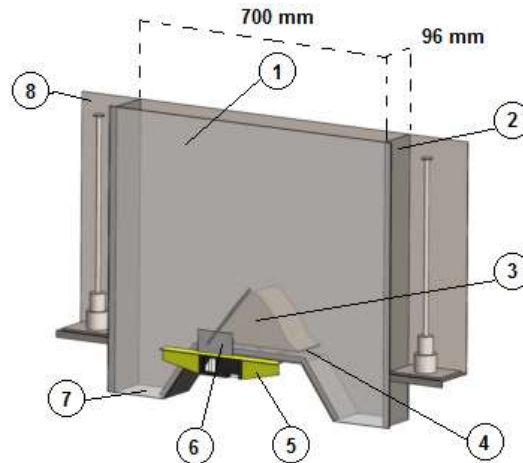


**Figura 27:** Projeto de capacidade estática e inclinação da cobertura de silo vertical. a) cobertura, b) ângulo de repouso do produto armazenado, c) grãos e d) corpo do silo.

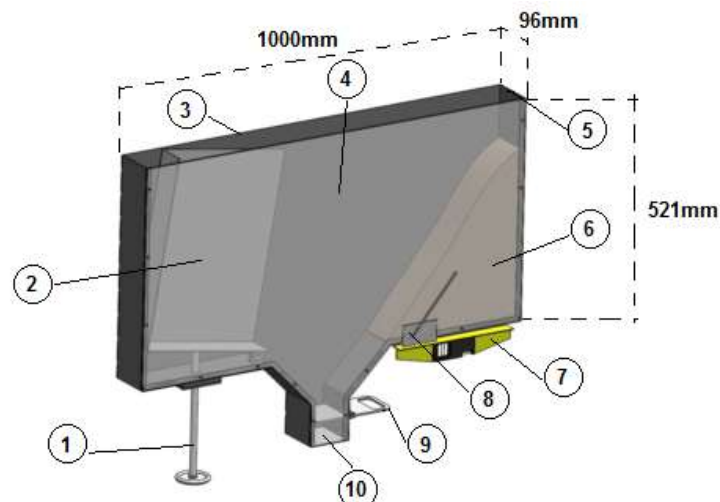
De acordo com Calil e Cheung [9] o ângulo de repouso de materiais não coesivos, isto é de fluxo livre, pode ser equivalente ao ângulo de atrito interno do material granular e inferir sobre as propriedades de fluxo dos grãos.

Cardoso.A.L et.al [27] projetou e montou dois equipamentos de bancada e um sistema para a quantificação do ângulo de repouso de pilha reais de Farelo de soja em um terminal portuário.

O aparelho A Figura 28 foi utilizado para aferir o ângulo de repouso por derramamento do material, e o aparelho B foi utilizado na medição do ângulo de repouso por drenagem (Figura 29).

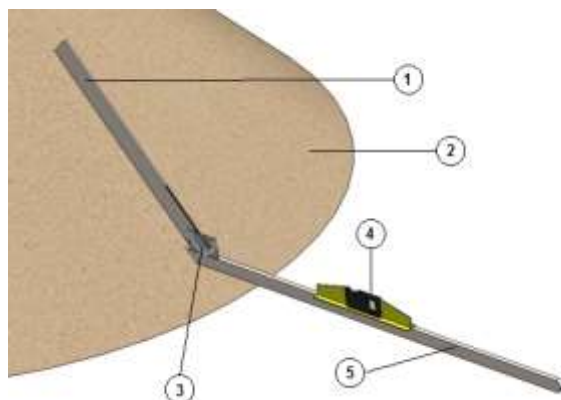


**Figura 28:** Esboço do equipamento A. 1) placa frontal de policarbonato transparente; 2) placa lateral em poliuretano de ultra alto peso molecular; 3) material granular retido; 4) base de retenção plana; 5) nível; 6) goniômetro; 7) bocal de descarga; 8) placa de fundo em poliuretano de ultra alto peso molecular. Fonte: Cardoso et.al (2020).



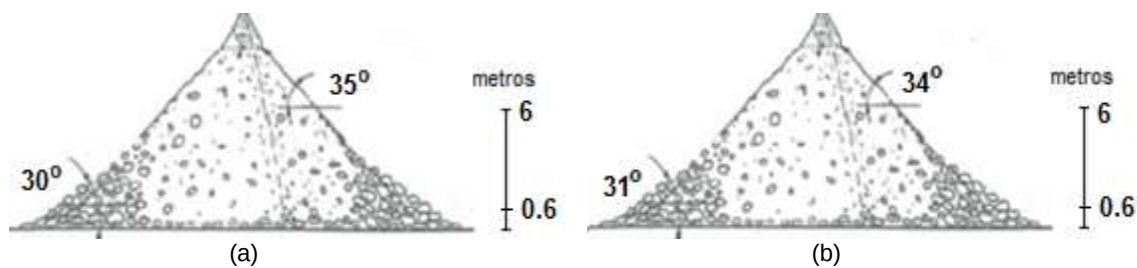
**Figura 29:** Equipamento B. 1) ajuste de inclinação; 2) caçamba inclinável; 3) placa de fundo em polietileno de ultra alto peso molecular; 4) placa frontal em poliuretano transparente; 5) placa lateral em polietileno de ultra alto peso molecular; 6) Material granular estagnado; 7) nível; 8) goniômetro; 9) válvula guilhotina de abertura e fechamento de fluxo; 10) bocal de descarga. Fonte: Cardoso et.al (2020).

O sistema C foi utilizado na medição do ângulo de repouso das pilhas de farelo no interior do armazém graneleiro, como ilustrado na Figura 30 e o resultado coincidiu com as aferições feitas pelos Aparelhos de bancada A e B.



**Figura 30:** Sistema para medição do ângulo de repouso em pilhas reais. 1) barra articulável; 2) pilha de farelo; 3) goniômetro; 4) nível; 5) barra horizontal nivelada. Fonte: Cardoso et.al (2020).

De acordo com os resultados da pesquisa [27] diferentes ângulos de repouso foram encontrados em uma mesma pilha, conforme ilustra-se na Figura 31.



**Figura 31:** ângulos de repouso farelo nas pilhas reais de farelo de soja; (a) GMO; (b) NGMO. Fonte: Cardoso et.al (2020).

Por meio desta propriedade física pode-se indicar a coesão do material granular, referente à classificação de fluidez [28, 29]. A classificação qualitativa de fluidez dos materiais granulares pode ser obtida por meio da Tabela 5.

**Tabela 5:** Classificação de fluidez dos materiais granulares [5].

| Condição de escoamento | Ângulo de repouso |
|------------------------|-------------------|
| Muito fácil            | $\leq 20^\circ$   |
| Fácil                  | 20 - $29^\circ$   |
| Médio                  | 30 - $39^\circ$   |
| Difícil                | 39 - $40^\circ$   |

### 2.3.2- Peso específico

De acordo com Calil e Cheung [19] o peso específico sofre alteração em função das tensões atuantes sobre um ponto e é dividido em dois tipos, o peso específico aerado e o consolidado.

A compactação é um processo artificial pelo qual a densidade do produto é aumentada através de impacto, vibração e ou pressão vertical.

### 2.3.3- Compressibilidade

Define-se compressibilidade como sendo a mudança de volume do sólido causado pelos efeitos da compactação.

O coeficiente de compressibilidade ( $C_c$ ) pode ser calculado conforme Equação 2 proposta por CARR [30].

$$C_c = \frac{\gamma_c - \gamma_a}{\gamma_c} = 1 - \frac{\gamma_a}{\gamma_c} \quad (\text{Eq. 2})$$

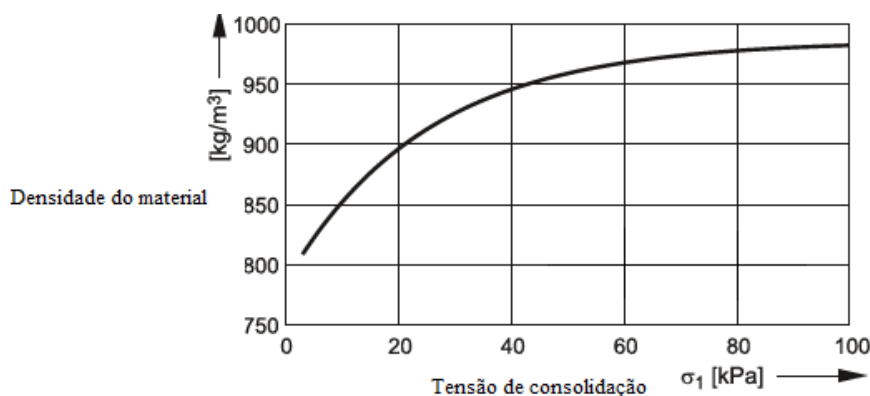
Em que

$C_c$  é o coeficiente de compressividade.

$\gamma_a$  é o peso específico aerado ( $\text{kg/m}^3$ ).

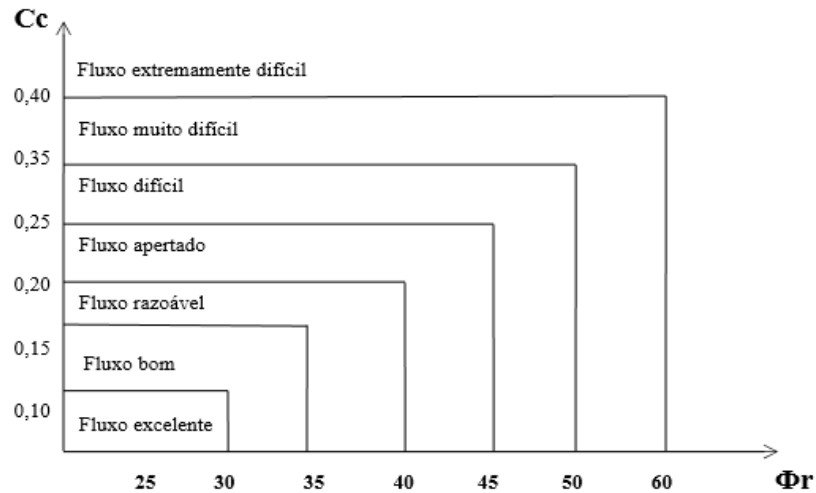
$\gamma_c$  é o peso específico consolidado ( $\text{kg/m}^3$ ).

Pode-se observar na Figura 32 um exemplo da variação do peso específico de carvão em função da tensão de consolidação [18].



**Figura 32:** Curva de variação da densidade do carvão. Fonte: Adaptado de Schulze, D (2007).

O coeficiente de compressibilidade indica capacidade de fluidez dos sólidos e relaciona o ângulo de repouso dos grãos (Figura 33), podendo sofrer variações influenciadas pela granulometria, resistência individual dos grãos, umidade, densidade e do tempo.



**Figura 33:** Condições de fluxo dos materiais granulares em estado consolidado [\*].

Visando classificar a fluidez do farelo de soja, Cardoso et.al [30] submeteu o material a consolidação por compressão constante de 3 Kgf/cm<sup>2</sup> por 24 horas.

O peso específico aerado ( $\gamma_a$ ) de 680 Kg/m<sup>3</sup> alterou para 900 kg/m<sup>3</sup> em estado consolidado ( $\gamma_c$ ), passando de fluidez média para difícil, podendo implicar inclusive em obstruções de fluxo por efeito de arco ou abóboda coesiva.

Tem-se na Figura 34 o estado do farelo após o período mencionado.



**Figura 34:** Estado do farelo de soja após período de consolidação. Fonte: Cardoso.et.al (2019).

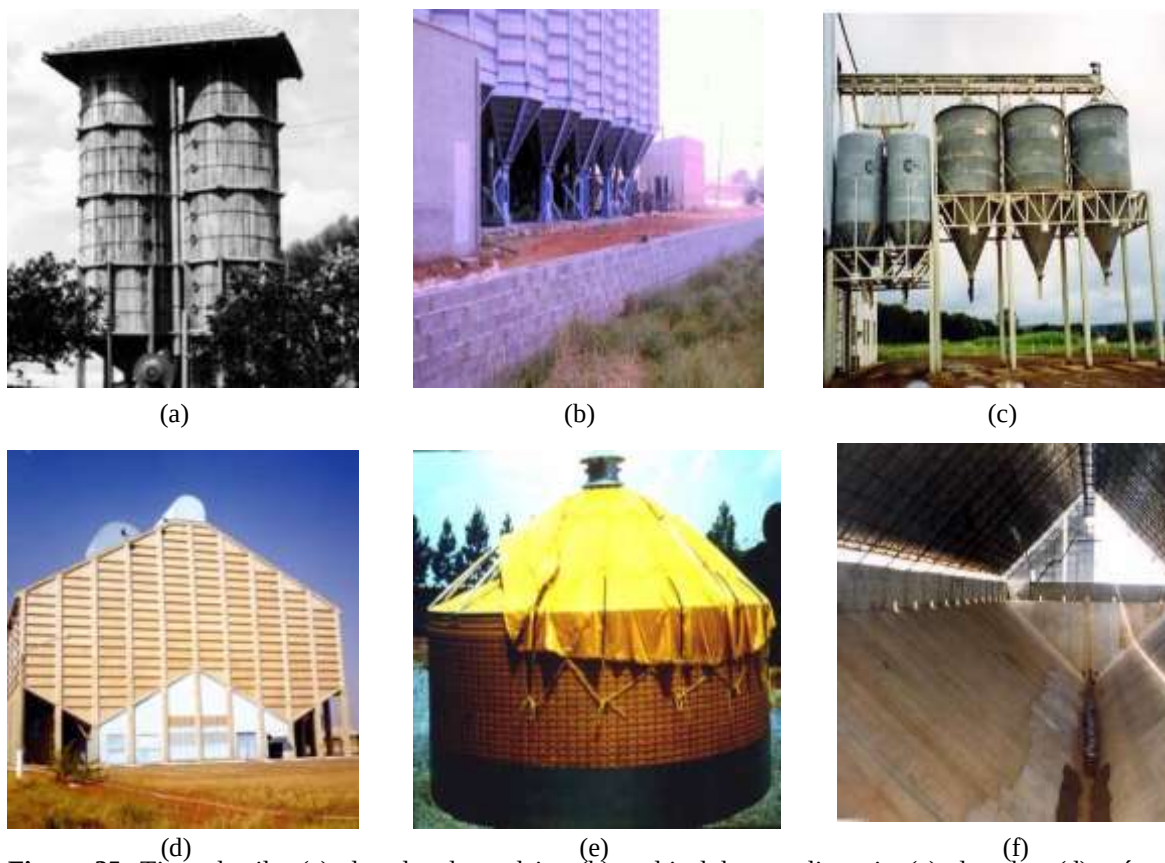


## 2.4- Silo

Silo é definido como sendo toda construção ou estrutura destinada ao armazenamento e a conservação de qualquer produto granular industrial ou agrícola e pode ser construído de madeira, concreto armado, chapas metálicas lisas e corrugadas, plásticos, fibra de vidro, entre outros [19].

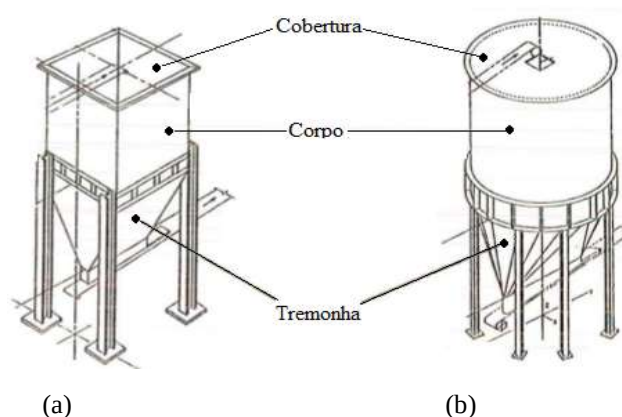
### 2.4.1- Tipos de silo

Quanto ao seu tipo são divididos em 3 grupos, elevados ou aéreos, subterrâneos e semi- subterrâneos (Figura 35).



**Figura 35:** Tipos de silo. (a) elevados de madeira, (b) multicelulares poligonais, (c) elevados, (d) pré-moldados de concreto, (e) em tela metálica e tecido, (f) horizontal semi- subterrâneo. **Fonte:** CALIL JUNIOR, C.; CHEUNG. 2007.

Existem silos de fundo plano e de fundo convergente, o fundo convergente é também chamado de tremonha de descarga, conforme (Figura 36).



**Figura 36:** Silos metálicos. (a) prismático com tremonha cuneiforme, (b) cilíndrico com tremonha tipo cinzel **Fonte:** Adaptado de NEFF & HUSS, 1983.a, 1983.b.

#### 2.4.1- Classificação de silos

Os silos também são classificados por sua forma geométrica. De maneira geral, as normas internacionais e estrangeiras [12,16] classificam os silos em três tipos, silos baixo, medianamente esbeltos e esbeltos (Tabela 6).

Esta classificação é função da relação altura e diâmetro (ou diagonal)  $[H/D]$ , sendo  $H$ = altura e  $D$ =diâmetro ou diagonal do corpo.

**Tabela 6:** Classificação do tipo de silos pela relação  $(H/D)$ .

| Norma                                                                                    | Classificação                                      |                         |                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|
|                                                                                          | Baixos                                             | Medianamente Esbeltos   | Esbeltos                                       |
| <b>Australiana</b><br><b>AS3774:1996</b>                                                 | $H/D < 1,0$                                        | $1,0 \leq H/D \leq 3,0$ | $H/D > 3,0$                                    |
| <b>Européias PrEN</b><br><b>1991-4:2003</b><br><b>(Draft) DIN</b><br><b>1055-03:2005</b> | $0,4 \leq H/D \leq 1,0$                            | $1,0 \leq H/D \leq 2,0$ | $H/D > 2,0$                                    |
| <b>Americanas</b><br><b>ACI-313:1991</b><br><b>ANSI/ASAE EP</b><br><b>433: 2001</b>      | $H/D < 2,0$                                        | -                       | $H/D > 2,0$                                    |
| <b>Canadense</b><br><b>CFBC: 1983</b>                                                    | $H/D \leq 1,0$ ou $H/D < \tan^2(\phi_c/2 + \pi/4)$ | -                       | $H/D > 1,0$ e $H/D < \tan^2(\phi_c/2 + \pi/4)$ |

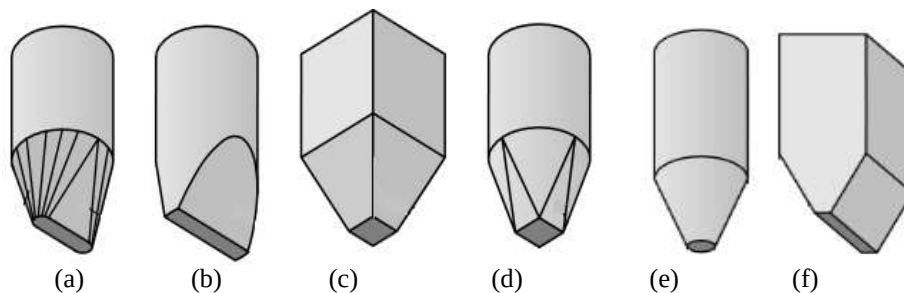
**Fonte:** CALIL JUNIOR, C.; CHEUNG. 2007.

## 2.5- Tremonhas

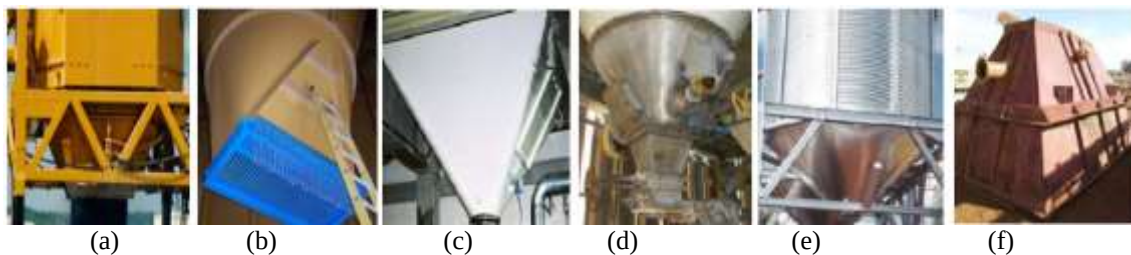
De acordo com a norma EUROCODE a tremonha de descarga é destinada a produzir fluxo nos sólidos armazenados. É por meio da qual os padrões de fluxo mássico ou funil são determinados na descarga.

### 2.5.1- Tipos de tremonhas de descarga

Existem diversos tipos de tremonhas de descarga, as mais comuns estão representadas nas Figuras 37 e 38.



**Figura 37:** Tipos de tremonha. (a) transição, (b) bisel, (c) piramidal, (d) quadrada, (e) cônica, (f) cunha  
**Fonte:** adaptado de D. SCHULZE, powders and bulk solids. 2007.



**Figura 38:** Tipos de tremonha. (a) transição, (b) bisel, (c) piramidal, (d) quadrada, (e) cônica, (f) cunha  
**Fonte:** adaptado de VIEIRA, Estudo teórico e experimental das pressões em tremonhas cônicas e piramidais para silos metálicos e esbeltos. 2007.

### 2.5.2- Inclinação das paredes da tremonha

Pelas Equações 3 e 4 propostas por Enstad [31] pode-se determinar a inclinação mínima da tremonha com a horizontal de modo a assegurar o total escoamento do produto granular no interior de um silo, evitando a estagnação do material.

$$\theta_m = 0,5 \cdot \cos^{-1} \left[ \frac{1 - \sin \delta}{2 \sin \delta} \right] + \beta \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\beta = \frac{\phi_w + \sin^{-1} \left[ \frac{\sin \phi_w}{\sin \delta} \right]}{2} \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo;

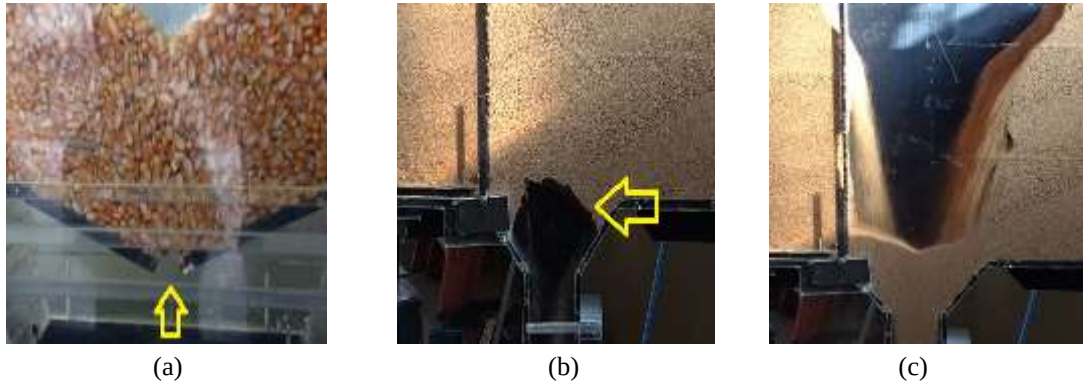
$\theta_m$  o ângulo mínimo de inclinação da tremonha com a horizontal (°).

$\delta$  o ângulo efetivo de atrito do produto (°).

$\phi_w$  o ângulo de atrito do produto com a parede (°).

### 2.5.3- Abertura mínima da boca de descarga da tremonha

Obstruções de fluxo podem ocorrer pela formação de arcos coesivos, arcos mecânicos e efeito tubo [12], (Figura 39).



**Figura 39:** Tipos de obstrução de fluxo, (a) arco mecânico, (b) arco coesivo (c) efeito tubo.

Visando antecipar a obstrução do fluxo por arco mecânico a Equação 5 e 6 são utilizadas conforme proposta por ROTTER apud CALIL [32] para produtos granulares de fluxo livre com  $bf \geq 25,4$  cm. A medida da boca de descarga “bf” é ilustrada na Figura 40.

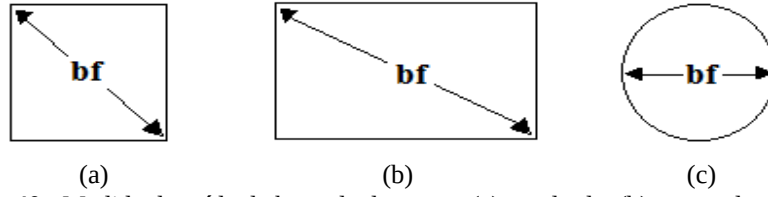
$$bf \geq 6 \cdot dp_{\text{máx}} \text{ (esféricas)} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$bf \geq 8 \cdot dp_{\text{máx}} \text{ (angulares)} \quad (\text{Eq. 6})$$

Em que,

**bf** é a diagonal da abertura da boca de saída.

**dp<sub>máx</sub>** é o diâmetro da maior partícula da amostra.



**Figura 40:** Medida da saída da boca de descarga, (a) quadrada, (b) retangular, (c) circular.

Para materiais granulares coesivos a Equação 7 e 8 podem ser empregadas na determinação da abertura mínima da saída [32].

$$bf = \frac{2,3 \sigma_{ic}}{\gamma} \quad (\text{saídas circulares}) \quad (\text{Eq.7})$$

$$bf = \frac{1,3 \sigma_{ic}}{\gamma} \quad (\text{saídas retangulares}) \quad (\text{Eq.8})$$

Sendo,

**bf** a abertura mínima da boca de descarga (m).

$\sigma_{ic}$  a tensão não confinada (N/m<sup>2</sup>).

$\gamma$  o peso específico (N/m<sup>3</sup>).

#### 2.5.4- Potencial de vazão de descarga

A vazão de produtos granulares de fluxo livre é função da dimensão da boca de descarga, do diâmetro médio da partícula, da geometria da tremonha de descarga e de sua inclinação e independe da altura de produto armazenado [33,34].

As Equações 9 e 10 podem ser utilizadas para a determinação do potencial de vazão de descarga em tremonhas com saídas circulares e retangulares, considerando apenas a ação da gravidade conforme foi estudado por ROTTER apud CALIL [32].

Previsão do potencial máximo de vazão, ROTTER (1998).

$$Q_{\text{máx}} = 0,6 \cdot \gamma \cdot Gf \cdot \frac{(d - Ks \cdot dp)^{2,5}}{\sqrt{g}} \quad (\text{circulares}) \quad (\text{Eq.9})$$

$$Q_{\text{máx}} = 0,6 \cdot \gamma \cdot Gf \cdot \frac{(L - Ks \cdot dp) \cdot (d - Ks \cdot dp)^{1,5}}{\sqrt{g}} \quad (\text{retangulares}) \quad (\text{Eq.10})$$

Em que;

$\gamma$  é o valor característico inferior do peso específicos (Kg/m<sup>3</sup>).

b é a menor dimensão da boca de descarga (m).

L é a maior dimensão da boca de descarga (m).

$d_p$  é o diâmetro médio das partículas (m).

g é a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

Ks é a constante de ROTTER.

1,6 para partículas esféricas e ou esferulares.

2,4 para partículas muito angulares.

Gf é o fator do fluxo.

O fator Gf é função de duas condições de fluxo. Se o fluxo de produto ocorre sem o contato com as paredes da tremonha, diz-se que o fluxo é interno, portanto ( $\alpha < \alpha_0$ ), logo Gf = 1,0, sendo a inclinação do canal de fluxo  $\alpha_0$  determinado pela Equação 11.

$$\alpha_0 = 90 - \phi_e \quad (\text{Eq. 11})$$

De outra forma, caso o fluxo esteja em contato com as paredes da tremonha, diz-se que o fluxo é externo, portanto ( $\alpha > \alpha_0$ ), logo o fator Gf poderá ser determinado pela Equação 12.

$$Gf = 0,75 \cdot \frac{(1 - 0,08 \cdot \cos(\alpha))}{\sqrt{\sin(\alpha)}} \quad (\text{Eq. 12})$$

Sendo;

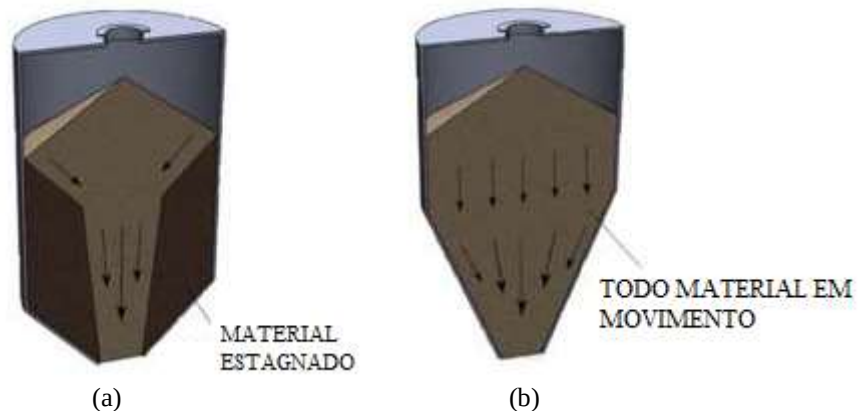
$\alpha$  o ângulo interno da tremonha (°).

$\phi_e$  o ângulo efetivo de atrito interno do produto (°).

$\alpha_0$  o ângulo natural do canal de fluxo (°).

## 2.6- Padrão de fluxo

Dois padrões básicos de fluxo podem ocorrer durante a descarga de produtos no interior de um silo, o fluxo mássico e fluxo de funil conforme descrição feita por Jenike [13,14], esquematizados na Figura 41.



**Figura 41:** Padrões de fluxo. (a) funil, (b) mássico. Adaptado de Jenike solutions.

O padrão de fluxo mássico é caracterizado pelo movimento dos grãos sobre as paredes da tremonha de descarga, enquanto que no padrão de fluxo funil pelo surgimento de zonas de estagnação sobre as paredes da tremonha.

De acordo com CALIL [35] a determinação da ocorrência do padrão de fluxo no interior de um silos deve ser considerada desde a fase de projeto, pois caracteriza o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de estagnação e o esvaziamento por completo do produto do seu interior.

Pelo Quadro 2 é possível observar que ambos os padrões de fluxo apresentam vantagens e desvantagens e devem ser consideradas na seleção e projeto de um silo.

**Quadro 2:** Vantagens e desvantagens para os padrões de fluxo.

| Fluxo Mássico                                                          |                                          | Fluxo de Funil                                          |                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Vantagens                                                              | Desvantagens                             | Vantagens                                               | Desvantagens                                                         |
| Vazão regular                                                          | Altas tensões na transição da tremonha   | Menor altura da tremonha                                | Flutuações na vazão                                                  |
| Efeito de segregação radial é reduzido, com a melhora da homogeneidade | Desgaste superficial da parede           | Diminuição das pressões dinâmicas na região da tremonha | Segregação dos sólidos                                               |
| Campo de tensões mais previsível                                       | São necessárias tremonhas mais profundas | Menor desgaste superficial da parede                    | Efeitos de consolidação com o tempo podem causar obstruções no fluxo |

(continua)



**Quadro 2:** Vantagens e desvantagens para os padrões de fluxo (continuação).

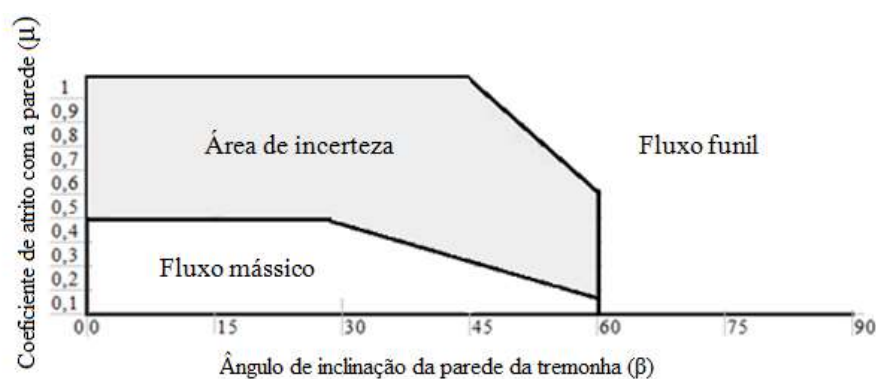
| Fluxo Mássico               |                                                                                 | Fluxo de Funil |                                                  |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------|
| Vantagens                   | Desvantagens                                                                    | Vantagens      | Desvantagens                                     |
| Toda capacidade é utilizada | Maior energia de elevação                                                       | -              | Grande caso de colapsos                          |
| -                           | As partículas devem resistir a queda livre de alturas maiores                   | -              | Redução da capacidade de armazenagem             |
| -                           | Maior capacidade de armazenamento, pois não possui regiões de produto estagnado | -              | Formação de tubos                                |
| -                           | -                                                                               | -              | Picos de pressões na região de transição efetiva |

**Fonte:** adaptado de CALIL JUNIOR, C.; CHEUNG. 2007.

Esses dois comportamentos de fluxo são definidos basicamente pelas propriedades físicas dos produtos armazenados, pelas características geométricas e construtivas das tremonhas de saída. Duas variáveis devem ser consideradas na predição da ocorrência dos padrões de fluxo no interior de um silo, o coeficiente de atrito dos produtos armazenados com a parede ( $\mu$ ) e a inclinação de suas paredes ( $\beta$ ) [36].

#### 2.6.1- Determinação do padrão de fluxo

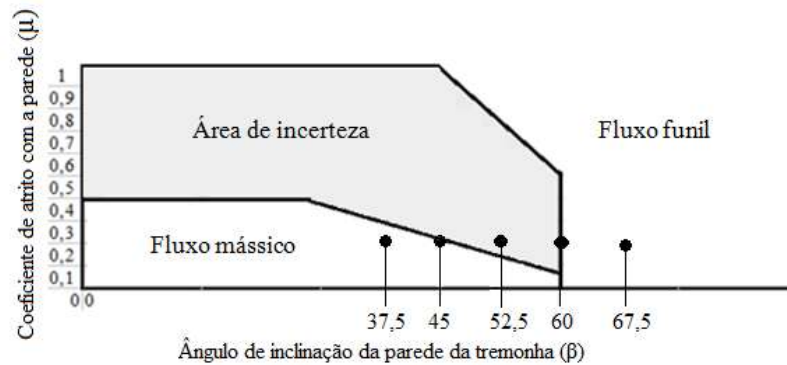
As normas internacionais e estrangeiras disponibilizam gráficos para a determinação da ocorrência dos padrões de fluxo a partir de tremonhas do tipo cônicas e retangulares, porém contendo consideráveis áreas de incerteza e diferenças entre si, sobretudo para tremonhas retangulares do tipo cunha. Estas áreas de incerteza são caracterizadas pela indefinição quanto ao padrão de fluxo que ocorrerá no interior de um silo, conforme representado na Figura 42.



**Figura 42:** Padrões de fluxo para tremonhas retangulares. **Fonte:** Adaptado de EUROCODE-1991-4:2006.



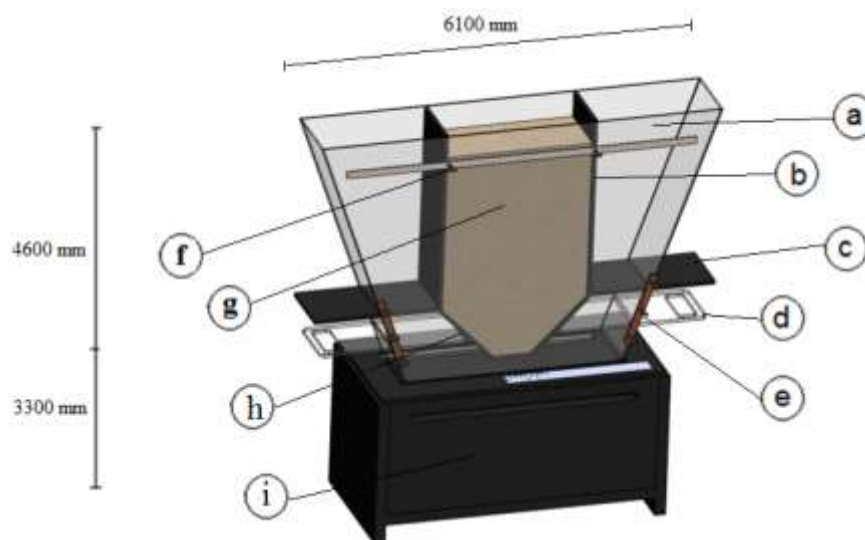
Pela Figura 43 é possível notar a área de incerteza para a predição do padrão de fluxo disponível em norma, para grãos de soja escoando sobre uma parede de material de coeficiente de baixo atrito  $\mu=0.24$ , em ângulos  $\beta= 37.5, 45, 52.5, 60$  e  $67.5^\circ$  de inclinação da parede da tremonha.



**Figura 43:** Predição dos fluxos pela norma. **Fonte:** Adaptado da EUROCODE-1991-4:2006 .

### 3- MATERIAL E MÉTODOS

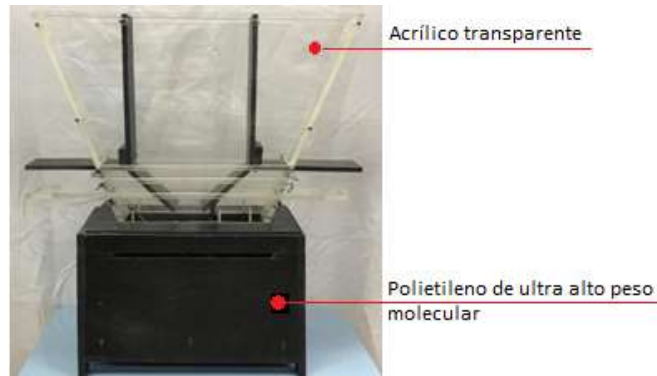
Visando caracterizar experimentalmente o fluxo e a vazão de uma amostra de grãos de soja no interior de um silo prismático, foi projetado e construído o aparelho esquematizado na Figura 44.



**Figura 44:** Esquema da unidade experimental. (a) parede frontal e traseira em acrílico transparente, (b) corpo, (c) dispositivo para o ajuste da abertura superior e inferior da tremonha, (d) dispositivo de ajuste da inclinação das paredes da tremonha, (e) dispositivo de fixação dos ajustes de abertura e inclinação da tremonha, (f) dispositivo de fixação dos ajustes do corpo do silo, (g) volume de grãos, (h) paredes da tremonha, (i) reservatório de grãos.

A unidade experimental era constituída basicamente de corpo, tremonha de descarga e reservatório de grãos, construídas com polietileno de ultra- alto peso

molecular de 10 mm de espessura. Devido à opacidade do polietileno as placas frontal e traseira do corpo foram fabricadas com acrílico transparente de 10 mm de espessura, conforme apresenta-se na Figura 45.



**Figura 45:** Fotografia da unidade experimental.

Os limites da unidade experimental estão apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7:** Limites operacionais do aparelho.

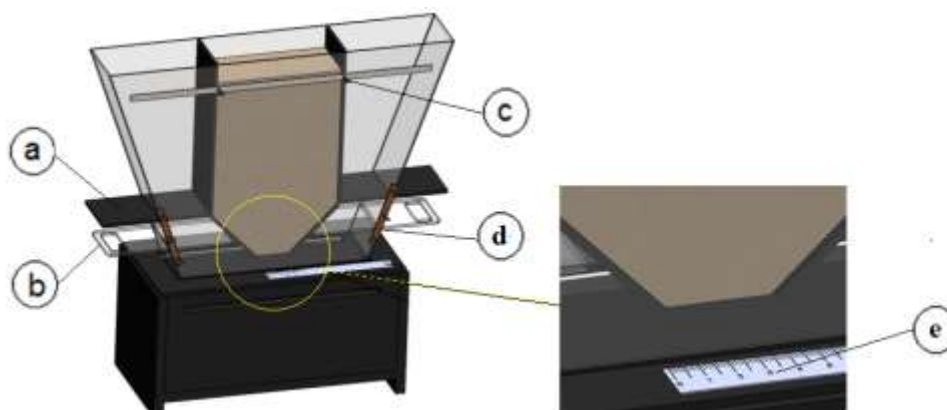
|               | Inferior da tremonha (bf)<br>(mm) | Inclinação da parede da tremonha<br>(° graus - em relação à vertical) | Corpo silo<br>(mm) |
|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------|
| <b>Mínimo</b> | 97                                | 15                                                                    | 0                  |
| <b>Máximo</b> | 345                               | 85                                                                    | 365                |

As medidas de inclinação e abertura da boca de descarga foram fixadas por meio dos parafusos indicados na Figura 46.



**Figura 46:** Dispositivos de fixação. (a) abertura da boca de descarga; (b, c) inclinação das paredes da tremonha.

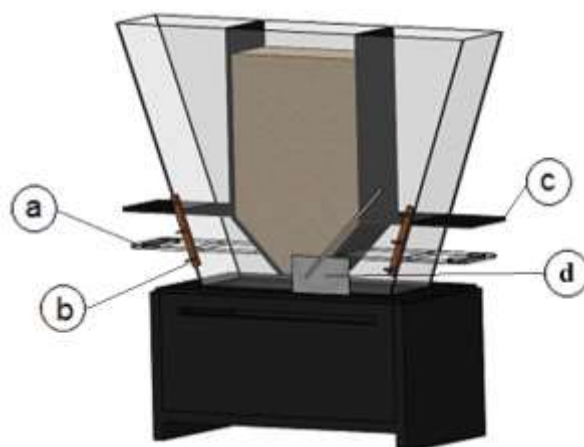
Com o intuito de evitar obstruções de fluxo e a influência na vazão resultante, foi padronizada a abertura de saída na tremonha para todas as inclinações, sendo adotado experimentalmente o padrão de abertura da boca de descarga em 14,5 mm (Figura 47).



**Figura 47:** Ajuste do bocal de descarga. (a) dispositivo para o ajuste da abertura superior e inferior da tremonha, (b) dispositivo de ajuste de inclinação das paredes, (c) dispositivo de fixação dos ajustes do corpo do silo, (d) dispositivo de fixação dos ajustes de abertura e inclinação da trem

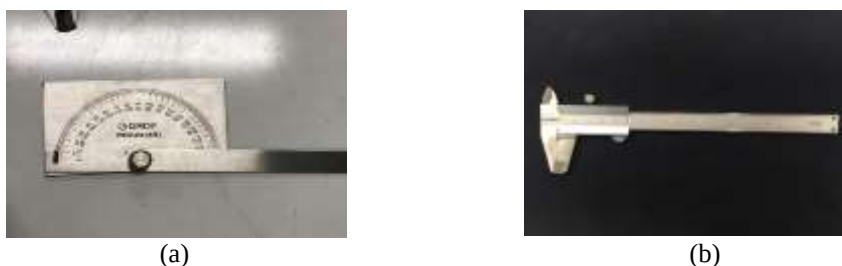
O procedimento experimental consistiu no carregamento manual e concêntrico do silo até seu completo enchimento e total escoamento por drenagem a partir da abertura da boca de descarga, onde, em relação a cada ângulo ensaiado, obteve-se o padrão de fluxo e vazão correspondente.

Ilustra-se na Figura 48 a referência utilizada em relação ao ajuste do ângulo de inclinação da parede da tremonha.



**Figura 48:** Ajuste de inclinação das paredes da tremonha. (a) dispositivo de ajuste da inclinação das paredes da tremonha, (b) dispositivo de fixação dos ajustes de inclinação das paredes da tremonha, (c) dispositivo de ajuste da abertura inferior e superior da tremonha, (d) goniômetro.

O ajuste da inclinação da parede da tremonha de descarga foi feito por meio de um goniômetro com range de  $180^\circ$  e resolução de  $1^\circ$ . Na calibração da medida de abertura da boca de descarga foi utilizado um paquímetro de 150 mm com resolução de 0,005 mm, (Figura 49).



**Figura 49:** Instrumentos utilizados. (a) goniômetro, (b) paquímetro.

Na determinação do teor de umidade e peso específico da amostra foi utilizado medidor da marca GEHAKA, modelo G810. A vazão foi determinada pela técnica da massa por unidade de tempo para o esvaziamento total do silo.

A massa foi aferida através da pesagem do produto em uma balança digital semi-analítica com resolução de 0.01 kg e o tempo medido por meio de um cronômetro digital com resolução de 0.01 s.

Têm-se na Figura 50 a ilustração dos equipamentos supracitados.



**Figura 50:** Equipamentos utilizados. (a) medidor digital, (b) cronômetro digital, (c) balança semi-analítica.

Os experimentos foram feitos em triplicata afim de obter-se maior exatidão.

As imagens foram feitas com uma câmera digital posicionada perpendicularmente a 1,5 metros de distância da unidade experimental.

## 4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

O polietileno de ultra- alto peso molecular resultou na categoria de baixo atrito (D1) conforme apresentado no Quadro 1 e o coeficiente de atrito da soja com as paredes da tremonha ( $\mu$ ) em 0,24 como ilustrado na Tabela 4. É importante citar que a norma indica o fator de variância de 1,16 (Tabela 4), podendo-se portanto adotar um coeficiente de atrito da soja com as paredes da tremonha ( $\mu$ ) na faixa de 0,207 a 0,278.

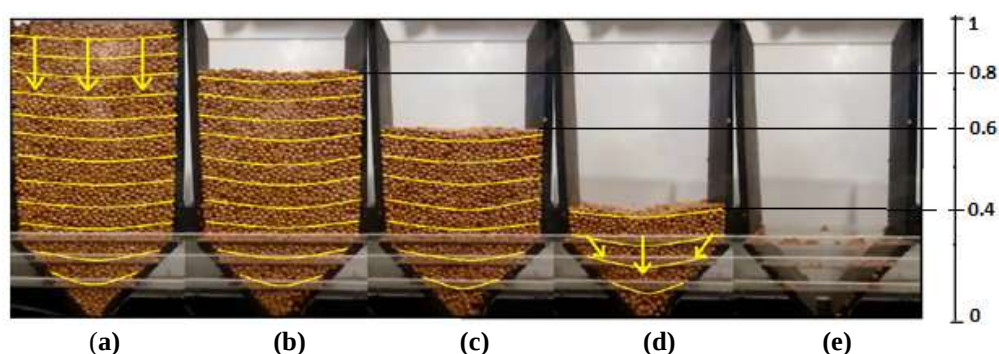
O teor de umidade foi de 11,3% e o peso específico de 0,72 Ton/m<sup>3</sup>. Têm-se na Tabela 8 a predição de fluxo interpretada pela norma.

**Tabela 8:** Padrão de fluxo previsto pela EUROCODE.

| Inclinação ( $\beta$ ) | Padrão de fluxo |
|------------------------|-----------------|
| 37,5                   | Mássico         |
| 45                     | Limite mássico  |
| 52,5                   | Incerto         |
| 60                     | Limite funil    |
| 67,5                   | Funil           |

### 4.1 Padrão de Fluxo

São mostradas a seguir a Figura 51 e Tabela 9, referentes aos ensaios com a inclinação de 37,5°, onde todo o material ensilado apresentou movimento sobre as paredes do corpo e da tremonha. Apenas com a inclinação das paredes em 37,5° houve ocorrência de fluxo mássico ao longo de todo o corpo do silo e tremonha de descarga.



**Figura 51:-** Descarregamento do silo à 37,5° de inclinação das paredes da tremonha de descarga.

(a) Silo totalmente cheio H=1, (b) H=0.8, (c) H=0.6, (d) H=0.4, (e) Silo totalmente vazio H=0.

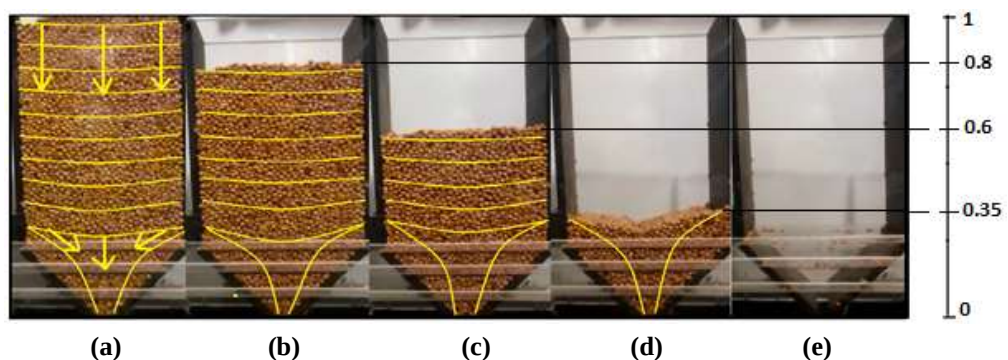
**Tabela 9:** Ocorrência de fluxo a 37,5°.

| Inclinação da tremonha (°) | Índice altura (H) | Comportamento              |
|----------------------------|-------------------|----------------------------|
| 37,5                       | 1                 | Todo material em movimento |
|                            | 0                 |                            |

A proposta de ENSTAD [31] demonstrou-se adequada ao sugerir uma inclinação suficiente para assegurar a ocorrência de fluxo mássico e o descarregamento completo do volume ensilado, sendo o resultado obtido pelas Equações 1 e 2 (Apêndice 1) de 35,08°.

É interessante acrescentar que cuidados adicionais para redução das diferenças no gradiente de velocidade devem ser tomados com o intuito de minimizar a segregação do produto armazenado durante a descarga do silos de fluxo mássico. Destaca-se que quanto mais íngreme as paredes da tremonha resultará em maior homogeneização do material ensilado, mitigando os efeitos de segregação por percolação, conforme ENGBLOM. N. et al. (2011) [37].

A Figura 52 e Tabela 10, refere-se aos registros de fluxo com a inclinação de 45°, sendo o padrão de fluxo mássico predominante entre  $H=1$  e 0,6 da altura do silos. Notou-se a ocorrência do volume de produto estagnado em  $H=0,35$ , portanto caracterizado como fluxo funil.



**Figura 52:** Descarregamento do silo à 45° de inclinação das paredes tremonha de descarga. (a) Silo totalmente cheio  $H=1$ , (b)  $H=0,8$ , (c)  $H=0,6$ , (d)  $H=0,35$ , (e) Silo totalmente vazio  $H=0$ .

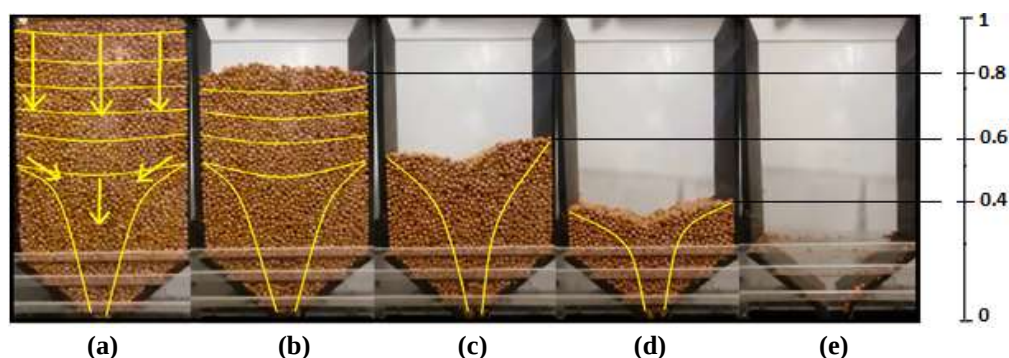
**Tabela 10:** Ocorrência de fluxo à 45°.

| Inclinação da tremonha (°) | Índice altura (H) | Comportamento              |
|----------------------------|-------------------|----------------------------|
| 45                         | 1                 | Todo material em movimento |
|                            | 0,36              |                            |
|                            | 0,35              | Material estagnado         |
|                            | 0                 |                            |

Pela Figura 52 e Tabela 10 pode-se observar que o maior volume de material esteve em movimento durante o descarregamento do silo, enquanto que o menor volume de material manteve-se estagnado sobre as paredes da tremonha, sendo este comportamento classificado como fluxo funil.

A inclinação de  $45^\circ$  representou o ensaio para análise do padrão de fluxo na linha de limite entre o fluxo mássico e a área de incerteza representada na Figura 14.

Têm-se na Figura 53 e Tabela 11 os ensaios com a inclinação em  $52,5^\circ$ , ocorrendo novamente o fluxo funil, em que a partir de  $H=0,6$  observa-se maior volume de material estagnado no interior do silo.



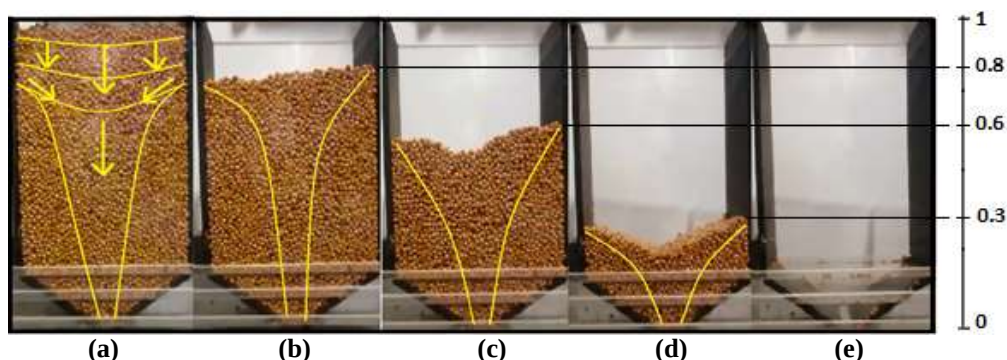
**Figura 53:** Descarregamento do silo à  $52,5^\circ$  de inclinação das paredes da tremonha de descarga. (a) Silo totalmente cheio  $H=1$ , (b)  $H=0,8$ , (c)  $H=0,6$ , (d)  $H=0,4$ , (e) Silo totalmente vazio  $H=0$ .

**Tabela 11:** Ocorrência de fluxo à  $52,5^\circ$ .

| Inclinação da tremonha ( $^\circ$ ) | Índice altura (H) | Comportamento              |
|-------------------------------------|-------------------|----------------------------|
| 52,5                                | 1                 | Todo material em movimento |
|                                     | 0,61              |                            |
|                                     | 0,6               | Material estagnado         |
|                                     | 0                 |                            |

Os registros realizados durante o processo de esvaziamento por drenagem para inclinação da parede da tremonha em  $60^\circ$  estão ilustrados na Figura 54, e o resumo contendo a interpretação na Tabela 12.





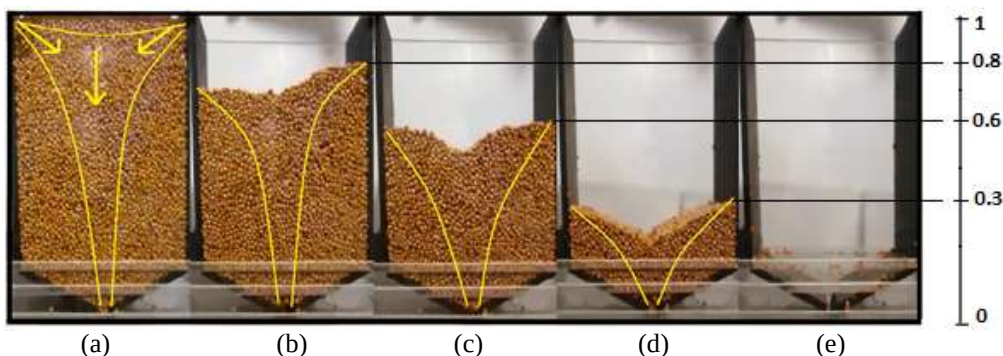
**Figura 54:** Descarregamento do silo à 60° de inclinação das paredes da tremonha de descarga. (a) Silo totalmente cheio  $H=1$ , (b)  $H=0,8$ , (c)  $H=0,6$ , (d)  $H=0,3$ , (e) Silo totalmente vazio  $H=0$ .

**Tabela 12:** Ocorrência de fluxo à 60°.

| Inclinação da tremonha (°) | Índice altura (H) | Comportamento              |
|----------------------------|-------------------|----------------------------|
| 60                         | 1                 | Todo material em movimento |
|                            | 0,81              |                            |
|                            | 0,8               | Material estagnado         |
|                            | 0                 |                            |

A inclinação de 60° representou o ensaio para análise do padrão de fluxo na linha de limite entre o fluxo funil e a área de incerteza (Figura 43), em que houve a ocorrência de zonas de estagnação, configurou-se como sendo fluxo funil.

Na Figura 55 e Tabela 13 têm-se os resultados para a inclinação da tremonha em 67,5°.



**Figura 55:** Descarregamento do silo à 67,5° de inclinação das paredes da tremonha de descarga. (a) Silo totalmente cheio  $H=1$ , (b)  $H=0,8$ , (c)  $H=0,6$ , (d)  $H=0,3$ , (e) Silo totalmente vazio  $H=0$ .

**Tabela 13:** Ocorrência de fluxo à 67,5°.

| Inclinação da tremonha (°) | Índice altura (H) | Comportamento      |
|----------------------------|-------------------|--------------------|
| 67,5                       | 1                 | Material estagnado |
|                            | 0                 |                    |



Observando a Figura 55 e Tabela 13, pode-se afirmar que o perfil de fluxo funil aconteceu ao longo de todo o corpo e paredes, em que a zona de estagnação do material ensilado atingiu altura máxima.

É importante destacar pelas de Figuras 51 a 55, que o canal de fluxo do produto granular em movimento e sua zona de estagnação aumentaram com o acréscimo na inclinação das paredes da tremonha. O contrário também resultou- se verdadeiro, quanto menor foi a inclinação das paredes da tremonha, mais próximo do contato com a superfície das paredes as partículas mantiveram-se.

Este comportamento pode ser explicado pelo aumento no gradiente de velocidade promovido com a maior inclinação das paredes da tremonha em relação a vertical, o que implicou na prevalência de fluxo funil e maior volume de estagnação do material no interior do silo conforme OSTENDORF e SCHWEDES, 2005 [38].

Desta forma pode- se afirmar que o perfil de fluxo funil é caracterizado pelo não movimento total do produto no interior da unidade de armazenamento e ou quando do não movimento dos grãos sobre a parede da tremonha inclinada. Quando o perfil do canal preferencial de fluxo entra em contato com a parede da tremonha o fluxo mássico é totalmente estabelecido, caracterizado pelo movimento total das partículas ensiladas e movimento de massa sobre as paredes da tremonha, como ilustrado na Figura 51 e Tabela 9.

Apresenta- se na Tabela 14 os resultados previstos através da norma e ensaios experimentais.

**Tabela 14:** Resultados previstos pela norma e resultados experimentais com soja.

| Inclinação ( $\beta$ ) | Norma          | Experimental |
|------------------------|----------------|--------------|
| 37,5                   | Mássico        | Mássico      |
| 45                     | Limite mássico | Funil        |
| 52,5                   | Incerto        | Funil        |
| 60                     | Limite funil   | Funil        |
| 67,5                   | Funil          | Funil        |

Conforme os resultados experimentais representados na Tabela 14, a área de incerteza disponível para a predição do padrão de fluxo na EUROCODE (2006) foi caracterizada pelo padrão de fluxo funil.

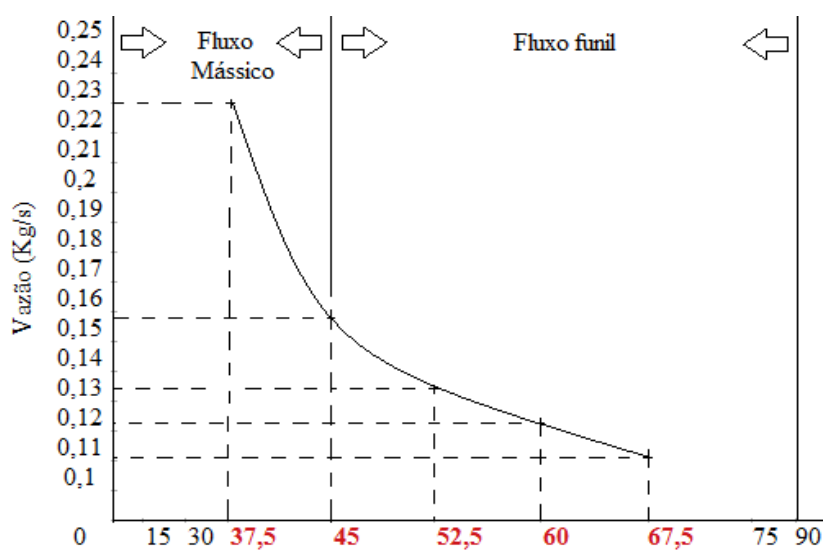
Valores resultantes para vazão estão registrados na Tabela 15.

**Tabela 15:** Resumo dos resultados para cálculo da vazão.

| Ângulo<br>(°) | Repetições | Tempo<br>(s) | Massa<br>(Kg) | Vazão<br>(Kg/s) | Vazão média<br>(Kg/s) |
|---------------|------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------------|
| 37,5          | 1          | 21,4         | 4,958         | 0,232           | 0,23                  |
|               | 2          | 21,7         |               | 0,228           |                       |
|               | 3          | 21,66        |               | 0,229           |                       |
| 45            | 1          | 34,18        | 5,43          | 0,159           | 0,158                 |
|               | 2          | 34,43        |               | 0,158           |                       |
|               | 3          | 34,51        |               | 0,157           |                       |
| 52,5          | 1          | 44,04        | 6,108         | 0,139           | 0,139                 |
|               | 2          | 44,18        |               | 0,138           |                       |
|               | 3          | 44,03        |               | 0,139           |                       |
| 60            | 1          | 49,63        | 6,172         | 0,124           | 0,124                 |
|               | 2          | 49,76        |               | 0,124           |                       |
|               | 3          | 49,77        |               | 0,124           |                       |
| 67,5          | 1          | 55,9         | 6,582         | 0,118           | 0,118                 |
|               | 2          | 55,6         |               | 0,118           |                       |
|               | 3          | 55,71        |               | 0,118           |                       |

#### 4.2 Efeito da inclinação das paredes sobre a vazão e padrão de fluxo.

Os valores obtidos no presente estudo relacionando a vazão, padrão de fluxo e a faixa de inclinação das paredes da tremonha em relação a vertical são apresentados na Figura 56.

**Figura 56:** Efeito da inclinação das paredes sobre a vazão e padrão de fluxo.

Pela Tabela 15 e Figura 56 comprova-se as afirmações feitas por WOODCOCK, C.R e MASON.J.S (1988) [39], em que a vazão tende a ser irregular em fluxo funil, enquanto que em fluxo do tipo mássico a vazão é uniforme e constante, quando da maior incidência de vazão em fluxo mássico com 37,5° e 0,23 Kg/s, e menor vazão resultante em fluxo funil com 67,5° e 0,118 Kg/s.

## 5- CONCLUSÃO

A predição dos padrões de fluxo com base na EUROCODE previu com exatidão somente os comportamentos mássico e funil para as inclinações de 37, 5 e 67, 5°.

A soja apresentou fluxo mássico com 37,5° e fluxo funil com 45; 52,5; 60 e 67,5° de inclinação da parede da tremonha em relação a vertical.

A maior vazão ocorreu quando da inclinação das paredes da tremonha em 37,5° e fluxo mássico, sendo 0,23; 0,158; 0,139; 0,124 e 0,118 Kg/s para as inclinações de 37,5; 45; 52,5; 60 e 67,5°, respectivamente.

### 5.1- Sugestões para trabalhos futuros

a) Realizar a pesquisa com diferentes materiais construtivos para a tremonha e corpo dos silos;

b) Estudar outros produtos granulares de fluxo livre;

c) Determinar os ângulos de atrito interno e da parede pela célula de Jenike.

d) Analisar a influência da abertura da boca de descarga sobre a ocorrência dos padrões de fluxo e obstruções de fluxo;

e) Quantificar o efeito do padrão de fluxo sobre a segregação dos grãos;

f) Investigar a influência da variação da altura de material armazenado no padrão de fluxo e vazão;

g) Realizar pesquisas para diferentes gradientes de velocidade em fluxo mássico, na mitigação da segregação;

h) Comparar os resultados teóricos utilizando as equações para determinação da inclinação mínima, vazão de descarga e abertura mínima da boca de descarga com resultados experimentais.

i) Aferir a influência das dimensões do corpo do silo.

## REFERÊNCIAS UTILIZADAS

- [1] IBGE- Instituto Brasileiro de geografia e estatística. Agência sala de imprensa, notícias, 2019. <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/24787-capacidade-de-armazenagem-agricola-fica-em-169-5-milhoes-de-toneladas-no-2-semester-de-2018>>. Acesso em 20 set. 2019.
- [2] CONAB, Acompanhamento da safra Brasileira de grãos, v. 6 - Safra 2018/19 - Décimo segundo levantamento, Brasília, p. 1-47 setembro 2019. ISSN 2318-6852.
- [3] G1. “As silenciosas mortes de brasileiros soterrados em armazéns de grãos”, disponível em <<https://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2018/08/28/as-silenciosas-mortes-de-brasileiros-soterrados-em-armazens-de-graos.ghtml>>. Acesso em 12 ago 2019.
- [4] Carson, J. W. “Silo Failures: Case histories and lessons learned.” Proc., 3rd Israeli Conf. for Conveying and Handling of Particulate Solids, Dead Sea, Israel, Vol. 1, 4.1-4.11.
- [5] A.B.CHEUNG, et al. “Investigação Estrutural de Silos Metálicos e de Concreto no Brasil. Lisboa: CONPAT, 10 set 2015, 8p. Resumo: p1.
- [6] SILVA. J. Atmosferas explosivas. Instalação de equipamentos elétricos em área classificada Ed. 2, 2016, ISBN 978-85-462-0494-6.
- [7] JORDÃO.D.M, Manual de instalações elétricas em indústrias químicas, petroquímica e de petróleo. Ed. 3, 2002, ISBN 85-7303-342-8.
- [8] PROJECT EXPLO. Manual de bolso de instalações elétricas em atmosferas explosivas. Ed. 6, 2016.
- [9] C.S.B, Chemical Safety Board. Imperial sugar company dust explosion and fire. 2009. Disponível em: <http://www.csb.gov/imperial-sugar-company-dust-explosion-and-fire/>. Acesso em: 11 ago. 2020.
- [10] CALIL Jr., C. Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais. 1990. 198f. Tese de Livre Docência em Engenharia de Estruturas. - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1990.
- [11] INFOPÉDIA, granular in Dicionário infopédia da língua portuguesa. Porto: Porto Editora, 2003-2019. <<https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/granular>>. Acesso em 18 set. 2019.
- [12] EUROCODE 1 - BsEN 1991- 4: Actions on silos and tanks. CEN, Brussels. 2006.
- [13] JENIKE, A. W. Storage and flow of silos. Salt Lake City: University of Utah, 1964. 89 p. (Bulletin, 123).
- [14] JENIKE, A.W : Powders and bulk solids. Salt Lake City: University of Utah, 1961. 322 p. (Bulletin, 29).
- [15] CHAVES, A., FERREIRA, F., LIMA, J., et al, Teoria e prática do tratamento de minérios: manuseio de sólidos granulados, Editora Signus, 2011.
- [16] INTERNATIONAL STANDART ISO 11697: Bases for design of structures: Loads due to bulk materials, London, 1995.

- [17] ASTM, Standard D6128-97, Standard test method for shear testing of bulk solids using the Jenike shear cell, American Society testing and materials, 1997.
- [18] SCHUZE, Dietmar. Globalization: Powders and bulk solids: Behavior, characterization, storage and flow. Tradução: Jörg Schwedes. Braunschweig: Germany, 2007. 517 p. Título original: Globalization: Pulver und Schüttgüter. ISBN 978-3540-73767-4.
- [19] CALIL JUNIOR, C.; CHEUNG, A. B. Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. São Carlos: EESC/USP, 2007. 3-4p; 36p; 53p.
- [20] MEHTA. G; BARKER. C. The dynamics of sand, Reports Prog. Phys. 57 (1994) 383–416.doi:10.1088/0034-4885/57/4/002.
- [21] DAY. R. W. Foundation engineering handbook: design and construction with 2009 international building code, 2nd ed., McGraw Hill companies, Inc., New York, 2010.
- [22] CORREIAS MERCÚRIO S.A. Manual técnico de correias transportadoras. 3. ed. São paulo : Schoba, 2016. 344 p. Largura da correia: p. 98-107. ISBN 978-85-8013-474-2.
- [23] NBR 8011- Cálculo da capacidade de transportadores contínuos. transportadores de correia. AGO 1995.
- [24] TSAKALAKIS, K.G. Mathematical modeling of the conveyor belt capacity. The 8th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids.Tel-Aviv, Israel, May 2015.
- [25] FÁBRICA DE AÇO PAULISTA S. A. Manual de transportadores contínuos. 3. ed. 412 p. Brasil, 1988.
- [26] POHNDORF, R. S.; KLEIN, B.; NASCIMENTO, B. C.; RUTZ, D.; FOGUESATTO, R. J.; ELIAS, M. C. Influência da umidade e do percentual de grãos quebrados e inteiros no ângulo de repouso de soja. In: ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO – UFPEL, 13, Pelotas, 2011.
- [27] CARDOSO.A.L. et.al. Determinação experimental dos ângulos de repouso dos farelos de soja NGMO (não transgênico) e GMO (transgênico) em unidades de bancada e em pilhas de Terminal Portuário. ISSN2595-362. DOI:<https://doi.org/10.34115/basrv4n4-030>.
- [28] HAMZAH. M. et al. A review on the angle of repose of granular materials. 2 February 2018. doi:10.1016/j.powtec.2018.02.003.
- [29] CARR, R. L. Properties of Solids. Chemical Engineering, v. 13, 1969.
- [30] CARDOSO.A.L. et. Al. Características de escoabilidade do farelo de soja NGMO (não transgênico) em estado aerado e consolidado - Uma atividade experimental. ISSN: 2594-615.
- [31] ENSTAD,G.G. A novel theory on the arching and doming in mass flow hoppers, Bergen:The Milchelsen Institute, 1981.172p.
- [32] CALIL JUNIOR, C.; CHEUNG, A. B. Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. São Carlos: EESC/USP, 2007.

48p.

[33] CHAVES, Arthur P. Teoria e Prático do Tratamento de Minérios: Manuseio de sólidos granulares.2.ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012. 384 p.,20 mm. Ensaio de cisalhamento sob carga: p. 127,134,137. ISBN 978-85-7975-045-8.

[34] CALIL JUNIOR, C.; CHEUNG, A. B. Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. São Carlos: EESC/USP, 2007. 53;3p.

[35] CALIL Jr., C. Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais. 1990. 198f. Tese de Livre Docência em Engenharia de Estruturas. - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1990.

[36] Lopes Neto, JP.; Nascimento, J.W.B. Características de fluxo e projeto de tremonhas cônicas em silos verticais. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental,v.17,n.3,p.339-345,2012.

[37] ENGBLOM. N ,et al. “Effects of process parameters and hopper angle on segregation of cohesive ternary powder mixtures in a small scale cylindrical silo”. Advanced Powder Technology. 14 p, 2011.

[38] OSTENDORF, M.; SCHWEDES, J. Application of particle image velocimetry for velocity measurements during silo discharge. Powder Technology, v.158, p.69-75, 2005.

[39] WOODCOCK. C.R, MASON.J.S: Bulk Solids Handling. An introduction to the practice and technology. Blackie Academic e Professional: London, 1988. p.54-57. ISBN-13: 978-94-010-7689-0.

## **Características de fluxo e vazão de soja em silos prismáticos com tremonhas retangulares cuneiformes**

### **Characteristics of soy flow and flow in prismatic silos with rectangular cuneiform hoppers**

DOI:10.34117/bjdv6n5-367

Recebimento dos originais:13/04/2020

Aceitação para publicação:19/05/2020

#### **André Luiz Cardoso**

Engenheiro de Controle e Automação, pós graduado em Engenharia de Segurança do Trabalho.

Mestrando em Engenharia Mecânica Instituição:

Universidade Santa Cecília (UNISANTA)

Endereço: Rua Leonor mendes de barros, 185. Vila São Jorge, São Vicente - SP, Brasil.

E-mail: vidanova.es@gmail.com

#### **Jovêncio José de Sousa Filho**

Endereço: Rua 6, 4157. Valongo, Santos- SP, Brasil.

E-mail: jovenciosousa9@gmail.com

#### **Deovaldo de Moraes Júnior**

Doutor em Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP CNRS/Fr.

Instituição: Unisanta

Endereço: Rua Oswaldo Cruz, 277. Boqueirão, Santos- SP, Brasil.

E-mail: deovaldo@unisanta.br

#### **Marlene Silva de Moraes**

Doutora em Sistemas de Processos Químicos e informática pela Unicamp.

Instituição: Unisanta

Endereço: Rua Oswaldo Cruz, 277.Boqueirão, Santos- SP, Brasil.

E-mail: marlene@unisanta.br

#### **Vitor da Silva Rosa**

Doutor em Engenharia Química pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Instituição:

Universidade Santa Cecília

Endereço: Rua Oswaldo Cruz, 277, Boqueirão, Santos - SP, Brasil.

E-mail: profvitorrosaphd@gmail.com

#### **Rogério Ruiz**

MSc em Engenharia Mecânica pelo Instituto de Tecnologia Aeronáutica

Instituição: ITA

Endereço: Rua dos Pintassilgos, 76, Jd Italia, Vinhedo/SP, 13.280-000, Brasil.

E-mail: rruiz@jenike.com

## RESUMO

A caracterização do padrão de fluxo e vazão dos produtos granulares é essencial para o projeto de silos destinados ao seu armazenamento. As normas internacionais e estrangeiras apresentam gráficos para a determinação da ocorrência dos padrões de fluxo no interior de um silo a partir de tremonhas do tipo cônicas e retangulares, porém contendo áreas de incerteza. O presente trabalho teve por objetivo caracterizar experimentalmente o fluxo e a vazão de uma amostra de soja em um silo prismático com tremonha retangular cuneiforme, considerando a área de incerteza da norma (EUROCODE, 2006). Os resultados apresentaram padrão de fluxo mássico e vazão de 0.23 Kg/s para inclinação da parede da tremonha em 37.5° e fluxo funil entre 45 e 67.5° com vazão entre 0.158 e 0.118 Kg/s respectivamente.

**Palavras Chave:** Silo prismático; silo retangular; características de fluxo; tremonhas retangulares; produtos granulares, Eurocode.

## ABSTRACT

Characterization of the flow rate and flow pattern of granular products is essential for the design of silos for storage. International and foreign standards present graphs for determining the occurrence of flow patterns within a silo from conical and rectangular hoppers, but containing areas of uncertainty. The present work aimed to experimentally the flow and flow rate of a soybean sample in a prismatic silo with a rectangular hopper, considering the area of uncertainty of the standard (EUROCODE, 2006) The results showed a mass flow pattern and flow rate of 0.23 Kg/s for hopper wall inclination at 37.5° and funnel flow between 45 and 67.5° with flow rates between 0.158 and 0.118 kg/s resctive

**Keywords:** Prismatic Silo; rectangular silo; flow characteristics; rectangular hoppers; granular products, Eurocode.

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo pesquisa realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), o Brasil armazenou 169.5 milhões de toneladas de grãos no segundo semestre de 2018, sendo que o estoque de produtos granulares agrícolas totalizou 24.3 milhões de toneladas.

Das unidades de armazenamento e conservação disponíveis como área útil para armazenamento de produtos granulares de origem agrícola no Brasil, há predominância dos silos, alcançando 81.8 milhões de toneladas de grãos no segundo semestre de 2018, representando 48.3% da sua capacidade total de armazenagem.



## *Brazilian Journal of Development*

A falha no projeto de um silo pode provocar colapsos estruturais e seu incorreto funcionamento (CARSON, 2000). O dimensionamento incorreto dos elementos metálicos e de concreto, falhas operacionais, falta de informações das propriedades físicas dos produtos armazenados, são alguns dos exemplos mais evidenciados nos estudos de causa de acidentes e colapsos em silos realizados por CHEUNG. et al, 2015.

Segundo (CALIL JR, 1990) é necessário o conhecimento detalhado das propriedades físicas dos produtos a serem armazenados em silos de modo a assegurar o seu adequado e seguro funcionamento. O conhecimento antecipado de variáveis como o tipo de fluxo e vazão é de fundamental aplicação desde as fases de projeto.

Ao analisar o comportamento de vazão dos materiais em função do perfil de fluxo WOODCOCK.C.R e MASON.J.S, 1988 concluíram que a vazão tende a ser irregular em fluxo funil, enquanto que em fluxo do tipo mássico a vazão é uniforme e constante, o que demonstra que a vazão é alterada diretamente pelo padrão de fluxo ocorrente, considerando a mesma abertura de boca de descarga.

O dimensionamento da abertura mínima da boca de descarga é importante na prevenção de problemas com obstruções de fluxo (SCHULZE, 2007 e ROOTER apud CALIL, 2007) e pode ser determinada sem a influência do produto armazenado sobre as paredes da tremonha (HAAKER, 1999). Como predeterminado em normas estrangeiras e internacionais (EUROCODE, 2006; ISO 11697, 1995) o tipo de padrão de fluxo ocorre em função da inclinação e do coeficiente de atrito do produto com as paredes da tremonha.

Ao investigar as características de fluxo e projeto de tremonhas cônicas para produtos coesivos em silos verticais (NETO, J.L.P e NASCIMENTO, J.W.B, 2012) obtiveram com êxito a sequência de imagens do padrão de fluxo resultante durante o seu esvaziamento por drenagem.

De acordo com (CHAVES, 2012), com o intuito de simular as condições reais de operação de estocagem em silos a temperatura e a umidade dos grãos não devem ser alteradas.

Silo é definido como sendo toda construção ou estrutura destinada ao armazenamento e a conservação de qualquer produto granular industrial ou agrícola e é composto basicamente de cobertura, corpo e tremonha de descarga. Existem silos de fundo plano e de fundo convergente, o fundo convergente é também chamado de tremonha de descarga (CALIL, 2007), como ilustrado na Figura 1.

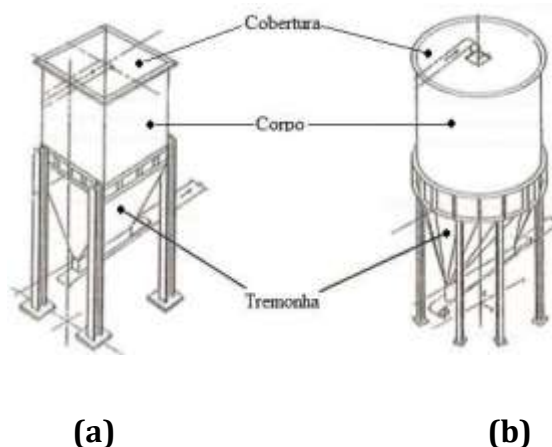


Figura 1: Silos metálicos. (a) prismático com tremonha cuneiforme, (b) cilíndrico com tremonha tipo cinzel.  
 Fonte: Adaptado de NEFF & HUSS, 1983.a, 1983.b.

De acordo com a (EUROCODE, 2006) a tremonha de descarga é destinada a produzir fluxo nos sólidos armazenados, e é por meio da qual os padrões de fluxo são determinados.

A norma (EUROCODE, 2006) e a internacional (ISO 11697, 1995) definem duas variáveis a serem consideradas na predição da ocorrência dos padrões de fluxo no interior de um silo, o coeficiente de atrito do produto com as paredes da tremonha ( $\mu$ ) e a inclinação das suas paredes ( $\beta$ ).

Dois padrões básicos de fluxo podem ocorrer durante a descarga de produtos no interior de um silo, o fluxo mássico e fluxo de funil conforme descrição feita por (JENIKE, 1964).

O padrão de fluxo mássico é caracterizado pelo movimento dos grãos sobre as paredes da tremonha, de forma que toda a massa de material esteja em movimento, enquanto que no padrão de fluxo funil há o surgimento de zonas de estagnação sobre as paredes da tremonha, conforme esquematizados na Figura 2.

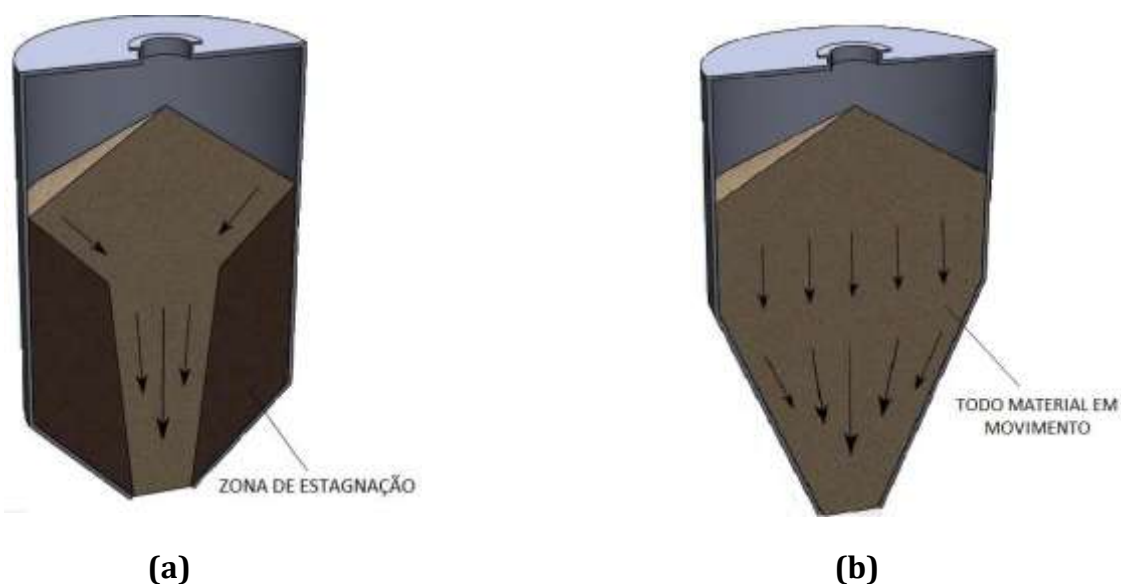


Figura 2: Padrões de fluxo. (a) mássico, (b) funil. Fonte: adaptado de JENIKE SOLUTIONS.

A soja é um produto granular comum no meio agrícola e as suas propriedades físicas estão descritas em norma, resumidas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades físicas da soja

| Produto | Peso específico<br>( $\gamma$ )<br>(kN/m <sup>3</sup> ) |     | Atrito interno<br>( $\phi_i$ )<br>graus<br>fator |      | Coeficiente de atrito com a parede<br>( $\mu$ )<br>$\mu = \tan \phi_w$<br>fator |      |      |      |
|---------|---------------------------------------------------------|-----|--------------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|
|         | Min                                                     | Máx | (°)                                              | -    | D1                                                                              | D2   | D3   | -    |
| Soja    | 7                                                       | 8   | 25                                               | 1.16 | 0.24                                                                            | 0.38 | 0.48 | 1.16 |

Nota: Essas propriedades podem ser adequadas para pequenas instalações. No entanto, levarão a projetos muito econômicos para grandes silos, e os testes devem sempre ser preferidos.

Fonte: Adaptado da EUROCODE-1991-4: 2006.

A EUROCODE (2006) disponibiliza gráficos para a determinação da ocorrência dos padrões de fluxo a partir de tremonhas do tipo cônicas e retangulares contendo áreas de incerteza ou margens de segurança, para acomodar as variações das propriedades físicas dos materiais, sobretudo para tremonhas retangulares cuneiformes.

A categoria de atrito da tremonha de descarga é descrita em função do material constitutivo de suas paredes (Tabela 2).

Tabela 2: Determinação de superfície de parede.

| Categoria | Descrição                                        | Materiais típicos de parede                                                                                                                                                                       |
|-----------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| D1        | Baixo Atrito<br>(classificado como escorregadio) | (UHMW) Polietileno de ultra-alto peso molecular<br>Aço inoxidável laminado a frio<br>Aço inoxidável polido<br>Superfície revestida projetada para baixo atrito<br>Alumínio polido                 |
| D2        | Atrito moderado<br>(classificado como suave)     | Aço carbono suave (construção soldada ou parafusada)<br>Acabamento em aço inoxidável<br>Aço carbono galvanizado<br>Alumínio oxidado<br>Superfície revestida projetada para resistência à corrosão |
| D3        | Atrito alto<br>(classificado como áspero)        | Concreto fora de forma, concreto acabado ou envelhecido<br>Aço carbono envelhecido (corroído)<br>Aço resistente à abrasão<br>Telhas de cerâmica                                                   |
| D4        | Irregular                                        | Paredes onduladas horizontalmente<br>Folhas perfiladas com nervuras horizontais<br>Paredes não padronizadas com grandes aberrações                                                                |

Fonte: Adaptado da EUROCODE-1991-4:2006.

Pela Figura 3 é possível notar a área de incerteza para a predição do padrão de fluxo disponível em norma, para grãos de soja escoando sobre uma parede de material de coeficiente de baixo atrito  $\mu = 0.24$ , em ângulos  $\beta = 45^\circ$ ,  $52,5^\circ$  e  $60^\circ$  graus de inclinação da parede da tremonha.

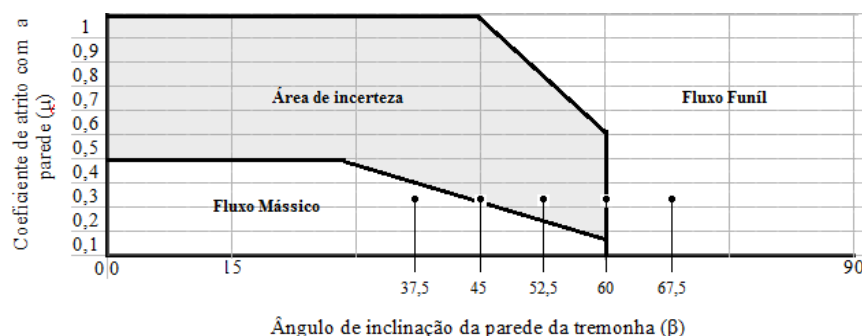


Figura 3: Ângulos definidos para ensaios experimentais sobre o gráfico da norma. Fonte: Adaptado da EUROCODE-1991-4:2006

Este trabalho teve por objetivo caracterizar experimentalmente os padrões de fluxo e vazão dos grãos de soja em silos verticais prismáticos com tremonhas de descarga retangulares cuneiformes, na área de incerteza disponível em norma para o ângulo de  $52,5^\circ$ , limites com a área de incerteza para os ângulos de  $45^\circ$  e  $60^\circ$  e áreas definidas como fluxo mássico e funil em  $37,5^\circ$  e  $67,5^\circ$ .

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Visando caracterizar experimentalmente o fluxo e a vazão dos grãos de soja no interior de um silo prismático, foi projetado e construído o aparelho esquematizado na Figura 4.

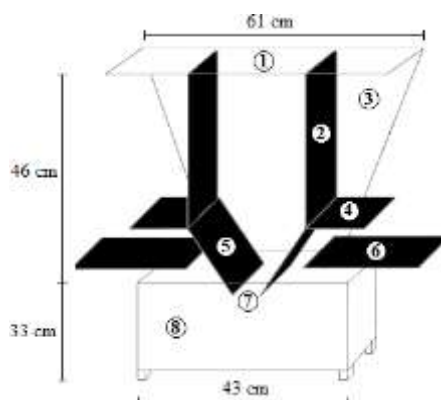


Figura 4: Esquema da unidade experimental. (1) entrada dos grãos, (2) corpo ajustável, (3) parede frontal e traseira de acrílico transparente, (4) dispositivo para o ajuste da abertura da tremonha, (5) paredes ajustáveis da tremonha de descarga, (6) dispositivo para o ajuste da inclinação da tremonha, (7) boca de descarga e saída dos grãos, (8) reservatório de grãos.

A unidade experimental era constituída basicamente de corpo, tremonha de descarga e reservatório de grãos construídas com polietileno de ultra- alto peso molecular de 10 mm de espessura. Devido à opacidade do polietileno as peças frontal e traseira do corpo foram fabricadas com acrílico transparente de 10 mm de espessura, conforme apresenta-se na Figura 5.

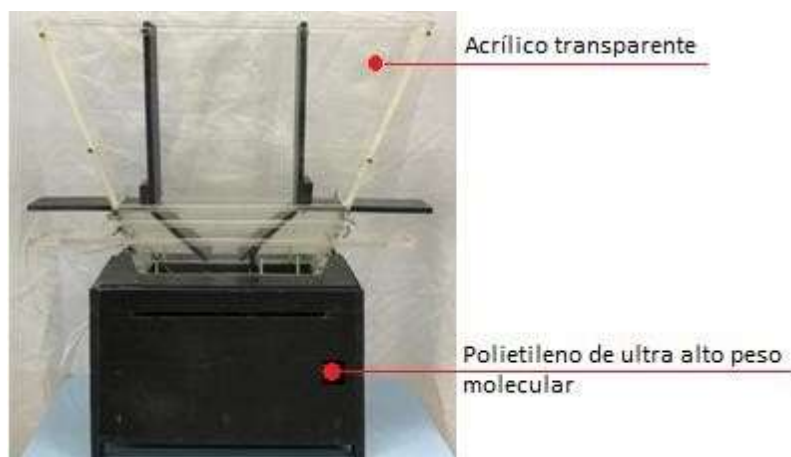


Figura 5: Fotografia da unidade experimental.

As medidas de inclinação e abertura da boca de descarga foram fixadas por meio dos dispositivos indicados na Figura 6.



Figura 6: Dispositivos de fixação. (a) abertura da boca de descarga; (b, c) inclinação das paredes da tremonha.

O procedimento experimental consistiu no carregamento manual e concêntrico do silo até seu completo enchimento e total escoamento por drenagem a partir da abertura da boca de descarga, onde, em relação a cada ângulo ensaiado, obteve-se o padrão de fluxo e vazão correspondente.

Os limites da unidade experimental estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Limites operacionais do aparelho.

|        | Boca de descarga (bf)<br>(mm) | Inclinação da parede da<br>tremonha<br>(° graus - em relação à vertical) | Corpo silo<br>(mm) |
|--------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Mínimo | 97                            | 15                                                                       | 0                  |
| Máximo | 345                           | 85                                                                       | 365                |

Ilustra-se na Figura 7 a referência vertical utilizada em relação ao ajuste do ângulo de inclinação da parede da tremonha;

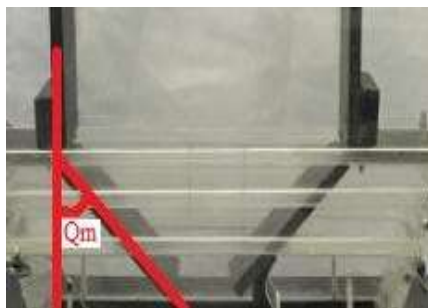


Figura 7: Ângulo ( $Q_m$ ) de inclinação da parede da tremonha com a vertical.

Com o intuito de evitar obstruções de fluxo e a influência na vazão resultante, foi padronizada a abertura de saída na tremonha para todas as inclinações, sendo adotado experimentalmente o padrão de abertura da boca de descarga (bf) em 97 mm. A medida de (bf) ilustrada na Figura 8 corresponde a diagonal da boca de descarga retangular.

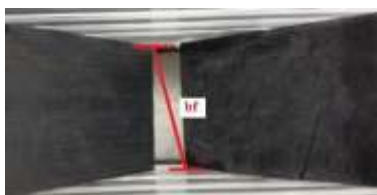


Figura 8: Vista superior da boca de descarga.

O ajuste da inclinação da parede da tremonha de descarga ( $Q_m$ ) foi feito por meio de um goniômetro com range de  $180^\circ$  e resolução de  $1^\circ$ . Na calibração da medida de abertura da boca de descarga foi utilizado um paquímetro de 150 mm com resolução de 0.005 mm. Têm-se nas Figuras 9 e 10 a ilustração dos instrumentos mencionados;



Figura 9: Goniômetro.



Figura 10: Paquímetro.

Na determinação do teor de umidade, temperatura e peso específico da amostra foi utilizado medidor da marca GEHAKA, modelo G810, conforme Figura 11;



Figura 11: Medidor digital.

A vazão foi determinada pela técnica da massa por unidade de tempo para o esvaziamento total do silo. A massa foi aferida através da pesagem do produto em uma balança digital com resolução de 0.01 kg e o tempo medido por meio de um cronômetro digital com resolução de 0.01 s.

As imagens foram feitas com uma câmera digital posicionada perpendicularmente a 1.5 metros de distância da unidade experimental.

Os experimentos foram feitos em triplicata afim de obter-se maior exatidão.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O polietileno de ultra- alto peso molecular resultou na categoria de baixo atrito (D1) pela Tabela 2 e o coeficiente de atrito da soja com as paredes da tremonha ( $\mu$ ) em 0.24 pela Tabela 1.

É importante citar que a norma indica o fator de variância de 1,16 (Tabela 1), podendo-se portanto adotar um coeficiente de atrito da soja com as paredes da tremonha ( $\mu$ ) na faixa de 0.207 a 0.278.

O teor de umidade foi de 11.3% e o peso específico de 0.72 Ton/m<sup>3</sup>. Têm-se na Tabela 4 a predição de fluxo interpretada pela norma (EUROCODE, 2006).

Tabela 4: Padrão de fluxo previsto pela EUROCODE.

| Inclinação ( $\beta$ ) | Padrão de fluxo |
|------------------------|-----------------|
| 37.5                   | Mássico         |
| 45                     | Limite mássico  |
| 52.5                   | Incerto         |
| 60                     | Limite funil    |
| 67.5                   | Funil           |



Segundo CARSON.J e RUIZ. R (2016), com o objetivo de evitar projetos muito conservativos ou inseguros, as propriedades físicas dos materiais devem ser determinadas em ensaios laboratoriais e a partir de uma amostra real e representativa do produto a ser estocado, corroborando com a recomendação da própria EUROCODE, conforme nota (Tabela 1).

## 3.1 PADRÃO DE FLUXO

São mostradas a seguir a Figura 12 e Tabela 5, referentes aos ensaios com a inclinação de 37.5°, onde todo o material ensilado apresentou movimento sobre as paredes do corpo e da tremonha. Apenas com a inclinação das paredes em 37.5° houve ocorrência de fluxo mássico ao longo de todo o corpo do silo e tremonha de descarga.

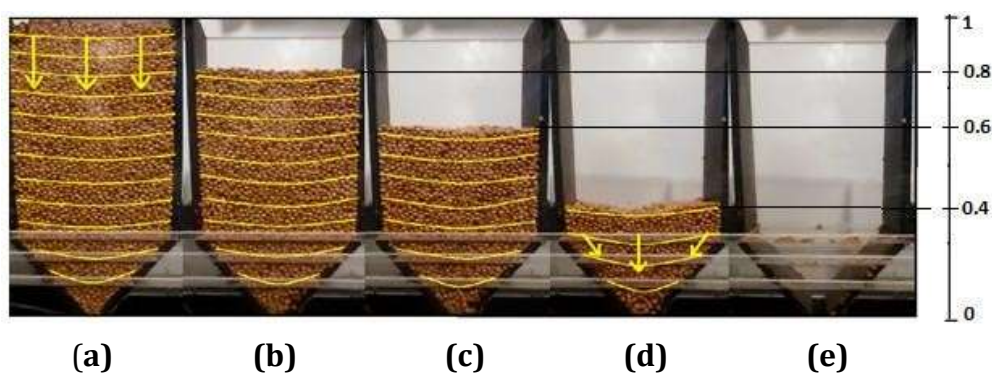


Figura 12: Descarregamento do silos à 37.5° de inclinação das paredes da tremonha de descarga.

- (a) Silo totalmente cheio  $H=1$
- (b)  $H=0.8$ ,
- (c)  $H=0.6$ ,
- (d)  $H=0.4$ ,
- (e) Silo totalmente vazio  $H=0$ .

Tabela 5: Ocorrência de fluxo à 37.5°.

| Inclinação da tremonha (°) | Índice altura (H) | Comportamento              |
|----------------------------|-------------------|----------------------------|
| 37.5                       | 1                 | Todo material em movimento |
|                            | 0                 |                            |

É interessante acrescentar que cuidados adicionais para redução das diferenças no gradiente de velocidade devem ser tomados com o intuito de minimizar a segregação do produto armazenado durante

## Brazilian Journal of Development

a descarga do silos de fluxo mássico. Destaca-se que quanto mais íngreme as paredes da tremonha resultará em maior homogeneização do material ensilado, mitigando os efeitos de segregação por percolação, conforme ENGBLOM. N. et al. (2011).

A Figura 13 e Tabela 6, refere-se aos registros de fluxo com a inclinação de  $45^\circ$ , sendo o padrão de fluxo mássico predominante entre  $H=1$  e  $0.6$  da altura do silos. Notou-se a ocorrência do volume de produto estagnado em  $H=0.35$ , portanto caracterizado como fluxo funil.

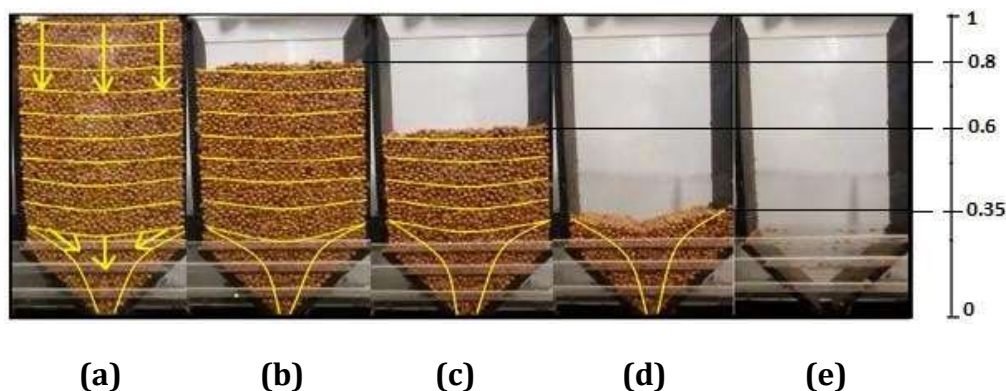


Figura 13: Descarregamento do silos à  $45^\circ$  de inclinação das paredes tremonha de descarga.

- (a) Silo totalmente cheio  $H=1$ ,
- (b)  $H=0.8$ ,
- (c)  $H=0.6$ ,
- (d)  $H=0.35$ ,
- (e) Silo totalmente vazio  $H=0$ .

Tabela 6: Ocorrência de fluxo à  $45^\circ$ .

| Inclinação da tremonha ( $^\circ$ ) | Índice altura (H) | Comportamento              |
|-------------------------------------|-------------------|----------------------------|
| 45                                  | 1                 | Todo material em movimento |
|                                     | 0.36              |                            |
|                                     | 0.35              | Zonas com                  |
|                                     | 0                 | Estagnação                 |

Pela Figura 13 e Tabela 6 pode-se observar que o maior volume de material esteve em movimento durante o descarregamento do silo, enquanto que o menor volume de material manteve-se estagnado sobre as paredes da tremonha, sendo este comportamento classificado como fluxo funil. A inclinação de

45° representou o ensaio para análise do padrão de fluxo na linha de limite entre o fluxo mássico e a área de incerteza representada na Figura 3.

Têm-se na Figura 14 e Tabela 7 os ensaios com a inclinação em 52.5°, ocorrendo novamente o fluxo funil, em que a partir de  $H=0.6$  observa-se maior volume de material estagnado no interior do silo;

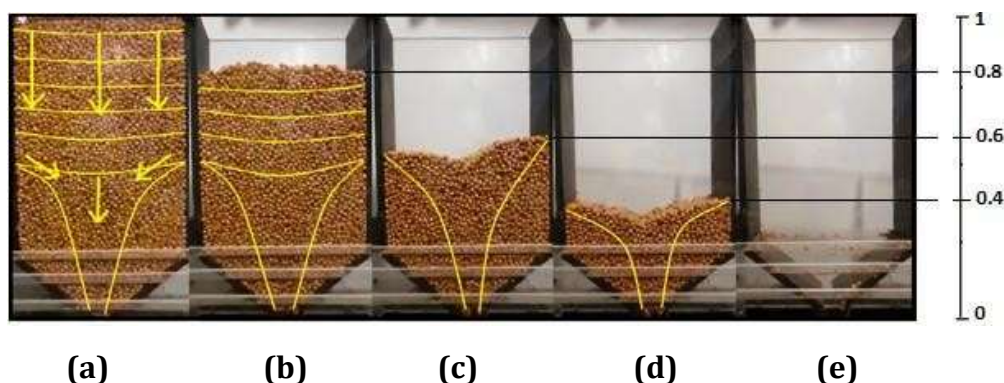


Figura 14: Descarregamento do silo à 52.5° de inclinação das paredes da tremonha de descarga.

- (a) Silo totalmente cheio  $H=1$ ,  
 (b)  $H=0.8$ ,  
 (c)  $H=0.6$ ,  
 (d)  $H=0.4$ ,  
 (e) Silo totalmente vazio  $H=0$ .

Tabela 7: Ocorrência de fluxo à 52.5°.

| Inclinação da tremonha (°) | Índice altura (H) | Comportamento              |
|----------------------------|-------------------|----------------------------|
| 52.5                       | 1                 | Todo material em movimento |
|                            | 0.61              |                            |
|                            | 0.6               | Zonas com Estagnação       |
|                            | 0                 |                            |

Os registros realizados durante o processo de esvaziamento por drenagem para inclinação da parede da tremonha em 60° estão ilustrados na Figura 15, e o resumo contendo a interpretação na Tabela 8;

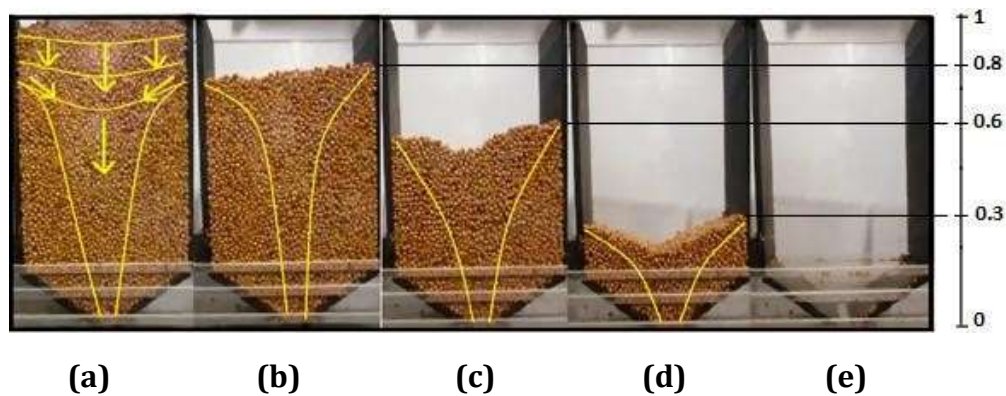


Figura 15: Descarregamento dos silo à 60° de inclinação das paredes da tremonha de descarga.

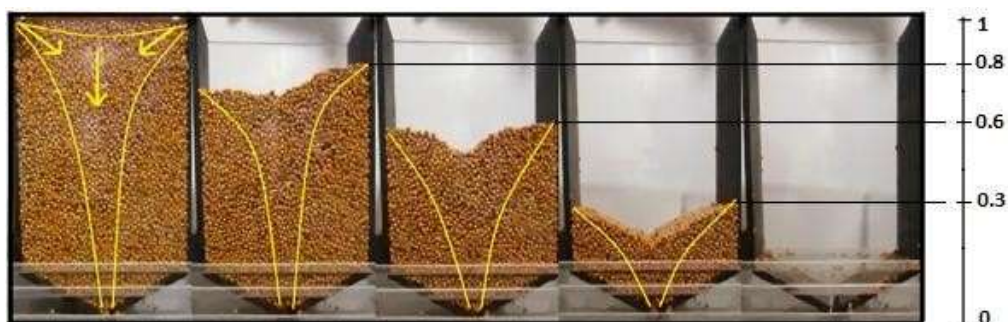
- (a) Silo totalmente cheio  $H=1$ ,  
 (b)  $H=0.8$ ,  
 (c)  $H=0.6$ ,  
 (d)  $H=0.3$ ,  
 (e) Silo totalmente vazio  $H=0$ .

Tabela 8: Ocorrência de fluxo à 60°.

| Inclinação da tremonha (°) | Índice altura (H) | Comportamento              |
|----------------------------|-------------------|----------------------------|
| 60                         | 1                 | Todo material em movimento |
|                            | 0.81              |                            |
|                            | 0.8               | Zonas com Estagnação       |
|                            | 0                 |                            |

A inclinação de 60° representou o ensaio para análise do padrão de fluxo na linha de limite entre o fluxo funil e a área de incerteza (Figura 3), em que houve a ocorrência de zonas de estagnação, configurou-se como sendo fluxo funil.

Na Figura 16 e Tabela 9 têm-se os resultados para a inclinação da tremonha em 67.5°;



(a)                      (b)                      (c)                      (d)                      (e)

Figura 16: Descarregamento dos silo à 67.5° de inclinação das paredes da tremonha de descarga.

(a) Silo totalmente cheio  $H=1$ ,  
 (b)  $H=0.8$ ,  
 (c)  $H=0.6$ ,  
 (d)  $H=0.3$ ,  
 (e) Silo totalmente vazio  $H=0$ .

Tabela 9: Ocorrência de fluxo à 67.5°.

| Inclinação da tremonha (°) | Índice altura (H) | Comportamento |
|----------------------------|-------------------|---------------|
| 67.5                       | 1                 | Zonas com     |
|                            | 0                 | Estagnação    |

Observando a Figura 16 e Tabela 9, pode-se afirmar que o perfil de fluxo funil aconteceu ao longo de todo o corpo e paredes, em que a zona de estagnação do material ensilado atingiu altura máxima.

É importante destacar pelas de Figuras 12 a 16, que o canal de fluxo do produto granular em movimento e sua zona de estagnação aumentaram com o acréscimo na inclinação das paredes da tremonha. O contrário também resultou- se verdadeiro, quanto menor foi a inclinação das paredes da tremonha, mais próximo do contato com a superfície das paredes as partículas em movimento mantiveram-se.

Este comportamento pode ser explicado pelo aumento no gradiente de velocidade promovido com a maior inclinação das paredes da tremonha em relação a vertical, o que implicou na prevalência de fluxo funil e maior volume de estagnação do material no interior do silo conforme OSTENDORF e SCHWEDES, 2005.

Desta forma pode- se afirmar que o perfil de fluxo funil é caracterizado pelo não movimento total do produto no interior da unidade de armazenamento e ou quando do não movimento dos grãos sobre a parede da tremonha inclinada.

Quando o perfil do canal preferencial de fluxo entra em contato com a parede da tremonha o fluxo mássico é totalmente estabelecido, caracterizado pelo movimento total das partículas ensiladas e movimento de massa sobre as paredes da tremonha, como ilustrado na Figura 12 e Tabela 5.

Apresenta- se na Tabela 10 os resultados previstos através da norma e ensaios experimentais;

Tabela 10: Resultados previstos pela norma e resultados experimentais com soja.

| Inclinação ( $\beta$ ) | Norma          | Experimental |
|------------------------|----------------|--------------|
| 37.5                   | Mássico        | Mássico      |
| 45                     | Limite mássico | Funil        |
| 52.5                   | Incerto        | Funil        |
| 60                     | Limite funil   | Funil        |
| 67.5                   | Funil          | Funil        |

Conforme os resultados experimentais representados na Tabela 10, a área de incerteza disponível para a predição do padrão de fluxo na EUROCODE (2006) foi caracterizada pelo padrão de fluxo funil.

### 3.2 VAZÃO

Valores resultantes para vazão estão registrados na Tabela 11;

Tabela 11: Resumo dos resultados

| Ângulo ( $^{\circ}$ ) | 37.5 | 45    | 52.5  | 60    | 67.5  |
|-----------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| Vazão (Kg/s)          | 0.23 | 0.158 | 0.139 | 0.124 | 0.118 |

### 3.3 EFEITO DA INCLINAÇÃO DAS PAREDES SOBRE A VAZÃO E PADRÃO DE FLUXO

Os valores obtidos no presente estudo relacionando a vazão, padrão de fluxo e a faixa de inclinação das paredes da tremonha em relação a vertical são apresentados na Figura 17;

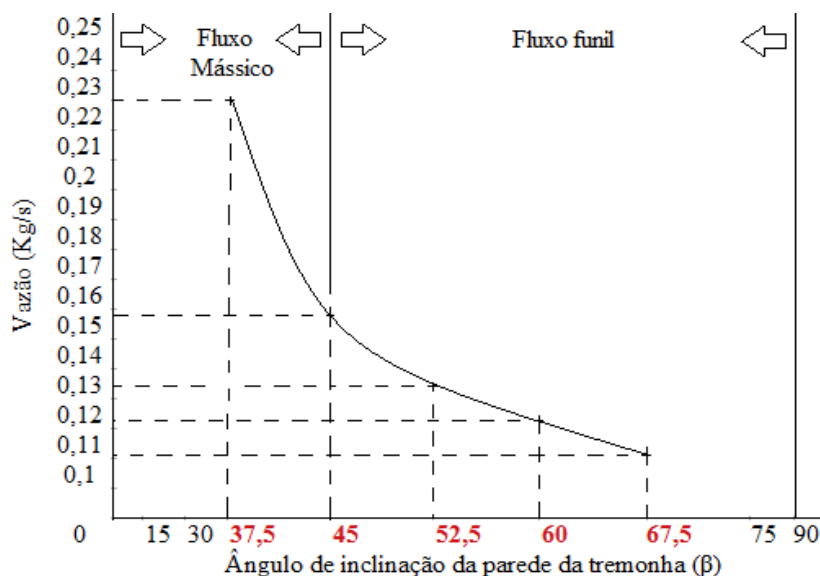


Figura 17: Efeito da inclinação das paredes sobre a vazão e padrão de fluxo.

Pela Tabela 11 e Figura 17 comprova-se as afirmações feitas por WOODCOCK. C.R e MASON.J.S (1988), em que a vazão tende a ser irregular em fluxo funil, enquanto que em fluxo do tipo mássico a vazão é uniforme e constante, quando da maior incidência de vazão em fluxo mássico com 37.5° e 0.23 Kg/s, e menor vazão resultante em fluxo funil com 67.5° e 0.118 Kg/s.

#### 4. CONCLUSÃO

A previsão dos padrões de fluxo com base na norma EUROCODE corresponderam aos padrões observados.

A soja apresentou fluxo mássico com 37.5° e fluxo funil com 45, 52.5, 60 e 67.5° de inclinação da parede da tremonha em relação a vertical.

A maior vazão ocorreu quando da inclinação das paredes da tremonha em 37.5° e fluxo mássico, sendo 0.23; 0.158; 0.139; 0.124 e 0.118 Kg/s para as inclinações de 37.5; 45; 52.5; 60 e 67.5°, respectivamente.

#### REFERÊNCIAS

A.B.CHEUNG, et al. Investigação Estrutural de Silos Metálicos e de Concreto no Brasil. Lisboa: CONPAT, 10 set 2015, 8p. Resumo: p1.

CALIL Jr., C. Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais. 1990. 198f. Tese de Livre Docência em Engenharia de Estruturas. - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de



São Paulo, 1990.

CALIL JUNIOR, C.; CHEUNG, A. B. Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. São Carlos: EESC/USP, 2007. 3- 4p; 36p; 38p; 48p; 53p.

CARSON, J. W. "Silo Failures: Case histories and lessons learned". Proc., 3rd Israeli Conf. for Conveying and Handling of Particulate Solids, Dead Sea, Israel, Vol. 1, 2000.

CARSON, J. W; RUIZ. R. "Silo Design Codes: Recommendations for a Brazilian Standard". Rio de Janeiro, 24<sup>th</sup> World Mining of Innovation, 2016.

CHAVES, Arthur P. Teoria e Prático do Tratamento de Minérios: Manuseio de sólidos granulares. 2.ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012. 384 p., 20 mm. Ensaio de cisalhamento sob carga: p. 127, 134, 137. ISBN 978-85-7975-045-8.

ENGBLOM, N ,et al. "Effects of process parameters and hopper angle on segregation of cohesive ternary powder mixtures in a small scale cylindrical silo". Advanced Powder Technology. 14 p, 2011.

EUROCODE 1 - BsEN 1991- 4: Actions on silos and tanks. CEN, Brussels. 2006.

HAAKER, G. An introduction to the storage of bulk solids in silos. Twente: University of Twente, The Netherlands, 1999, 45p.

IBGE- Instituto Brasileiro de geografia e estatística. Agência sala de imprensa, notícias, 2019. <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/24787>- Acesso em 20 set. 2019.

INTERNATIONAL STANDART ISO 11697: Bases for design of structures: Loads due to bulk materials, London, 1995.

JENIKE, A. W. Storage and flow of silos. Salt Lake City: University of Utah, 1964. 89 p. (Bulletin, 123). NETO, JP.; NASCIMENTO, J.W.B. Características de fluxo e projeto de tremonhas cônicas em silos verticais. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental, v.17, n.3, p.339-345, 2012.

OSTENDORF, M.; SCHWEDES, J. Application of particle image velocimetry for velocity measurements during silo discharge. Powder Technology, v.158, p.69-75, 2005.

SCHULZE, Dietmar. Globalization: Powders and bulk solids: Behavior, characterization, storage and flow. Tradução: Jörg Schwedes. Braunschweig: Germany, 2007. 517 p. Título original: Globalization: Pulver und Schüttgüter. p.1-4. ISBN 978-3540-73767-4.

WOODCOCK. C.R, MASON.J.S: Bulk Solids Handling. An introduction to the practice and technology. Blackie Academic e Professional: London, 1988. p.54-57. ISBN-13: 978-94-010-7689-0.



APÊNDICE A2- Aferição e cálculo do diâmetro médio dos grãos de soja;



Amostra 1



Amostra 2



Amostra 3



Amostra 4



Amostra 5



Amostra 6



Amostra 7



Amostra 8



Amostra 9



Amostra 10



Perspectiva geral das amostras

| Resumo das aferições realizadas |                       |
|---------------------------------|-----------------------|
| Amostras                        | Diâmetro aferido (mm) |
| 1                               | 7                     |
| 2                               | 8                     |
| 3                               | 8,5                   |
| 4                               | 7,2                   |
| 5                               | 6                     |
| 6                               | 7,2                   |
| 7                               | 6,1                   |
| 8                               | 6,9                   |
| 9                               | 7,1                   |
| 10                              | 7,2                   |

Cálculo do diâmetro médio;

$$Ms = \frac{\sum \text{Amostras}}{\text{Quantidade de Amostras}}$$

$$Ms = \frac{7+8+8,5+7,2+6+7,2+6,1+6,9+7,1+7,2}{10}$$

$$Ms = 7,12 \text{ mm.}$$

Em que:  
Ms - Média aritmética

APÊNDICE A3- Cálculo da inclinação mínima da parede da tremonha;

- I) Obter ângulo de atrito pela Tabela 4 ou ANEXO A1;

$$\mu = 0,24$$

- II) Converter coeficiente em graus;

$$\phi_w = \tan^{-1} \mu$$

$$\phi_w = \tan^{-1} 0,24$$

$$\phi_w = 13,49^\circ$$

- III) Para produtos de fluxo livre considerar igualdade entre o ângulo de atrito interno com o efetivo ângulo de atrito interno, obtido na Tabela 4 ou ANEXO A1;

$$\phi_i = \phi_e = 25^\circ$$

- IV) Aplicar Equações 3 e 4 propostas por ENSTAD [31];

$$\beta = \frac{\phi_w + \sin^{-1} \left[ \frac{\sin \phi_w}{\sin \delta} \right]}{2}$$

$$\beta = \frac{13,49^\circ + \sin^{-1} \left[ \frac{\sin 13,49^\circ}{\sin 25^\circ} \right]}{2}$$

$$\beta = 22,7^\circ$$

$$\theta_m = 0,5 \cdot \cos^{-1} \left[ \frac{1 - \sin \delta}{2 \sin \delta} \right] + \beta$$

$$\theta_m = 0,5 \cdot \cos^{-1} \left[ \frac{1 - \sin 25^\circ}{2 \sin 25^\circ} \right] + 22,7^\circ$$

$$\theta_m = 35,08^\circ$$

APÊNDICE A4- Dimensionamento da abertura mínima da boca de descarga;

- I) Determinar o valor de  $d_{(máx)}$ , sendo a maior partícula das amostras realizadas, conforme APÊNDICE A1;

$$\text{Amostra 3} = 8,5 \text{ mm}$$

- II) Aplicar Equação 3;

$$bf \geq 6 \cdot dp_{(máx)}$$

$$bf \geq 6 \cdot 8,5 \text{ mm}$$

$$bf \geq 51 \text{ mm}$$

- III) O menor valor (bf) da unidade experimental é 97 mm conforme detalhado na Tabela 7. Portanto, o valor da abertura (d) da boca de descarga (Figura 47) foi definida experimentalmente e resultou na relação em que;

$$d_{min} \geq 2 \cdot dp_{(min)}$$

$$d_{min} \geq 2 \cdot 7,12 \text{ mm}$$

$$d_{min} \geq 14,24 \text{ mm}$$

no qual,

$d_{min}$ - medida mínima da abertura d da boca de descarga.

$dp$  (méd)- diâmetro médio das amostras (APÊNDICE A1).

Portanto, foi adotado nos ensaios experimentais a medida ( $d_{min} = 14,5 \text{ mm}$ ).

APÊNDICE B1- Estudo da abertura mínima de descarga e padrão de fluxo  
ocorrente com geometrias cônicas e retangulares e grãos entre 2 e 19 mm;



Grãos de mostarda 2mm



Linhaça 5mm



Esferas de vidro 5mm



Arroz 7mm



Soja 7mm



Milho 8mm



Feijão preto 8mm



Esferas de vidro 9mm



Feijão carioca 10mm



Esferas de vidro 17mm



Esferas de vidro 19mm



Trigo moído

Resultados dos ensaios realizados com geometria quadrada da boca de descarga da tremonha;

| Características dos produtos |                   | Medidas (mm) |       |       |
|------------------------------|-------------------|--------------|-------|-------|
| Produto ou material          | Esfericidade (mm) | 10x10        | 15x15 | 20x20 |
| Esferas de vidro             | 5                 | -            | x     | x     |
|                              | 9                 | -            | -     | -     |
|                              | 17                | -            | -     | -     |
|                              | 19                | -            | -     | -     |
| Grãos de mostarda            | 2                 | x            | x     | x     |
| Linhaça                      | 5                 | x            | x     | x     |
| Arroz                        | 7                 | -            | -     | x     |
| Soja                         | 7                 | -            | -     | -     |
| Feijão (carioca)             | 10                | -            | -     | -     |
| Feijão (preto)               | 8                 | -            | -     | -     |
| Milho                        | 8                 | -            | -     | -     |
| Trigo (moido)                | -                 | x            | x     | x     |

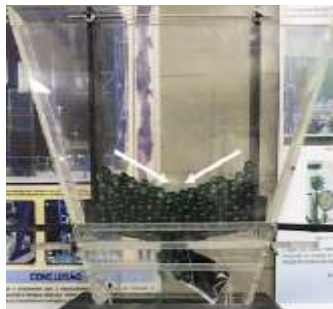
Resumo dos ensaios realizados com geometria circular e inclinação de 45° do cone;

| Características dos produtos |                   | Diâmetro de saída (mm) |    |    |    |
|------------------------------|-------------------|------------------------|----|----|----|
| Produto ou material          | Esfericidade (mm) | 10                     | 12 | 18 | 22 |
| Esferas de vidro             | 5                 | -                      | -  | x  | x  |
|                              | 9                 | -                      | -  | -  | x  |
|                              | 17                | -                      | -  | -  | -  |
|                              | 19                | -                      | -  | -  | -  |
| Grãos de mostarda            | 2                 | x                      | x  | x  | x  |
| Linhaça                      | 5                 | x                      | x  | x  | x  |
| Arroz                        | 7                 | -                      | -  | x  | x  |
| Soja                         | 7                 | -                      | -  | -  | x  |
| Feijão (carioca)             | 10                | -                      | -  | -  | x  |
| Feijão (preto)               | 8                 | -                      | -  | -  | x  |
| Milho                        | 8                 | -                      | -  | -  | x  |
| Trigo (moido)                | -                 | x                      | x  | x  | x  |

Sendo:

x = Não houve obstrução de fluxo  
 - = Houve obstrução de fluxo

APÊNDICE B2-Análise do efeito da inclinação das paredes da tremonha sobre a vazão de descarga utilizando esferas de vidro de 17 e 18 mm;



Fluxo funil à 5°



Fluxo funil à 15°



Fluxo Funil à 25°



Fluxo Funil misto à 35°



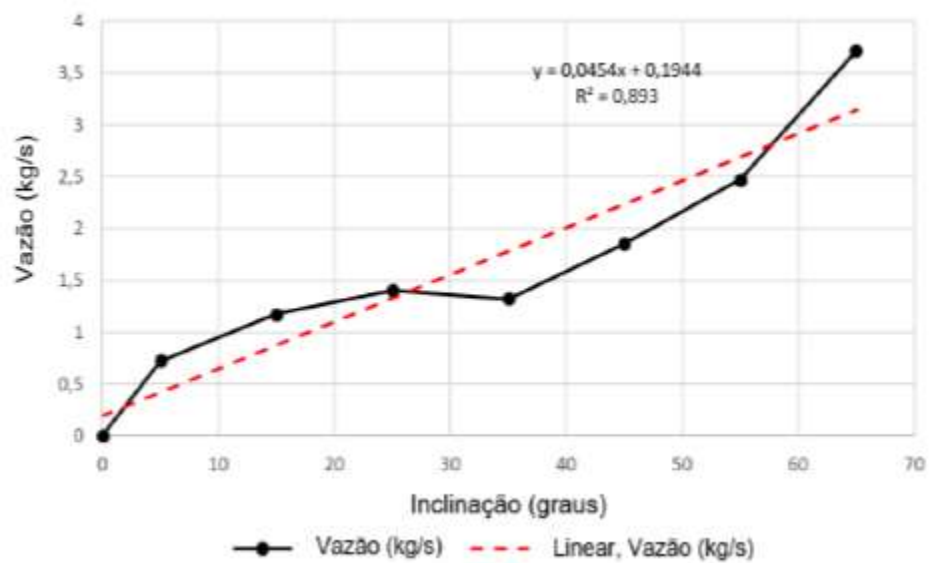
Fluxo mássico à 45°



Fluxo mássico à 55°



Fluxo mássico à 65°





ANEXO 1-Tabela E.1:EUROCODE: Propriedades dos particulados sólidos.

**Table E.1: Particulate solids properties**

| Type of particulate solid <sup>d, e</sup> | Unit weight <sup>b</sup><br>$\gamma$ |                   | Angle of repose<br>$\phi_r$ | Angle of internal friction<br>$\phi_i$ |          | Lateral pressure ratio<br>$K$ |        | Wall friction coefficient <sup>c</sup><br>$\mu$<br>( $\mu = \tan \phi_w$ ) |              |              |         | Patch load solid reference factor<br>$C_{op}$ |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------------------|----------|-------------------------------|--------|----------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|---------|-----------------------------------------------|
|                                           | $\gamma_f$                           | $\gamma_u$        | $\phi_r$                    | $\phi_{im}$                            | $a_\phi$ | $K_m$                         | $a_K$  | Wall type D1                                                               | Wall type D2 | Wall type D3 | $a_\mu$ |                                               |
|                                           | Lower                                | Upper             |                             | Mean                                   | Factor   | Mean                          | Factor | Mean                                                                       | Mean         | Mean         | Factor  |                                               |
|                                           | kN/m <sup>3</sup>                    | kN/m <sup>3</sup> | degrees                     | degrees                                |          |                               |        |                                                                            |              |              |         |                                               |
| Default material <sup>a</sup>             | 6,0                                  | 22,0              | 40                          | 35                                     | 1,3      | 0,50                          | 1,5    | 0,32                                                                       | 0,39         | 0,50         | 1,40    | 1,0                                           |
|                                           |                                      |                   |                             |                                        |          |                               |        |                                                                            |              |              |         |                                               |
| Aggregate                                 | 17,0                                 | 18,0              | 36                          | 31                                     | 1,16     | 0,52                          | 1,15   | 0,39                                                                       | 0,49         | 0,59         | 1,12    | 0,4                                           |
| Alumina                                   | 10,0                                 | 12,0              | 36                          | 30                                     | 1,22     | 0,54                          | 1,20   | 0,41                                                                       | 0,46         | 0,51         | 1,07    | 0,5                                           |
| Animal feed mix                           | 5,0                                  | 6,0               | 39                          | 36                                     | 1,08     | 0,45                          | 1,10   | 0,22                                                                       | 0,30         | 0,43         | 1,28    | 1,0                                           |
| Animal feed pellets                       | 6,5                                  | 8,0               | 37                          | 35                                     | 1,06     | 0,47                          | 1,07   | 0,23                                                                       | 0,28         | 0,37         | 1,20    | 0,7                                           |
| Barley ☼                                  | 7,0                                  | 8,0               | 31                          | 28                                     | 1,14     | 0,59                          | 1,11   | 0,24                                                                       | 0,33         | 0,48         | 1,16    | 0,5                                           |
| Cement                                    | 13,0                                 | 16,0              | 36                          | 30                                     | 1,22     | 0,54                          | 1,20   | 0,41                                                                       | 0,46         | 0,51         | 1,07    | 0,5                                           |
| Cement clinker ‡                          | 15,0                                 | 18,0              | 47                          | 40                                     | 1,20     | 0,38                          | 1,31   | 0,46                                                                       | 0,56         | 0,62         | 1,07    | 0,7                                           |
| Coal ☼                                    | 7,0                                  | 10,0              | 36                          | 31                                     | 1,16     | 0,52                          | 1,15   | 0,44                                                                       | 0,49         | 0,59         | 1,12    | 0,6                                           |
| Coal, powdered ☼                          | 6,0                                  | 8,0               | 34                          | 27                                     | 1,26     | 0,58                          | 1,20   | 0,41                                                                       | 0,51         | 0,56         | 1,07    | 0,5                                           |
| Coke                                      | 6,5                                  | 8,0               | 36                          | 31                                     | 1,16     | 0,52                          | 1,15   | 0,49                                                                       | 0,54         | 0,59         | 1,12    | 0,6                                           |
| Flyash                                    | 8,0                                  | 15,0              | 41                          | 35                                     | 1,16     | 0,46                          | 1,20   | 0,51                                                                       | 0,62         | 0,72         | 1,07    | 0,5                                           |
| Flour ☼                                   | 6,5                                  | 7,0               | 45                          | 42                                     | 1,06     | 0,36                          | 1,11   | 0,24                                                                       | 0,33         | 0,48         | 1,16    | 0,6                                           |
| Iron ore pellets                          | 19,0                                 | 22,0              | 36                          | 31                                     | 1,16     | 0,52                          | 1,15   | 0,49                                                                       | 0,54         | 0,59         | 1,12    | 0,5                                           |
| Lime, hydrated                            | 6,0                                  | 8,0               | 34                          | 27                                     | 1,26     | 0,58                          | 1,20   | 0,36                                                                       | 0,41         | 0,51         | 1,07    | 0,6                                           |
| Limestone powder                          | 11,0                                 | 13,0              | 36                          | 30                                     | 1,22     | 0,54                          | 1,20   | 0,41                                                                       | 0,51         | 0,56         | 1,07    | 0,5                                           |
| Maize ☼                                   | 7,0                                  | 8,0               | 35                          | 31                                     | 1,14     | 0,53                          | 1,14   | 0,22                                                                       | 0,36         | 0,53         | 1,24    | 0,9                                           |
| Phosphate                                 | 16,0                                 | 22,0              | 34                          | 29                                     | 1,18     | 0,56                          | 1,15   | 0,39                                                                       | 0,49         | 0,54         | 1,12    | 0,5                                           |
| Potatoes                                  | 6,0                                  | 8,0               | 34                          | 30                                     | 1,12     | 0,54                          | 1,11   | 0,33                                                                       | 0,38         | 0,48         | 1,16    | 0,5                                           |
| Sand                                      | 14,0                                 | 16,0              | 39                          | 36                                     | 1,09     | 0,45                          | 1,11   | 0,38                                                                       | 0,48         | 0,57         | 1,16    | 0,4                                           |
| Slag clinkers                             | 10,5                                 | 12,0              | 39                          | 36                                     | 1,09     | 0,45                          | 1,11   | 0,48                                                                       | 0,57         | 0,67         | 1,16    | 0,6                                           |
| Soya beans                                | 7,0                                  | 8,0               | 29                          | 25                                     | 1,16     | 0,63                          | 1,11   | 0,24                                                                       | 0,38         | 0,48         | 1,16    | 0,5                                           |
| Sugar ☼                                   | 8,0                                  | 9,5               | 38                          | 32                                     | 1,19     | 0,50                          | 1,20   | 0,46                                                                       | 0,51         | 0,56         | 1,07    | 0,4                                           |
| Sugarbeet pellets                         | 6,5                                  | 7,0               | 36                          | 31                                     | 1,16     | 0,52                          | 1,15   | 0,35                                                                       | 0,44         | 0,54         | 1,12    | 0,5                                           |
| Wheat ☼                                   | 7,5                                  | 9,0               | 34                          | 30                                     | 1,12     | 0,54                          | 1,11   | 0,24                                                                       | 0,38         | 0,57         | 1,16    | 0,5                                           |

NOTE Where this table does not contain the material to be stored, testing should be undertaken.

<sup>a</sup> For situations where it is difficult to justify the cost of testing, because the cost implications of using a wide property range for the design are minor, the properties of the "default material" may be used. For small installations, these properties may be adequate. However, they will lead to very uneconomic designs for large silos, and testing should always be preferred.

<sup>b</sup> The unit weight of the solid  $\gamma_u$  is the upper characteristic value, to be used for all calculations of actions. The lower characteristic value  $\gamma_l$  is provided in Table E.1 to assist in estimating the required volume of a silo that will have a defined capacity.

<sup>c</sup> Effective wall friction for wall Type D4 (corrugated wall) may be found using the method defined in Annex D, D.2.

<sup>d</sup> Solids in this table that are known to be susceptible to dust explosion are identified by the symbol ☼

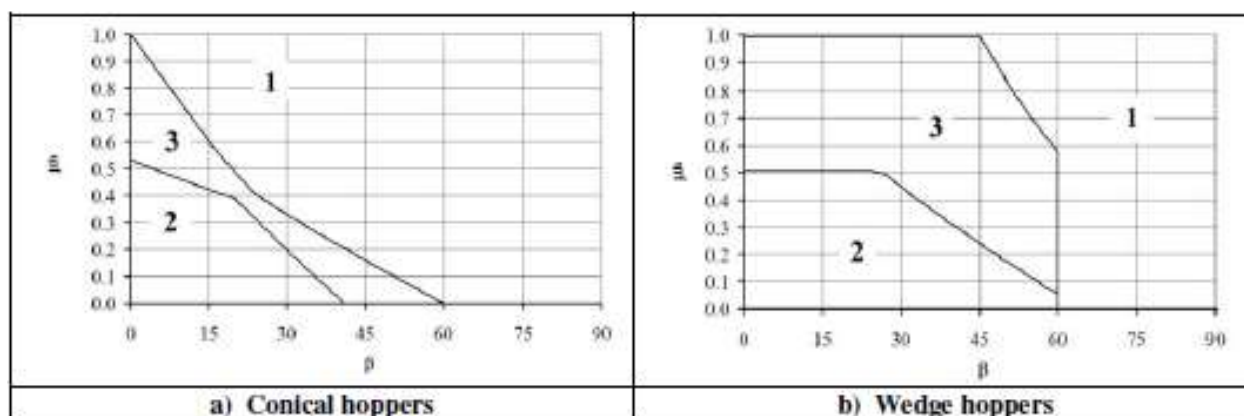
<sup>e</sup> Solids that are susceptible to mechanical interlocking are identified by the symbol ‡



## Annex F (Informative) Flow pattern determination

### F.1 Mass and funnel flow

(1) Determination of the flow pattern for the functional design of the silo is outside the scope of this standard. However, the information in Figure F.1 is given to alert the designer to the possibility that mass flow pressures may occur in the silo. This information is also needed when the alternative hopper design method of Annex G is used.



#### Key

- 1 Funnel flow
- 2 Mass flow
- 3 Mass flow or funnel flow may occur between these limits
- $\beta$  Hopper apex half angle (degrees)
- $\mu_h$  Hopper wall friction coefficient

NOTE: In the zone between the limits of mass flow and funnel flow, the mode of flow depends on parameters not included in this standard.

**Figure F.1: The conditions under which mass flow or funnel flow occur in conical and wedge-shaped hoppers**

ANEXO 3- Tabela 4.1: EUROCODE: Definição de superfície da parede;

Table 4.1: Wall surface definitions

| Category                                                                                                                                                                                                                                       | Descriptive title                           | Typical wall materials                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| D1                                                                                                                                                                                                                                             | Low friction<br>classed as<br>“Slippery”    | Cold-rolled stainless steel<br>Polished stainless steel<br>Coated surface designed for low friction<br>Polished aluminium<br>Ultra high molecular weight polyethylene <sup>a</sup>                            |
| D2                                                                                                                                                                                                                                             | Moderate friction<br>classed as<br>“Smooth” | Smooth mild carbon steel (welded or bolted construction)<br>Mill finish stainless steel<br>Galvanized carbon steel<br>Oxidized aluminium<br>Coated surface designed for corrosion resistance or abrasive wear |
| D3                                                                                                                                                                                                                                             | High friction<br>classed as<br>“Raspy”      | Off form concrete, steel finished concrete or aged concrete<br>Aged (corroded) carbon steel<br>Abrasion resistant steel<br>Ceramic tiles                                                                      |
| D4                                                                                                                                                                                                                                             | Irregular                                   | Horizontally corrugated walls<br>Profiled sheeting with horizontal ribs<br>Non-standard walls with large aberrations                                                                                          |
| NOTE: The descriptive titles in this table are given in terms of friction rather than roughness because there is a poor correlation between measured wall friction between a sliding granular solid and the surface and measures of roughness. |                                             |                                                                                                                                                                                                               |
| <sup>a</sup> The roughening effect of particles being impressed into the surface should be considered carefully for these surfaces.                                                                                                            |                                             |                                                                                                                                                                                                               |