

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Joseph Oliveira Silva

**FLUXO E PRESSÕES DE MINÉRIO DE FERRO EM TREMONHAS PIRAMIDIAIS
INDUSTRIAIS**

Belo Horizonte

2023

Joseph Oliveira Silva

**FLUXO E PRESSÕES DE MINÉRIO DE FERRO EM TREMONHAS PIRAMIDIAIS
INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Dr. Roberto Galery

Coorientador: Dr. Carlito Calil Junior

Belo Horizonte

2023

S586f

Silva, Joseph Oliveira.

Fluxo e pressões de minério de ferro em tremonhas piramidais industriais [recurso eletrônico] / Joseph Oliveira Silva. – 2023.
1 recurso online (155 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Roberto Galery.

Coorientador: Carlito Calil Junior.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndice: f. 152-155.

Bibliografia: f. 148-151.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.
3. Silos - Teses. 4. Minérios de ferro - Teses. 5. Silagem - Teses. I.
Galery, Roberto. II. Calil Junior, Carlito. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 622(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas da UFMG - Mestrado Profissional

UFMG

**FLUXO E PRESSÕES DE MINÉRIO DE FERRO EM
TREMONTAS PIRAMIDIAIS INDUSTRIAIS**

JOSEPH OLIVEIRA SILVA

Dissertação de mestrado submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 01 de março de 2023.

Por:

 Documento assinado digitalmente
ROBERTO GALERY
Data: 09/03/2023 14:27:09-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. Roberto Galery (UFMG)
Orientador

Prof. Dr. Carlito Calil Junior (USP)
Coorientador

Prof. Dr. George Eduardo Sales Valadão (UFMG)

 Documento assinado digitalmente
LUIZ CLAUDIO MONTEIRO MONTENEGRO
Data: 09/03/2023 22:21:07-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. Luiz Claudio Monteiro Montenegro (UFMG)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que age em minha vida com amor.

A Universidade Federal de Minas Gerais pela formação do autor.

Ao professor Roberto Galery pela orientação, contribuição e suporte dos momentos mais difíceis.

Ao professor Carlito Calil Junior pela amizade e coorientação, pelo incentivo, pelo acompanhamento direto e pelo entusiasmo em todos os momentos.

Aos professores do DEMIN.

A FAM Brasil por incentivar a busca de novos conhecimentos.

Glauber Carvalho, amigo que contribuiu para este estudo com sua vasta experiência acadêmica e profissional.

"A principal razão que me leva a arriscar seja a descoberta de que, ao fazê-lo, aprendo, quer eu fracasse ou seja bem-sucedido. Aprender, e especialmente aprender com a experiência, tem sido um elemento fundamental que faz com que minha vida valha a pena. Tal aprendizado me ajuda a crescer. Por isso, continuo a arriscar."

(Carl R. Rogers)

RESUMO

As tremonhas para minério de ferro são estruturas que apresentam alto índice de obstruções de fluxo e deformações causadas, principalmente, pelo desconhecimento do comportamento do produto armazenado, projetos inadequados e a ausência de base técnica para o projeto de fluxo e pressões. O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo teórico e um modelo numérico de um projeto de fluxo e pressões em tremonhas piramidais industriais para armazenamento de minério de ferro, que por sua vez tem características peculiares, como densidade aparente elevada, composição química variada e alta capacidade de abrasão, que influenciam nos comportamentos estáticos e dinâmicos no interior das tremonhas. A caracterização adequada das propriedades de fluxo do produto é essencial para a definição do tipo de fluxo e geometria da tremonha, assim como as pressões atuantes nas paredes do componente. Baseado em pesquisas desenvolvidas por Jenike e Roberts e em normas mundialmente conhecidas como AS 3774-1996 e EN 1991-4/2006, este trabalho tem como metodologia identificar as propriedades de fluxo do minério de ferro e fazer as parametrizações necessárias, para desenvolver o projeto de fluxo e pressões nas tremonhas. Foi utilizado um projeto exemplo para aplicação da metodologia, onde há duas tremonhas em linha, representando um carregador de vagões. Os resultados mostraram que alguns dos maiores desafios no campo de manuseio de produtos a granel é conciliar os critérios e restrições de projeto, os requisitos operacionais do sistema e ao mesmo tempo garantir o fluxo desejado. Desta forma, atender todos os critérios de projeto simultaneamente não é sempre possível e que ponderações e novas análises são muitas vezes necessárias para tomar a decisão final. Conclui-se ainda que existe uma lacuna de conhecimento neste campo de pesquisa, pois são poucas as pesquisas e desenvolvimentos relacionados ao tema e este estudo mostrou a importância da determinação das propriedades de fluxo do produto para o correto desenvolvimento de projeto de pressões e fluxo nestas unidades.

Palavras-chave: Tremonhas piramidais, silo, fluxo, pressões, minério de ferro.

ABSTRACT

Hoppers for iron ore are structures that present deformations and a high-rate flow stoppage motivated mainly by the lack of knowledge of the material flow behavior, inappropriate designs, and absence of a technical foundation for flow and pressure design. The objective of this work is to present a theoretical and numerical model development of flow and pressure design in pyramidal hoppers for iron ore storage, which in turn has peculiar characteristics, such high bulk density, varied chemical composition and high abrasion capacity, which have significant influences on static and dynamic behaviors inside the hoppers. Proper flow properties characterization of the material is essential for define the right flow pattern and hopper geometry, as well as the pressures acting on the hopper walls. Based on research developed by Jenike and Roberts and on world renowned standards such as AS 3774-1996 and EN 1991-4/2006, the purpose of this work's methodology is to identify the flow properties of iron ore and make the needed parameterizations for hoppers flow and pressure design. An example design was presented for methodology application, where are two hoppers in line, representing a train load-out system. Results has shown that one of the most one of the most challenges in the bulk solids handling field is reconciling design criteria, design constraints, system operational requirements while ensuring the desired flow. However, it is not possible to meet all design criteria simultaneously, and trade-offs are often necessary to make the final decision. It is possible to conclude that there is a lack of knowledge in this search field, as there are few research and developments related to the subject and this study presented the importance of the appropriate determination of the material flow properties for the correct development of pressure and flow design in these units.

Keywords: Pyramidal hoppers, bin, flow, pressure, iron ore.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Partes do silo.	24
Figura 1.2 - Fluxograma simplificado do complexo minerário S11D. Fonte: Adaptado de Duarte (2021).....	25
Figura 1.3 – Legenda do fluxograma simplificado do complexo minerário S11D. Fonte: Adaptado de Duarte (2021).	25
Figura 2.1 – Estado de tensão em dois pontos do produto. Fonte: Adaptado de Calil Jr. e Cheung (2007).	28
Figura 2.4 – Comportamento do produto a granel sob ação de uma tensão vertical. Fonte: Schulze (2021).....	28
Figura 2.5 – Teste de compressão uniaxial. Fonte: Adaptado de Schulze (2021).....	30
Figura 2.6 – Tensões de consolidação em amostra de produto a granel. Fonte: Adaptado de Schulze (2021).....	30
Figura 2.7 – Limite de escoamento não confinado. Fonte: Adaptado de Schulze (2021).....	31
Figura 2.8 – Representação gráfica do critério de ruptura ao deslizamento (“ <i>Yield Locus</i> ”). Fonte: Adaptado de Cheung (2007).	31
Figura 2.9 – Relação entre diferentes valores de c para diferentes comportamentos de fluxo. Fonte: Adaptado de Schulze (2021).	32
Figura 2.10 – Representação de posições dos elementos do produto a granel fluindo na tremonha durante a descarga.	33
Figura 2.11 – “ <i>Yield Locus</i> ” e função fluxo FF . Fonte: Adaptado de Roberts (2005).....	34
Figura 2.12 – Representação do <i>Jenike Shear Cell</i> : a) Configuração para medir o atrito do produto com a parede; b) Ângulo de atrito com a parede no diagrama τ_w versus σ_w . Fonte: Adaptado de Jenike (1964).	35
Figura 2.13 – Representação gráfica do critério de ruptura ao deslizamento com “ <i>Wall Yield Locus</i> ”. Fonte: Adaptado de Roberts (2005).	36
Figura 2.14 – Representação do “ <i>Jenike Shear Cell</i> ”. Fonte: Adaptado de Schulze (2021).	37
Figura 2.15 – Procedimento para gerar o “ <i>Yield Locus</i> ”. Fonte: Adaptado de Jenike (1964).	37
Figura 2.16 – Densidade aparente, ρ_b , em função da tensão de consolidação, σ_1 . Fonte: Schulze (2021).....	39
Figura 2.17 – Adesão por ponte líquida.	39
Figura 2.18 – Teste do ângulo de repouso.....	40

Figura 2.19 – Partículas com diferentes quantidades de líquido; a. Pontes líquidas; b. Pontes líquidas e regiões saturadas; c. Produto a granel saturado. Fonte: Schulze (2021).....	41
Figura 2.20 – Fluxo em função do teor de umidade. Fonte: Adaptado de Schulze (2021).....	41
Figura 2.21 – Influência do teor de umidade (mc) na resistência coesiva do produto (σ_c). Fonte: Adaptado de Chen e Roberts (2017).	42
Figura 2.22 – Efeito do tamanho de partícula na resistência ao cisalhamento (fluxo) do “pyrophyllite” a 5%mc. Fonte: Adaptado de Roberts (1991).	42
Figura 2.23 – Influência do tamanho de partículas: a. Produto beneficiado; b. Produto de baixa classificação granulométrica. Fonte: Adaptado de O’Shea (2022).	43
Figura 2.24 – “Time Yield Locus”, TYL, e função fluxo tempo FF _t . Fonte: Adaptado de Roberts (2005).....	44
Figura 2.25 – Tensão de consolidação, σ_l , vs resistência coesiva, σ_c , entre magnetita e goethita. Fonte: Wang (2015).....	45
Figura 2.26 – Diferença de distribuição granulométrica: a. Pellets; b. Sinter feed; c. Pellet feed. Fonte: Mohajeri et al. (2020).....	46
Figura 2.27 – Comparativo entre densidades aparente de vários produtos. Fonte: CEMA (2003).	46
Figura 2.28 – Tipos de tremonhas iniciais: a. Tremonha cônica; b. Tremonha tipo cunha.....	48
Figura 2.29 – Tipos de tremonhas: a. Tremonha piramidal quadrada; b. Tremonha piramidal retangular.	49
Figura 2.30 – Tipos de fluxo: a. Fluxo de massa; b. Fluxo de funil. Fonte: Schulze (2021). ..	50
Figura 2.31 – Fluxo de massa em tremonha: a. Imagens de raio-x; b. Representação esquemática do comportamento de fluxo. Fonte: Michalowski (1984, 1990).	51
Figura 2.32 – Fluxo de funil em tremonha: a. Imagens de raio-x; b. Representação esquemática do comportamento de fluxo. Fonte: Michalowski (1984, 1990).	52
Figura 2.33 – Campo de tensões na tremonha. Fonte: Adaptado de Roberts (2005).....	55
Figura 2.34 – Limites para fluxo de massa: a. Tremonha de fluxo axissimétrico; b. Tremonha de fluxo plano. Fonte: Adaptado de Roberts (2005).	55
Figura 2.35 – Determinação do tipo de fluxo em tremonhas: a. Tipo cônica; b. Tipo cunha. Fonte: EN 1991-4:2006.	56
Figura 2.36 – As fronteiras entre fluxo de massa e fluxo de funil: a. Tipo cônica; b. Tipo cunha. Fonte: AS 3774-1996.....	57
Figura 2.37 – Indicação das dimensões apresentadas por Benink (1989).....	58
Figura 2.38 – Padrões de fluxo. Fonte: Benink (1989).	58

Figura 2.39 – Obstruções tipo arco: a. Arco mecânico; b. Arco coesivo.	60
Figura 2.40 – Identificação do ângulo de vale, α_v : a. Tremonha piramidal quadrada; b. Tremonha piramidal retangular.	60
Figura 2.41 – Estado de tensões que mostram a formação de arcos estáveis. Fonte: Adaptado de Jenike (1964).	61
Figura 2.42 – Gráficos de fator fluxo para tremonhas com $\delta = 50^\circ$: a. Tremonha de fluxo axissimétrico; b. Tremonha de fluxo plano. Fonte: Jenike (1964).	62
Figura 2.43 – Gráficos de fator fluxo da tremonha: a. Tremonha de fluxo axissimétrico; b. Tremonha defluxo plano. Fonte: Roberts (2005).	64
Figura 2.44 – Critério de fluxo e não-fluxo. Fonte: Adaptado de Calil Jr. e Cheung (2007)...	65
Figura 2.45 – Função $H(\alpha)$. Fonte: Jenike (1964).	66
Figura 2.46 – Dados controláveis e não controláveis do processo de armazenamento e transporte de minério de ferro. Fonte: Adaptado de Mohajeri et al. (2020).	67
Figura 2.47 – Chanfros e arredondamentos de arestas e vales.	67
Figura 2.48 – Tremonha de fluxo de massa, tensão de consolidação, σ_l , tensão principal atuante no arco, σ_l' , e resistência coesiva do produto, σ_c , em diferentes tempos de consolidação ($t=0, t_1$). Fonte: Adaptado de Schulze (2021).	68
Figura 2.49 – Dimensão crítica, B_{cr} , vs. tempo para descargas em intervalos regulares do produto armazenado, $\Delta t \leq t_R$, comparado a dimensão crítica para um tempo de armazenamento superior, t_L . Fonte: Adaptado de Schulze (2021).	68
Figura 2.50 – Campos e tensões para condição de enchimento e de fluxo. Fonte: Roberts (2005).	71
Figura 2.51 – Equilíbrio estático de uma fatiar elementar, proposto por Janssen (1895).	71
Figura 2.52 – Resultado de experimento com milho. Fonte: Janssen (1895).	72
Figura 2.53 – Equilíbrio de uma fatia elementar em tremonha. Fonte: Adaptado de Walker (1966).	76
Figura 2.54 – Tensão vertical adimensional na tremonha. Fonte: McLean (1985).	78
Figura 2.55 – Razão de carregamento na tremonha e comporta durante enchimento. Fonte: Roberts et al. (2021).	80
Figura 2.56 – Estado de tensões para fluxo de massa: a. Condição de enchimento; b. Condição de transição; c. Condição de fluxo. Fonte: Adaptado de Jenike et al. (1973).	81
Figura 2.57 – Condição da tensão ou pressão em tremonha durante fluxo. Fonte: Roberts (2022).	84

Figura 2.58 – Representação geométrica e de métodos para tremonha de fluxo de massa. Fonte: Adaptado de Roberts (2010).....	86
Figura 2.59 – Tensões de consolidação para os métodos de arco e de fatia elementar. Fonte: Roberts (2010).....	87
Figura 2.60 – Esquema de um carregador de vagões.	88
Figura 2.61 – Comportamento em modelo reduzido do fluxo de tremonha sobre tremonha. Fonte: Calil Jr. (1982).....	88
Figura 2.62 – Mudança de inclinação e/ou revestimento da tremonha. Fonte: Roberts (2022).	89
Figura 2.63 – Silo subdividido em seções. Fonte: Schulze (2021).....	89
Figura 3.1 – Distribuição granulométrica.....	91
Figura 3.2 – Arranjo de um carregador de vagões.	94
Figura 3.3 – Principais dimensões da tremonha pulmão: a. Vista frontal em seção; b. Vista lateral em seção.	95
Figura 3.4 – Principais dimensões da tremonha dosadora: a. Vista frontal em seção; b. Vista lateral em seção.	95
Figura 3.5 – Intervalos de confiança para distribuição normal.	98
Figura 3.6 – Etapa 1: Agrupamento das informações de projeto e propriedade de fluxo do produto.....	100
Figura 3.7 – Etapa 2: Projeto geométrico e de fluxo.....	101
Figura 3.8 – Etapa 3: Determinação de pressões nas paredes de silos e tremonhas.....	102
Figura 4.1 – Variação da densidade aparente para diferentes valores de teor de umidade. ...	105
Figura 4.2 – Comprovação do comportamento de fluxo em função do teor de umidade.	106
Figura 4.3 - Função fluxo influenciada pelo tempo de consolidação.....	107
Figura 4.4 – “ <i>Yield Locus</i> ” para diferentes teores de umidade.....	107
Figura 4.5 – “ <i>Yield Locus</i> ” para diferentes materiais de revestimento da parede.	108
Figura 4.6 – “ <i>Yield Locus</i> ” para diferentes tempos de consolidação.....	109
Figura 4.7 – Coesão no gráfico “ <i>Yield Locus</i> ” para diferentes teores de umidade.	110
Figura 4.8 – Coesão no gráfico “ <i>Yield Locus</i> ” para diferentes tempos de consolidação.	111
Figura 4.9 – Determinação do fator fluxo da tremonha, ff , e ângulo da tremonha, α : a. Gráfico de fator fluxo de Roberts (2005); b. Gráficos de fator fluxo para tremonhas com	113

$\delta = 50^\circ$ de Jenike (1964).....	113
Figura 4.10 – Critério de fluxo e não fluxo com obtenção da tensão crítica de arco, σ'_l	114
Figura 4.11 – Parâmetro referente a espessura do arco $H(\alpha)$	114
Figura 4.12 – Influência da variação da tensão de consolidação, σ_l , nas propriedades de fluxo.....	116
Figura 4.13 – Curva de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B	117
Figura 4.14 – Gráfico explicativo sobre a curva de valores máximos de ângulo da tremonha (α) em função da abertura de saída (B).	118
Figura 4.15 – Comparativo entre as curvas de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B , para diferentes materiais de revestimento da parede.....	118
Figura 4.16 – Comparativo entre as curvas de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B , para diferentes materiais de revestimento da parede e diferentes teores de umidade da amostra.	119
Figura 4.17 – Densidade aparente, ρ_b : a. Amostra IO-B; b. Amostra IO-C.....	121
Figura 4.18 – Efetivo ângulo de atrito interno, δ : a. Amostra IO-B; b. Amostra IO-C.....	122
Figura 4.19 – Influência do tempo de consolidação na resistência coesiva, σ_c : a. Amostra IO-B; b. Amostra IO-C.	123
Figura 4.20 – Influência do tempo de consolidação no ângulo de atrito com a parede, φ_w , para a amostra IO-B: a. HARDOX 500; b. CDP 4666.....	124
Figura 4.21 – Influência do tempo de consolidação no ângulo de atrito com a parede, φ_w , para a amostra IO-B: a. HARDOX 500; b. CDP 4666.....	125
Figura 4.22 – Influência da característica mineralógica na resistência coesiva, σ_c	126
Figura 4.23 – Curva de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B , para amostra IO-B (11%).....	129
Figura 4.24 – Curva de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B , para amostra IO-B (13%).....	130
Figura 4.25 – Curva de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B , para amostra IO-B (15%).....	130
Figura 4.26 – Curva de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B , para amostra IO-C (10%).....	131
Figura 4.27 – Curva de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B , para amostra IO-C (11%).....	131

Figura 4.28 – Curva de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B, para amostra IO-C (12%).	132
Figura 4.29 – Condição inicial nas tremonhas pulmão e dosadora para sistema gravimétrico.	137
Figura 4.30 – Condição inicial e fluxo nas tremonhas pulmão e dosadora.	138
Figura 4.31 – Condição de fluxo e inicial nas tremonhas pulmão e dosadora.	139
Figura 4.32 – Condição inicial nas tremonhas pulmão e dosadora para sistema volumétrico.	140
Figura 4.33 – Condição de fluxo nas tremonhas pulmão e dosadora.	142
Figura A.1 – Página inicial.	151
Figura A.2 – Propriedades de fluxo.	152
Figura A.3 – Projeto de fluxo.	152
Figura A.4 – Projeto de pressões – Informações Gerais.	153
Figura A.5 – Projeto de pressões – Dimensões.	153
Figura A.6 – Projeto de pressões – Esquema Funcional.	154
Figura A.7 – Projeto de pressões – Resultados.	154

LISTA DE TABELAS

Tabela II-1 – Principais classes de minerais e suas composições químicas para minério de ferro. Fonte: Adaptado de Wang (2015).....	44
Tabela II-2 – Comparação entre os padrões de fluxo. Fonte: Cheung (2007).....	53
Tabela III.1 – Características das amostras de minério de ferro.	90
Tabela III.2 – Materiais de desgaste.....	90
Tabela III.3 – Distribuição granulométrica do IO-A.....	91
Tabela III.4 – Ângulos de repouso.	91
Tabela III.5 – Resumo das taxas de desgaste dos materiais de revestimento.....	92
Tabela III.6 – Análise mineralógica.	92
Tabela III.7 – Informações sobre as tratativas das propriedades de fluxo.	93
Tabela III.8 – Metodologias para projeto de tremonha para fluxo de massa.	97
Tabela III.9 – Limites característicos de propriedades de fluxo a serem adotadas. Fonte: AS 3774-1996.....	97
Tabela III.10 – Valores usuais de coeficiente de variação das propriedades dos produtos. Fonte: EN 1991-4:2006.	98
Tabela IV.1 – Dados disponíveis para análises da amostra IO-A.	104
Tabela IV.2 – Tensões atuantes na parede a uma tensão de consolidação, σ_l , de 10 kPa.	109
Tabela IV.3 – Resistência coesiva, σ_c , e coesão, c , em função do teor de umidade.	111
Tabela IV.4 – Resultado das propriedades de fluxo em função da variação da tensão de consolidação, σ_l	117
Tabela IV.5 – Dados disponíveis para análises das amostras IO-B e IO-C.	120
Tabela IV.6 – Tensões atuantes na parede para a amostra IO-B.	126
Tabela IV.7 – Tensões atuantes na parede para a amostra IO-C.	127
Tabela IV.8 – Coesão, c , das amostras IO-B e IO-C para diferentes tensões de consolidação, σ_l	127
Tabela IV.9 – Dimensões das tremonhas avaliadas.	129
Tabela IV.10 – Premissas de projeto de fluxo.....	134
Tabela IV.11 – Dimensões das tremonhas pulmão e dosadora para o projeto de pressões....	135

Tabela IV.12 – Materiais de revestimento da parede das tremonhas.	135
Tabela IV.13 – Limites característicos adotados para as propriedades de fluxo.....	136
Tabela IV.14 – Equações de pressões normais e cisalhantes em condição inicial nas tremonhas pulmão e dosadora para sistema gravimétrico.	137
Tabela IV.15 – Equações de pressões normais e cisalhantes em condição inicial e fluxo nas tremonhas pulmão e dosadora.	138
Tabela IV.16 – Equações de pressões normais e cisalhantes em condição de fluxo e inicial nas tremonhas pulmão e dosadora.	139
Tabela IV.17 – Equações de pressões normais e cisalhantes em condição inicial nas tremonhas pulmão e dosadora para sistema volumétrico.	141
Tabela IV.18 – Equações de pressões normais e cisalhantes em condição de fluxo nas tremonhas pulmão e dosadora.	142

LISTA DE NOTAÇÕES

Letras Romanas Minúsculas

a	Constante auxiliar
c	Coesão
cov	Coefficiente de variação
c_h	Fator multiplicador ou coeficiente geométrico para tremonha
c_{nf}	Fator multiplicador
d_p	Diâmetro da partícula
f_c	Resistência não confinada ao deslizamento
ff	Fator fluxo da tremonha
g	Aceleração da gravidade
h	Altura
h_c	Altura de produto armazenado no corpo do silo, em contato com a parede.
h_s	Altura cheia do cone ou cunha (transição ao apex)
k	Relação entre a pressão vertical e horizontal
k_{hf}	Razão da pressão normal da tremonha na condição de fluxo
m	Massa ou constante geométrica da tremonha
mc	Teor de umidade
p_{he}	Pressão normal a parede na condição de fluxo (EN 1991-4.2006)
p_{hf}	Pressão normal a parede na condição de enchimento (EN 1991-4.2006)
p_n	Pressão normal a parede
p_{nhf}	Pressão normal a parede da tremonha na condição de fluxo
p_{nhi}	Pressão normal a parede da tremonha na condição inicial
p_{nf}	Pressão normal a parede na condição de fluxo (AS 3774-1996)
p_{ni}	Pressão normal a parede na condição de enchimento (AS 3774-1996)
p_{n0}	Pressão de sobrecarga normal a parede
p_q	Pressão devido ao atrito ou tensão de cisalhamento
p_{qhf}	Pressão devido ao atrito na tremonha na condição de fluxo
p_{qhi}	Pressão devido ao atrito na tremonha na condição inicial
p_{qf}	Pressão devido ao atrito ou tensão de cisalhamento de fluxo
p_{qi}	Pressão devido ao atrito ou tensão de cisalhamento inicial
p_v	Pressão vertical
p_{v0}	Pressão vertical de sobrecarga

p_{vt}	Pressão vertical na transição
p_{vit}	Pressão vertical de sobrecarga
r_c	Característica geométrica do silo (raio característico)
x	Altura de referência
z	Altura de referência para cálculo de pressões
z_g	Altura da válvula de descarga a superfície do produto, desconsiderando corpo do silo
z_h	Altura da tremonha

Letras Romanas Maiúsculas

A	Área
B	Dimensão da abertura de saída da tremonha
B_{cr}	Dimensão da abertura crítica de saída da tremonha
D	Dimensão da abertura do corpo do silo
F_f	Razão da pressão normal da tremonha na condição de fluxo
FF	Função fluxo
H	Altura
H_{cr}	Altura crítica, Benink (1989)
K	Relação entre a pressão vertical e horizontal
K_h	Relação entre a pressão vertical e horizontal na tremonha
K_{hi}	Relação entre a pressão vertical e horizontal na tremonha na condição inicial
MC	Teor de umidade
U	Perímetro
R	Raio hidráulico ou característica geométrica do silo (raio característico)
S	Coefficiente geométrico para tremonha
V	Volume

Letras Gregas Minúsculas

α	Ângulo de inclinação da parede da tremonha com a vertical
α_v	Ângulo de vale da tremonha com a vertical
β	Ângulo entre a tensão principal e a tensão normal na parede durante o fluxo
γ	Peso específico – $g \rho_b$

δ	Efetivo ângulo de atrito interno
ε	Porosidade entre partículas
η	Ângulo entre a tensão principal e a tensão normal na parede durante o fluxo
μ	Coeficiente de atrito ou coeficiente de atrito com a parede
μ_w	Coeficiente de atrito com a parede
μ_{eff}	Coeficiente de atrito de Rotter
ρ_b	Densidade aparente do produto a granel
ρ_s	Densidade do sólido apresentado em uma partícula
σ_c	Resistência não confinada ao deslizamento ou resistência coesiva
σ_f	Tensão de compressão de pré-cisalhamento
σ_h	Tensão ou pressão horizontal
σ_p	Tensão de compressão referente a chapa da parede da tremonha
σ_v	Tensão ou pressão vertical
σ_{v0}	Tensão ou pressão vertical de sobrecarga
σ_{vhi}	Tensão ou pressão vertical na tremonha na condição inicial
σ_w	Tensão ou pressão normal na interface da parede
σ_1'	Tensão principal atuante no arco coesivo ou tensão de arco
σ_1	Maior tensão principal ou tensão de consolidação
σ_2	Menor tensão principal
τ	Tensão de cisalhamento
τ_f	Tensão de pré-cisalhamento
τ_w	Tensão de cisalhamento na parede
τ_{whi}	Tensão de cisalhamento na parede da tremonha na condição de enchimento
τ_{whf}	Tensão de cisalhamento na parede da tremonha na condição de fluxo
φ_i	Estático ângulo de atrito interno
φ_r	Ângulo de repouso
φ_w	Ângulo de atrito entre o produto armazenado e o material da parede

Letras Gregas Maiúsculas

Δ	Intervalo
----------	-----------

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE I – FERRAMENTA DE TRABALHO M. HOPPER

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	23
1.1 Objetivos	26
1.2 Relevância do tema	26
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 Propriedades de fluxo do produto armazenado	27
2.1.1 Caracterização de produto a granel	29
2.1.1.1 Critério de ruptura ao deslizamento (“ <i>Yield Locus</i> ”).....	30
2.1.1.2 Função fluxo	32
2.1.1.3 Ângulo de atrito com a parede	35
2.1.1.4 Ensaio de cisalhamento direto	36
2.1.1.5 Densidade aparente	37
2.1.1.6 Adesão e atrito com a parede	39
2.1.1.7 Abrasão	40
2.1.1.8 Ângulo de repouso	40
2.1.1.9 Teor de umidade do produto	41
2.1.1.10 Granulometria e proporção de finos.....	42
2.1.1.11 Tempo de consolidação	43
2.1.2 Características do minério de ferro.....	44
2.2 Projeto de tremonhas para fluxo	48
2.2.1 Tipos de tremonhas.....	48
2.2.2 Tipos de fluxo	50
2.2.3 Vantagens e desvantagens do tipo de fluxo.....	53
2.2.4 Determinação do tipo de fluxo	54
2.2.4.1 Limites superiores para fluxo de massa segundo Jenike	54
2.2.4.2 Identificação de fluxo segundo as normas internacionais.....	56
2.2.4.3 Identificação de fluxo segundo Benink	57
2.2.5 Obstruções de fluxo	58
2.2.6 Determinação da geometria da tremonha para fluxo de massa	59
2.2.6.1 Projeto de tremonha para obstrução tipo arco.....	59

2.2.7	Projeto de tremonhas para minério de ferro	66
2.3	Pressões em silos e tremonhas	70
2.3.1	Campos de tensões atuantes em silos e tremonhas de fluxo de massa	70
2.3.2	Pressões no corpo do silo - Teoria de Janssen.....	71
2.3.2.1	Teoria de Janssen nas normas internacionais.....	73
2.3.3	Pressões em tremonha	76
2.3.3.1	Teoria de Walker	78
2.3.3.2	Teoria de Walters.....	79
2.3.3.3	Teoria de Jenike	79
2.3.3.4	Pressões em tremonha pelas normas internacionais	82
2.3.4	Comparativo: Campos de tensões radiais e o método de fatia elementar.....	86
2.3.5	Considerações extras e aplicações na mineração	87
3	– MATERIAIS E MÉTODOS	90
3.1	Materiais e recursos.....	90
3.1.1	Materiais	90
3.1.2	Recursos	93
3.1.3	Projeto exemplo.....	94
3.2	Métodos	96
3.2.1	Análise do produto	96
3.2.2	Projeto de tremonha para fluxo de massa.....	96
3.2.3	Determinação de pressões nas paredes de silos e tremonhas	97
3.3	Criação da ferramenta de trabalho	99
3.4	Fluxograma	100
4	– RESULTADOS E DISCUSSÃO	103
4.1	Comprovação de conceitos teóricos por meio de validação numérica.....	104
4.1.1	Propriedades de fluxo	104
4.1.1.1	Densidade aparente	104
4.1.1.2	Função fluxo (FF)	105
4.1.1.3	“Yield Locus”	107
4.1.2	Fluxo em tremonhas	112

4.2	Projeto de fluxo e pressões em tremonhas piramidais industriais.....	120
4.2.1	Propriedades de fluxo	120
4.2.2	Projeto de fluxo em tremonhas.....	128
4.2.2.1	Análise de resultados	128
4.2.2.2	Discussão sobre os resultados do projeto de fluxo em tremonhas.....	132
4.2.3	Projeto de pressões em tremonhas.....	134
4.2.3.1	Premissas adotadas	135
4.2.3.2	Análise de resultados do projeto de pressões.....	136
4.2.3.3	Discussão sobre os resultados do projeto de pressões em tremonhas.....	143
5	– CONCLUSÕES.....	144
5.1	Em relação ao minério de ferro para armazenamento	144
5.2	Em relação ao projeto de fluxo em tremonhas piramidais.....	145
5.3	Em relação ao projeto de pressões em tremonhas piramidais	145
5.4	Sugestão para trabalhos futuros	146
	REFERÊNCIAS	147
	APÊNDICE I – FERRAMENTA DE TRABALHO M. HOPPER.....	151

1 – INTRODUÇÃO

Devido a sua durabilidade, resistência e versatilidade, o aço tornou-se um material ideal para construção, fabricação de equipamentos e inúmeras aplicações de engenharia (LU, 2022).

A Worldsteel Association (2021) disponibiliza os dados de produção de aço bruto no mundo desde 1971, onde é evidenciado um nítido aumento desta produção a partir dos anos 2000. Em 2019, a produção alcançou um patamar de quase 2,5 vezes a produção de 1999 e com tendência a crescimento.

O minério de ferro, como principal matéria-prima para a produção de aço, teve um aumento em sua procura devido à crescente demanda, o que levou a uma significativa expansão em infraestrutura para sua produção. Consequentemente, as inovações e melhorias nos processos produtivos e logísticos foram inevitáveis.

Como parte deste processo de evolução, o correto manuseio e transporte do minério de ferro são fundamentais para o desempenho produtivo e podem ser beneficiados com os estudos e resultados deste trabalho.

Em muitas usinas, o carregamento de vagões é feito por pá carregadeira, caminhões ou carregamento direto do transportador de correia, estas operações tornam o processo ineficiente, seja pelo tempo de operação, imprecisão no carregamento (volume e distribuição incorretos do produto no vagão causando deslocamento do centro de gravidade do vagão carregado) ou falhas de operação (descontinuidade da alimentação, oscilação da capacidade).

O sistema de carregamento de vagões por meio de silos e tremonhas, comumente conhecido como TLO (*Train Load Out*), tem a função de corrigir as falhas citadas, permitindo um constante e preciso carregamento. A composição permanece em movimento durante o carregamento, reduzindo o tempo de carregamento de vagões, e as falhas como descontinuidade da alimentação e oscilação de capacidade são corrigidas. Os silos e tremonhas atuam como “pulmões” do sistema, garantindo também um período de carregamento de vagões mesmo com a alimentação comprometida.

Um silo pode ser dividido em duas partes, conforme apresentado na Figura 1.1. Corpo do silo, refere-se a parte do silo de paredes verticais e a parte de paredes inclinadas, que é chamada de tremonha. O componente pode ser construído como apresentado na Figura 1.1, contendo as duas partes, ou pode haver apenas uma delas.

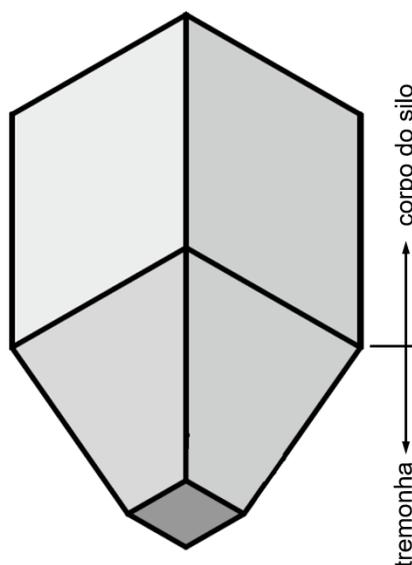


Figura 1.1 – Partes do silo.

A indústria de minério de ferro frequentemente, relata problemas de aplicação em manuseio de materiais, resultando em falhas, redução da vida útil e desempenho insuficiente dos equipamentos.

Nesse contexto, um entendimento correto das propriedades de fluxo do minério de ferro é essencial para fornecer o melhor projeto de fluxo e pressões para a aplicação desejada, maximizar o tempo de atividade do equipamento e garantir performance sem obstruções ou falhas estruturais induzidas pelas pressões do produto armazenado. Estes são motivos que levaram a escolha do tema proposto, sendo aplicado em tremonhas industriais para armazenamento de minério de ferro.

A Figura 1.2, apresenta um fluxograma simplificado do complexo minerário S11D, localizado no município de Canaã dos Carajás, Pará. O alto nível de teor de ferro no minério a ser produzido elimina etapas de concentração e o beneficiamento é realizado com umidade natural, sendo composto por etapas de peneiramento e britagem. Silos são utilizados em cada etapa do processo, desde o peneiramento primário à britagem terciária. Após o beneficiamento, o minério de ferro disponível no pátio de produto é direcionado aos carregadores de vagões (TLO), compostos por tremonhas piramidais industriais subsequentes, e transportado para o Terminal Marítimo de Ponta Madeira, em São Luís, Maranhão.

Outras aplicações podem ser beneficiadas com os resultados deste estudo, como tremonhas com interface com alimentadores de correia, sapatas, moegas para viradores de vagões etc.

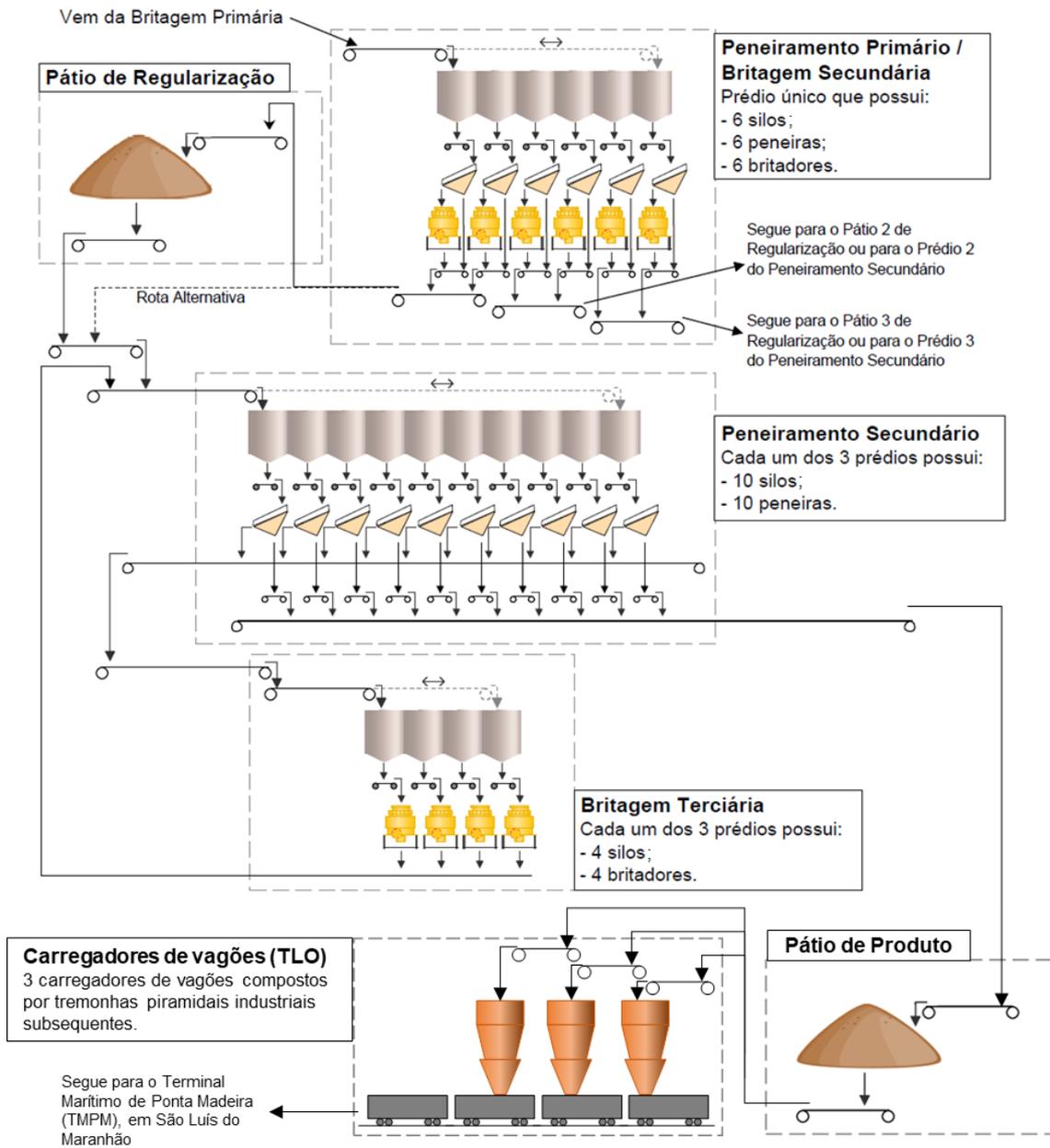


Figura 1.2 - Fluxograma simplificado do complexo minerário S11D. Fonte: Adaptado de Duarte (2021).

Legenda				

Figura 1.3 – Legenda do fluxograma simplificado do complexo minerário S11D. Fonte: Adaptado de Duarte (2021).

1.1 Objetivos

Objetivo geral:

- Projeto de fluxo e pressões em tremonhas piramidais industriais para armazenamento de minério de ferro.

Os objetivos específicos:

- Obtenção de uma sólida base técnica por meio de estudos de fluxo e pressões em tremonhas, agrupando e analisando as teorias existentes;
- Avaliação paramétrica das propriedades de fluxo do minério de ferro, para peso específico, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito com a parede e função fluxo, a partir do estudo teórico realizado;
- Criação de um modelo numérico (ferramenta de trabalho) para avaliação do comportamento do minério de ferro em tremonhas.

1.2 Relevância do tema

As tremonhas para minério de ferro são estruturas que apresentam alto índice de obstruções de fluxo e deformações causadas, principalmente, pelo desconhecimento do comportamento do produto armazenado, geometrias inadequadas e a ausência de base técnica para o projeto de fluxo e pressões.

As geometrias destas tremonhas podem ser apresentadas de diferentes formas, variando com a aplicação. A superfície de desgaste e as propriedades do minério de ferro armazenado são aspectos importantes a serem avaliados no desenvolvimento do projeto, e que parâmetros operacionais também tem uma significativa influência no processo.

Infelizmente, são poucos os trabalhos e estudos que tratam o assunto abordando o fluxo e pressões induzidas pelo minério de ferro em tremonhas.

A importância deste tema vai ao encontro com a segurança e redução de custos do projeto, pois com uma base técnica consolidada, os cálculos se tornam mais precisos e de fácil rastreabilidade.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Roberts (1994), os procedimentos para um correto projeto de tremonhas estão bem estabelecidos e seguem quatro passos básicos:

- i. Determinação das propriedades de fluxo do produto a granel para as condições mais severas esperadas que ocorram no componente;
- ii. Determinação da geometria da tremonha para fornecer a capacidade desejada, fornecer um padrão de fluxo com características aceitáveis e garantir que a descarga seja confiável e previsível;
- iii. Estimativa das cargas e pressões nas paredes da tremonha, corpo do silo e componentes sob condições operacionais;
- iv. Projeto e detalhamento estrutural de cada componente.

Os passos i, ii, e iii serão abordados nos próximos tópicos desta revisão bibliográfica.

2.1 Propriedades de fluxo do produto armazenado

Quando se considera o fluxo de produtos a granel é importante entender que o comportamento deste produto durante fluxo é diferente do comportamento de um líquido. Na verdade, as propriedades de sólidos e líquidos se diferem muito. A seguir algumas diferenças:

- Os produtos a granel possuem capacidade de transferir tensões de cisalhamento entre grãos, nas paredes e sob condições estáticas, enquanto os líquidos não, possuindo somente o estado de tensão hidrostático. Na Figura 2.1 está apresentado o comparativo entre produto a granel e líquido em um silo;
- Muitos sólidos possuem força coesiva e quando consolidados, mantém sua forma sob pressão;

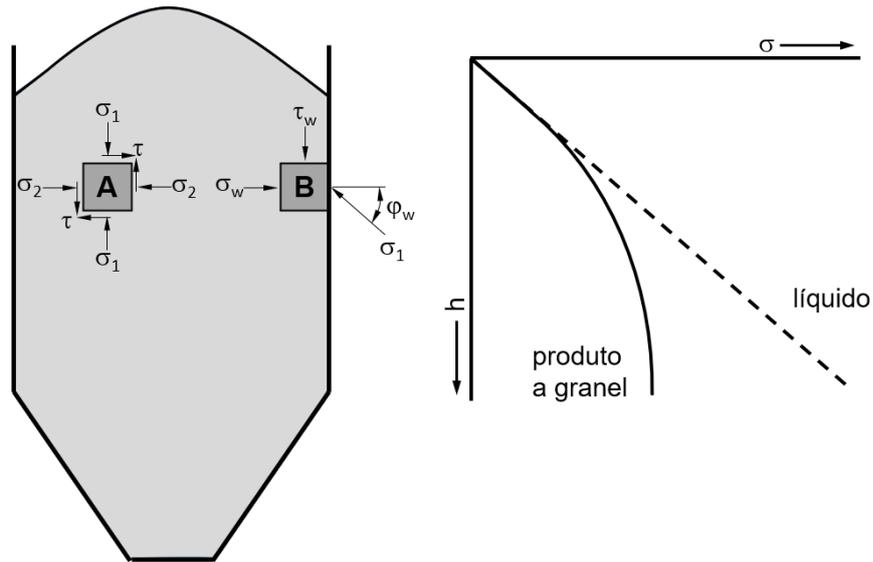


Figura 2.1 – Estado de tensão em dois pontos do produto. Fonte: Adaptado de Calil Jr. e Cheung (2007).

Estas diferenças sugerem que os produtos a granel devem ser considerados por possuírem características plásticas e não viscoelásticas (ARNOLD et al., 1987).

Segundo Schulze (2021) a deformação plástica dos produtos a granel se refere à movimentação e acomodação das partículas umas contra as outras, e não da deformação plástica de uma partícula individual. O comportamento da deformação do produto a granel durante o carregamento e descarregamento de uma tensão vertical está demonstrado na Figura 2.4.

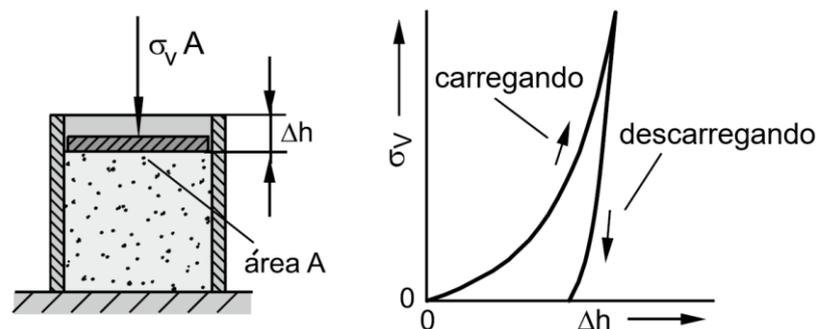


Figura 2.4 – Comportamento do produto a granel sob ação de uma tensão vertical. Fonte: Schulze (2021).

2.1.1 Caracterização de produto a granel

Observar e descrever como um elevado número de partículas comportam e respondem a vários estímulos é de muita complexidade. Quando um número de partículas se torna alto, se torna impossível determinar o comportamento do produto a granel a partir do conhecimento das propriedades de uma partícula individual que compõe o coletivo.

Uma abordagem diferente deve ser tratada, onde o produto a granel se torne uma substância por si só. Assim, os testes para caracterização deste produto são realizados adquirindo as propriedades de fluxo do produto, que são bem diferentes das propriedades de cada partícula (McGLINCHEY, 2005).

A determinação das propriedades de fluxo deve ser realizada nas condições mais severas daquelas esperadas que ocorram em um silo e tremonha. O equipamento mais utilizado para essas determinações é o aparelho de cisalhamento de translação (ensaio de cisalhamento direto), conhecido em nível internacional como “*Jenike Shear Cell*” (CALIL JR.; CHEUNG, 2007).

As propriedades mais importantes são:

- Ângulo estático de atrito interno (φ_i);
- Efetivo ângulo de atrito interno (δ);
- Ângulo de atrito com a parede (φ_w);
- Função fluxo (FF);
- Densidade aparente (ρ_b);

Estas propriedades dependem de muitos parâmetros, por exemplo:

- Adesão;
- Abrasão;
- Ângulo de repouso;
- Teor de umidade do produto;
- Granulometria e proporção de finos;
- Tempo de armazenamento do produto;

2.1.1.1 Critério de ruptura ao deslizamento (“*Yield Locus*”)

Quando o produto a granel flui, ele o faz por cisalhamento ou escoamento interno, seja entre as partículas ou com a parede do silo ou da tremonha. Considere o elemento A da Figura 2.1, como uma amostra do produto, consolidado no silo durante o enchimento. É possível isolar este elemento para um melhor entendimento do critério de ruptura ao deslizamento (“*Yield locus*”).

Schulze (2021) adota um teste de compressão uniaxial para exemplificação, conforme Figura 2.5 e passos seguintes para um tubo cheio com a amostra do produto (desprezando o atrito com a parede). O produto está sob uma tensão de consolidação, σ_1 , na direção vertical, assim, comprimido.

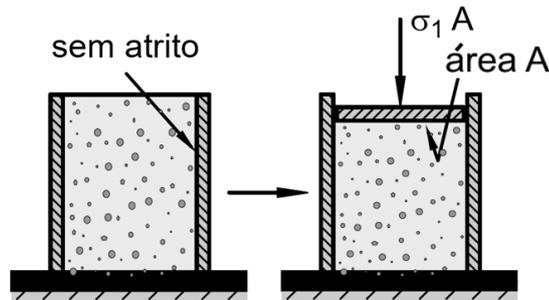


Figura 2.5 – Teste de compressão uniaxial. Fonte: Adaptado de Schulze (2021).

As tensões atuantes na amostra confinada da Figura 2.5 seguem o critério de ruptura ao deslizamento de Mohr-Coulomb, sendo representada em um diagrama τ versus σ , Figura 2.6.

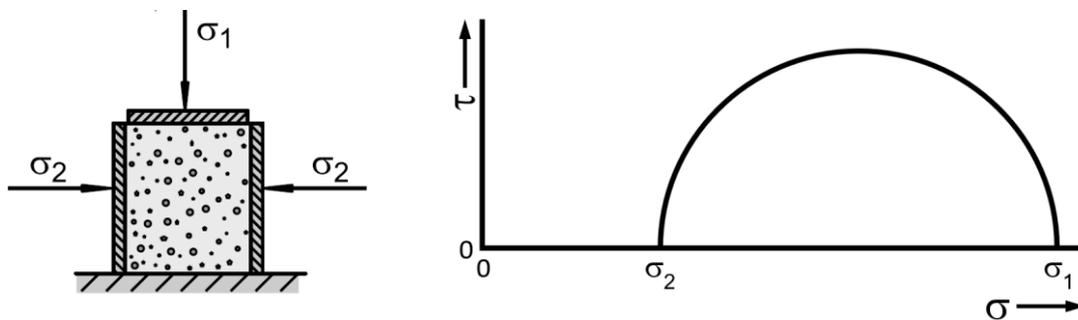


Figura 2.6 – Tensões de consolidação em amostra de produto a granel. Fonte: Adaptado de Schulze (2021).

Após a consolidação, a amostra do produto é aliviada da tensão de consolidação e o tubo é removido. Considerando posteriormente a ação de uma tensão de compressão vertical crescente na amostra, esta quebrará (falhará), causando fluxo incipiente em uma determinada tensão. A tensão causadora da falha é chamada de resistência à compressão, resistência coesiva ou limite de escoamento não confinado, σ_c , Figura 2.7. Outra designação é f_c descrita por Jenike (1964).

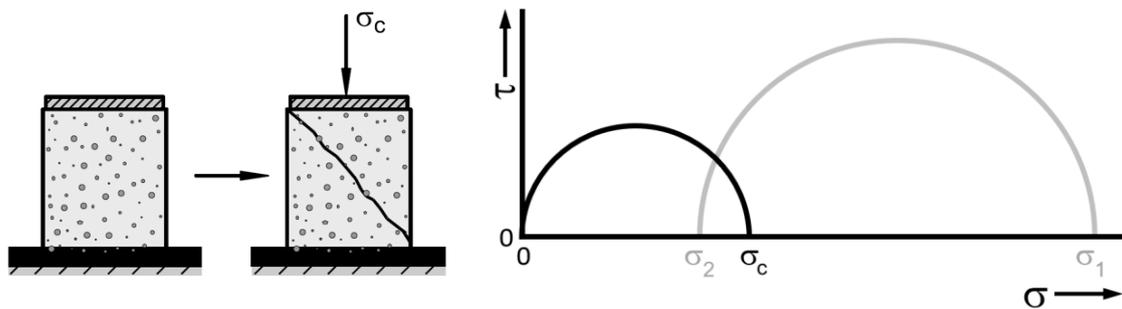


Figura 2.7 – Limite de escoamento não confinado. Fonte: Adaptado de Schulze (2021).

Segundo Cheung (2007), testes mostram que, para produtos coesivos, o envoltório de resistência real é uma curva convexa (Figura 2.8), dependente da tensão de consolidação do produto, do tempo de consolidação, do teor de umidade e temperatura.

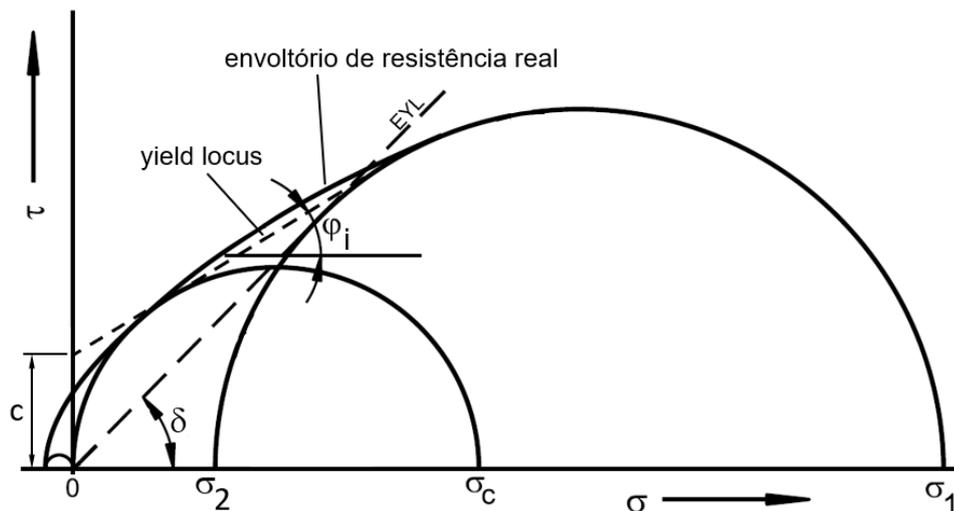


Figura 2.8 – Representação gráfica do critério de ruptura ao deslizamento (“Yield Locus”). Fonte: Adaptado de Cheung (2007).

Ainda neste diagrama da Figura 2.8 observa-se uma reta passando pela origem e tangenciando o maior círculo de Mohr, conhecida como lugar geométrico de escoamento efetivo (*effective yield locus* – EYL), sua inclinação é o efetivo ângulo de atrito interno, δ , (SCHWEDES, 2002). O “*Yield Locus*” é a linearização do envoltório real, que define a coesividade, c , do produto e cuja inclinação é o ângulo estático de atrito interno, φ_i . A coesividade, c , tem influência direta no comportamento de fluxo do produto analisado, a Figura 2.9 apresenta a relação entre diferentes valores de c para diferentes comportamentos de fluxo.

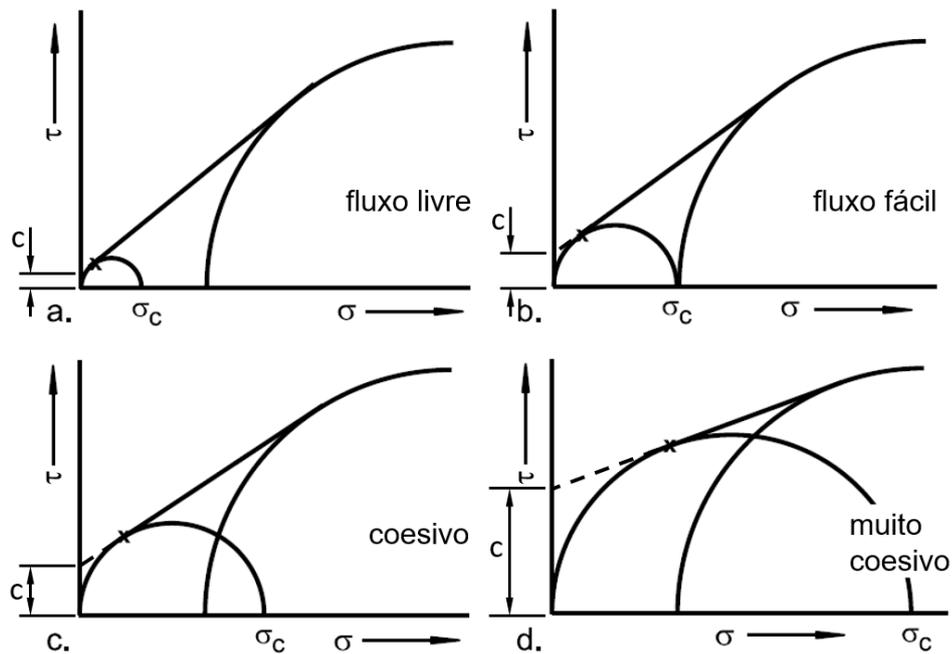


Figura 2.9 – Relação entre diferentes valores de c para diferentes comportamentos de fluxo. Fonte: Adaptado de Schulze (2021).

2.1.1.2 Função fluxo

A capacidade do produto de fluir é a propriedade do produto a granel caracterizada pela liberdade das partículas individuais de se moverem quando o produto a granel é colocado em movimento por alguma força, por gravidade ou alguma ação externa.

Um produto com baixa resistência coesiva, σ_c , e com o máximo de liberdade entre as partículas, representa um fluxo livre. Porém, se a liberdade de movimento das partículas constituintes aproximarem de zero, a resistência ao escoamento aumenta e o fluxo do produto se torna difícil e lento, a tendência é de entupimentos, deixando de fluir. (CEMA, 2003)

A função fluxo, FF , é usada como uma medida de capacidade de fluir do produto a granel, sendo determinada pelo ensaio de cisalhamento direto.

A Figura 2.11 apresenta o instantâneo “*Yield Locus*” para um produto com três condições de consolidação definidas pelas maiores tensões de consolidação $(\sigma_I)_1$, $(\sigma_I)_2$ e $(\sigma_I)_3$. A condição instantânea corresponde ao instante em que a tensão de consolidação atua. Em casos de silos e tremonhas corresponde ao instante que o fluxo ocorre exatamente após o enchimento do componente. Cada condição de consolidação representa a posição de um elemento do produto a granel fluindo na tremonha durante a descarga, Figura 2.10.

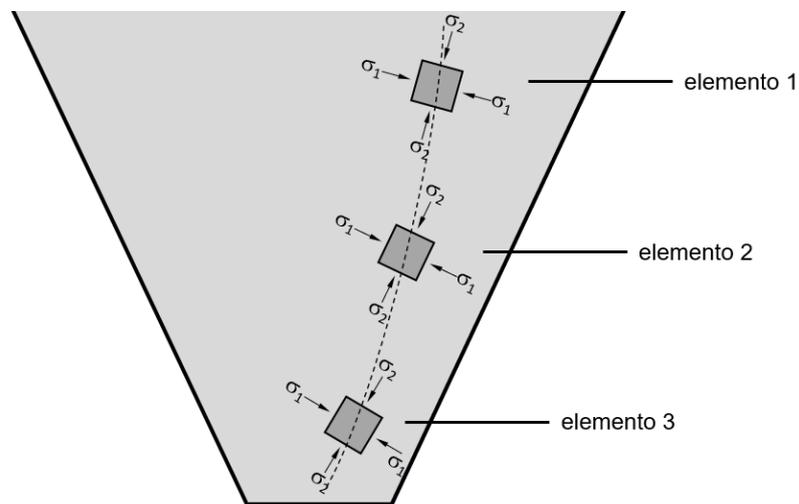


Figura 2.10 – Representação de posições dos elementos do produto a granel fluindo na tremonha durante a descarga.

Os três valores das resistências coesivas $(\sigma_c)_1$, $(\sigma_c)_2$ e $(\sigma_c)_3$ correspondem, respectivamente, as três tensões de consolidação $(\sigma_I)_1$, $(\sigma_I)_2$ e $(\sigma_I)_3$. A resistência, representada pela função fluxo, FF , é a resistência coesiva, σ_c , em função da tensão de consolidação σ_I , obtida pelo “*Yield Locus*”, Figura 2.11 (ROBERTS, 2005).

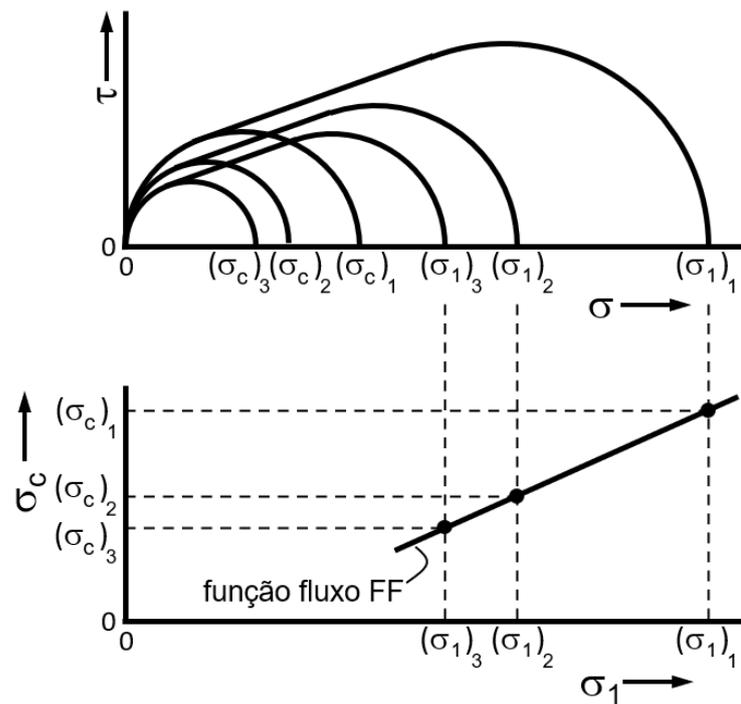


Figura 2.11 – “Yield Locus” e função fluxo FF . Fonte: Adaptado de Roberts (2005).

De forma a caracterizar o comportamento de fluxo dos produtos armazenados, a relação FF , da tensão de consolidação, σ_1 , pela resistência coesiva, σ_c , é utilizada pela equação 2.1.

$$FF = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad (2.1)$$

Vários números e curvas são necessárias para uma definição precisa do fluxo do produto. Porém, para uma rápida análise, pode-se tomar os seguintes valores-limites da função fluxo apresentados por Jenike (1964):

$FF < 2$	Produtos muito coesivos;
$2 < FF < 4$	Produtos coesivos;
$4 < FF < 10$	Produtos que fluem facilmente;
$FF > 10$	Produtos de fluxo livre.

Portanto, quanto maior o valor de FF , melhor é o fluxo do produto armazenado. Cada produto armazenado tem suas próprias funções fluxo. Produto sem coesão, de fluxo livre, geralmente

não causam problemas de fluxo e, obviamente, não possuem função fluxo (CALIL JR.; CHEUNG, 2007).

2.1.1.3 Ângulo de atrito com a parede

Como relatado anteriormente, os produtos a granel possuem capacidade de transferir tensões de cisalhamento entre os grãos e as paredes da tremonha. Para determinar o ângulo de atrito do produto armazenado com a parede, o aparelho de ensaio de cisalhamento direto (“*Jenike Shear Cell*”) é utilizado, onde o produto contido dentro do aparelho é submetido a diferentes níveis de tensões normais, σ_w , e uma tensão de cisalhamento, τ_w , necessária para mover-se sobre a base do aparelho que é uma amostra do material da parede a ser avaliada, conforme Figura 2.12a.

A Figura 2.12b apresenta o resultado deste teste em um diagrama τ_w versus σ_w , onde a média dos resultados dos ângulos de atrito com a parede para cada estado de tensão fornece o envoltório de deslizamento médio com a parede, ou “*Wall Yield Locus*” (CHEUNG, 2007).

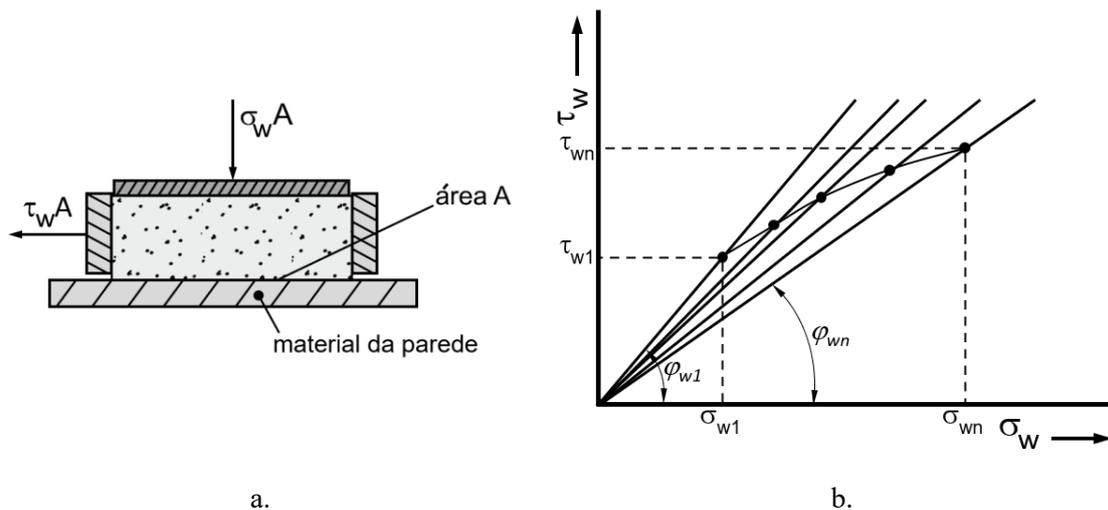


Figura 2.12 – Representação do *Jenike Shear Cell*: a) Configuração para medir o atrito do produto com a parede; b) Ângulo de atrito com a parede no diagrama τ_w versus σ_w . Fonte: Adaptado de Jenike (1964).

O ângulo de atrito com a parede, φ_w , resulta da inclinação do envoltório de deslizamento com a parede com o eixo σ_w , podendo ser determinado pela relação:

$$\varphi_w = \arctan\left(\frac{\tau_w}{\sigma_w}\right) \quad ; \quad \mu_w = \tan(\varphi_w) \quad (2.2)$$

Onde:

$\varphi_w = \hat{\text{Ângulo de atrito com a parede}}$

$\sigma_w = \text{Tensão normal na parede}$

$\tau_w = \text{Tensão de cisalhamento na parede}$

$\mu_w = \text{Atrito com a parede}$

O “*Wall Yield Locus*” na representação gráfica do critério de ruptura ao deslizamento está apresentada na Figura 2.13.

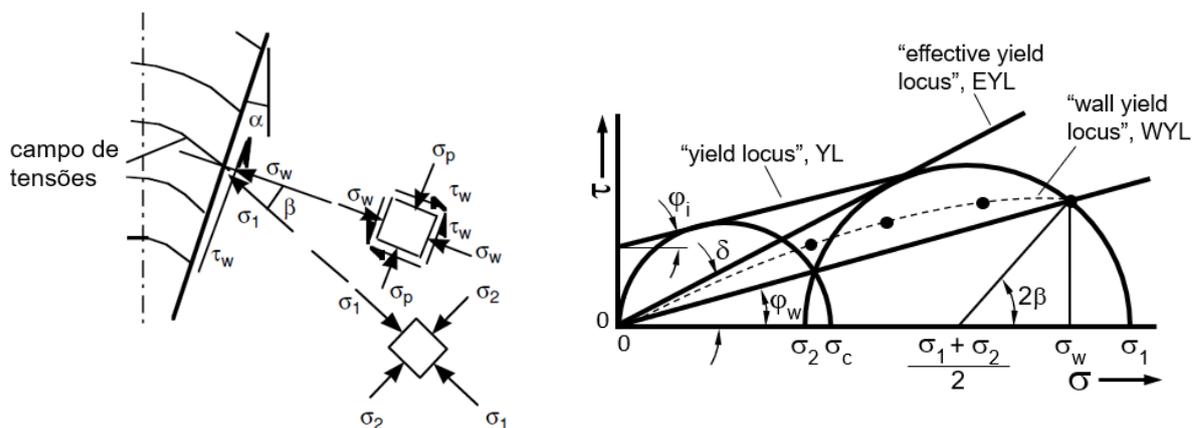


Figura 2.13 – Representação gráfica do critério de ruptura ao deslizamento com “*Wall Yield Locus*”.

Fonte: Adaptado de Roberts (2005).

2.1.1.4 Ensaio de cisalhamento direto

O comportamento destas propriedades nas fases de operação de um silo (carregamento, armazenamento e descarga) tem sido estudado por vários autores. Jenike (1964) foi o primeiro, desenvolvendo o aparelho denominado “*Jenike Shear Cell*”, equipamento que atualmente é utilizado para a determinação das propriedades de fluxo (CALIL JR.; CHEUNG, 2007).

A Figura 2.14 representa o “*Jenike Shear Cell*”, de seção transversal circular. Duas etapas são realizadas, a etapa de enchimento do equipamento com a amostra do produto e consolidação para obtenção do fluxo estável, seguida da etapa de cisalhamento para definição do “*Yield*

Locus”. A força normal, F_N , é aplicada na tampa, por placas de carga com ação da gravidade, enquanto a força de cisalhamento, F_S , é aplicada por meio de uma haste acionada eletromecanicamente com uma velocidade determinada (ROBERTS, 2005).

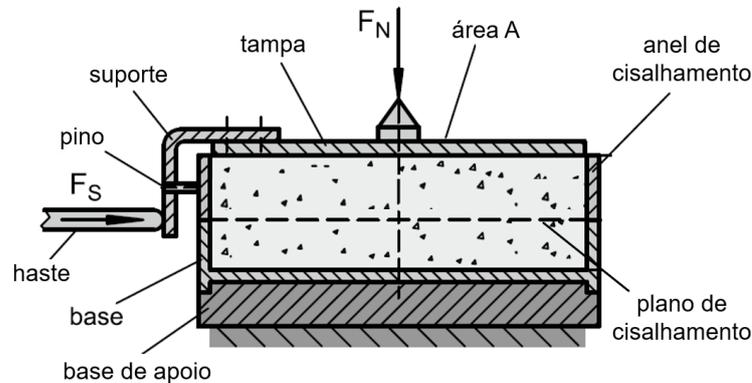


Figura 2.14 – Representação do “Jenike Shear Cell”. Fonte: Adaptado de Schulze (2021).

A força de cisalhamento é medida por células de carga tipo “strain-gauge” gerando um gráfico, Figura 2.15.

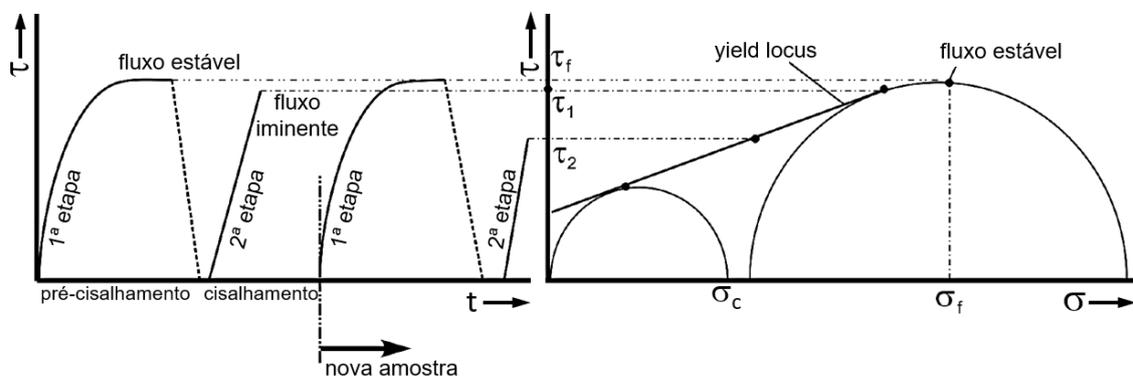


Figura 2.15 – Procedimento para gerar o “Yield Locus”. Fonte: Adaptado de Jenike (1964).

O ensaio para medir o atrito do produto com a parede utiliza o mesmo princípio, substituindo a base da Figura 2.14 pelo material da parede, conforme apresentado na Figura 2.12.

2.1.1.5 Densidade aparente

A densidade aparente, ρ_b , é definida pela razão de massa, m , do produto a granel, pelo seu volume, V , que inclui os “vazios” entre as partículas. Segundo McGlinchey (2005), a

complicação ocorre porque a quantidade de “vazios” entre as partículas depende de como o produto foi manuseado antes da medição ser feita, e que o volume de uma unidade de massa do produto a granel pode variar em 50% entre o produto estar em um estado comprimido e em um estado solto.

A relação entre densidade aparente, ρ_b , e a densidade do sólido, ρ_s , depende da porosidade, ε , que é a razão do volume (entre partículas, V_{vazios} , e vazios internos da partícula, $V_{vazios\ internos}$) pelo volume total, V , do produto a granel (incluindo todos os vazios), (SCHULZE, 2021).

A porosidade é representada pela equação 2.3:

$$\varepsilon = \frac{V_{vazios} + V_{vazios\ internos}}{V} \quad (2.3)$$

A densidade aparente então pode ser representada pela equação 2.4:

$$\rho_b = \rho_s \cdot (1 - \varepsilon) \quad (2.4)$$

Onde:

ε = Porosidade

V = Volume

ρ_b = Densidade aparente

ρ_s = Densidade do sólido

Segundo Calil Jr. e Cheung (2007) a densidade aparente de um produto é afetada pelo nível de tensão atuante no ponto considerado, ou seja, há uma dependência da densidade aparente em função do grau de compressibilidade (consolidação) do produto. A Figura 2.16, apresenta a densidade aparente com um típico aumento em relação a tensão de consolidação, σ_1 , para o produto representado pela curva A.

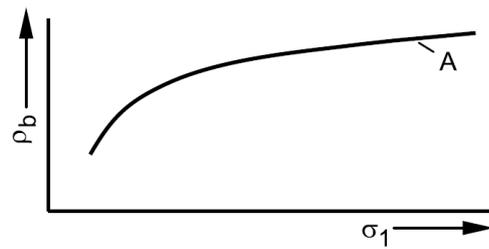


Figura 2.16 – Densidade aparente, ρ_b , em função da tensão de consolidação, σ_1 . Fonte: Schulze (2021).

2.1.1.6 Adesão e atrito com a parede

Adesão tem uma relação direta com o atrito com a parede, o atrito com a parede é a resistência do produto de cisalhar (fluir) na parede. Adesão descreve a propensão do material de aderir às paredes sob ação de ponte capilar/líquida, Figura 2.17. As forças envolvidas no processo de adesão são afetadas pelas propriedades de fluxo do produto, pela forma e tamanho da partícula, perfil da superfície da parede, teor de umidade, tempo de contato do produto com a parede e pela velocidade inicial de contato (FELICETTI, 2004).

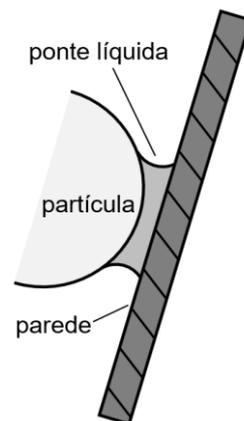


Figura 2.17 – Adesão por ponte líquida.

Alto índice de adesão e alto índice de atrito com a parede pode levar a bloqueios de fluxo e gerar uma descarga de fluxo de funil na tremonha. Nestes casos o atrito com a parede e a adesão podem ser minimizados reduzindo o teor de umidade do produto e a proporção de finos.

2.1.1.7 Abrasão

Movimento de um sólido durante o enchimento e esvaziamento provoca desgaste das paredes da tremonha. A característica de abrasão de um produto depende da dureza, tamanho, forma e densidade da partícula. Uma das medidas de dureza é a escala de Moh's, usada para minerais. Ferro e aço estão na faixa de 4 a 8,5, dependendo do seu nível de escoamento e tratamento térmico. Silos e tremonhas com fluxo de funil apresentam a vantagem de proteger as paredes devido a zona de produto estacionária (CALIL JR.; CHEUNG, 2007).

2.1.1.8 Ângulo de repouso

Ângulo de repouso, φ_r , é a inclinação de uma pilha do produto descompactado com a horizontal e pode ser usado para caracterizar uma ampla gama de produtos para monitorar o comportamento de fluxo (GELDART et al. 2006).

O teste para determinação do valor do ângulo de repouso parte da queda livre do produto sobre uma superfície horizontal, a formação do volume de produto permite medir o ângulo formado em relação a superfície (Figura 2.18). A altura de queda livre e a rugosidade da superfície influenciam na determinação do valor do ângulo e padrões devem ser seguidos para o procedimento (CHEUNG, 2007).

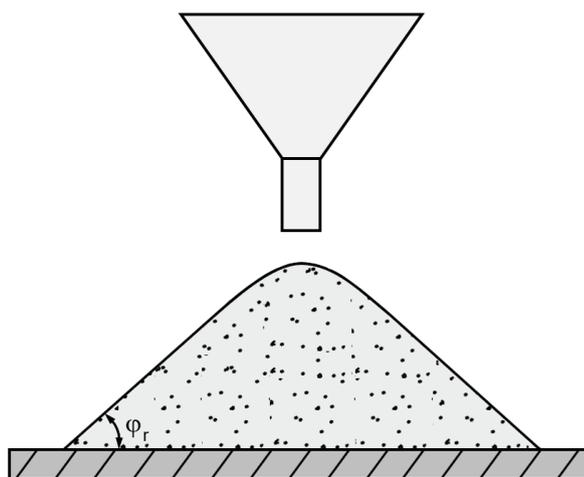


Figura 2.18 – Teste do ângulo de repouso.

2.1.1.9 Teor de umidade do produto

Segundo Schulze (2021) se uma pequena quantidade de líquido de baixa viscosidade é adicionada a um produto a granel seco, este líquido tem a capacidade de se acumular em espaços entre as partículas e forma pontes líquidas (Figura 2.19a). As pontes aumentam as forças adesivas entre partículas devido a tensão superficial. Isso resulta em um aumento da resistência coesiva do produto, σ_c , diminuindo acentuadamente a capacidade de fluir, Figura 2.20.

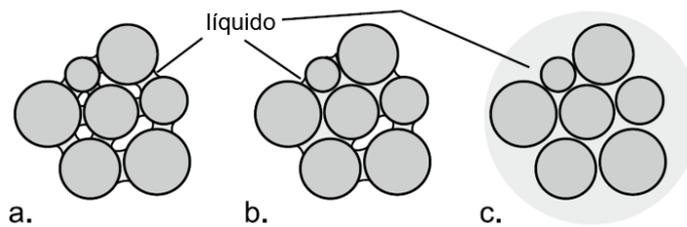


Figura 2.19 – Partículas com diferentes quantidades de líquido; a. Pontes líquidas; b. Pontes líquidas e regiões saturadas; c. Produto a granel saturado. Fonte: Schulze (2021).

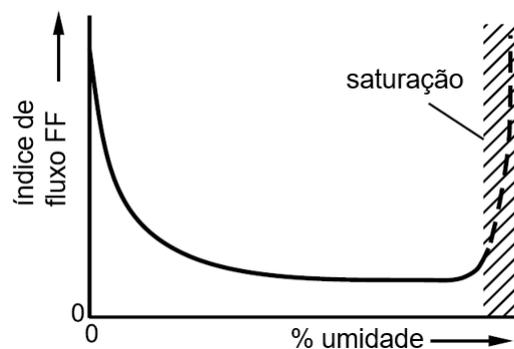


Figura 2.20 – Fluxo em função do teor de umidade. Fonte: Adaptado de Schulze (2021).

Em resumo, o maior teor de umidade é o indicativo do nível de fluxo no qual o produto exibe suas características de fluxo mais difíceis. Está apresentado na Figura 2.21 um gráfico típico da influência do teor de umidade no mesmo produto A para uma série de funções fluxo, FF , com diferentes teores de umidade, mc , crescentes, antes de atingir a saturação (CHEN; ROBERTS, 2017).

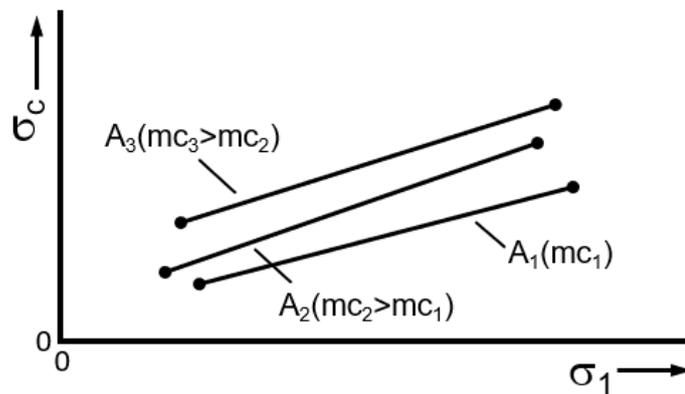


Figura 2.21 – Influência do teor de umidade (mc) na resistência coesiva do produto (σ_c). Fonte: Adaptado de Chen e Roberts (2017).

2.1.1.10 Granulometria e proporção de finos

Segundo Calil Jr. e Cheung (2007), produtos granulares são geralmente não-coesivos e de fluxo livre, porém os produtos com muito finos apresentam características de dificuldade de fluxo devido a coesão.

Uma possível classificação de partículas é apresentada pela CEMA (2003):

- Muito fino: $d < 425\mu\text{m}$
- Fino: $d < 3,35\text{ mm}$
- Granular: $d < 178\text{ mm}$

Roberts (1991) apresentou o efeito do tamanho da partícula na resistência ao cisalhamento (fluxo) do “pyrophyllite” com 5% de teor de umidade, Figura 2.22.

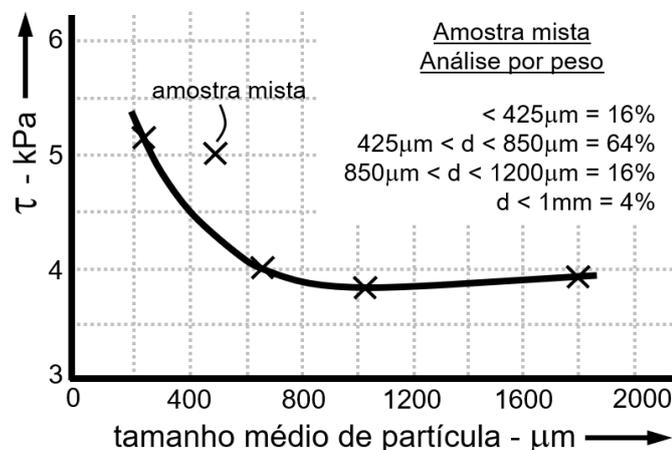


Figura 2.22 – Efeito do tamanho de partícula na resistência ao cisalhamento (fluxo) do “pyrophyllite” a 5%mc. Fonte: Adaptado de Roberts (1991).

A capacidade de fluir do produto aumenta com o aumento do tamanho da partícula. Para uma série de funções fluxo, FF , com diferentes teores de umidade, mc , crescentes, está apresentado na Figura 2.23a um gráfico típico da influência do tamanho da partícula para um produto B, beneficiado, onde a resistência coesiva, σ_c , não apresenta ser susceptível a mudanças do teor de umidade, diferente de um típico produto C, de baixa classificação granulométrica, Figura 2.23b, que apresenta um aumento da resistência ao escoamento significativo com o aumento do teor de umidade, devido a presença de finos (O'SHEA, 2022)

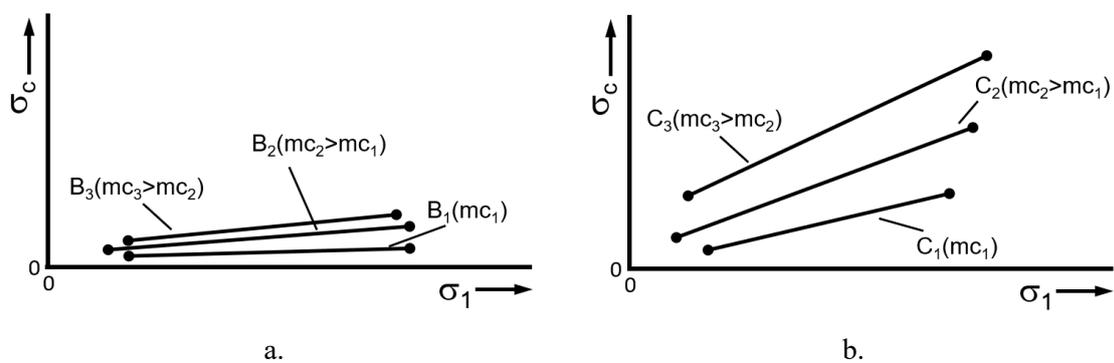


Figura 2.23 – Influência do tamanho de partículas: a. Produto beneficiado; b. Produto de baixa classificação granulométrica. Fonte: Adaptado de O'Shea (2022).

2.1.1.11 Tempo de consolidação

Destaca-se na seção 2.1.1.1 que a posição do “*Yield locus*” depende da tensão de consolidação do produto, teor de umidade, temperatura e tempo de consolidação. Alguns produtos a granel aumentam sua resistência coesiva se permanecerem armazenados por um período de tempo sob pressões, exemplo em silos e tremonhas. Este efeito é conhecido como tempo de consolidação, que é resultado do aumento de forças adesivas entre partículas com o tempo (SCHULZE, 2021).

O teste apresentado na Figura 2.5 é utilizado para determinar o tempo de consolidação, com o objetivo de simular longos períodos de armazenamento do produto.

A tensão de consolidação, σ_t , durante um longo período de tempo fará com que a resistência coesiva do produto, σ_c , aumente, e um índice, t , pode ser acrescido a esta notação, σ_{ct} , Figura 2.24. O “*Time Yield Locus (TYL)*” define a condição de escoamento do produto após um tempo de armazenamento ininterrupto (ROBERTS, 2005).

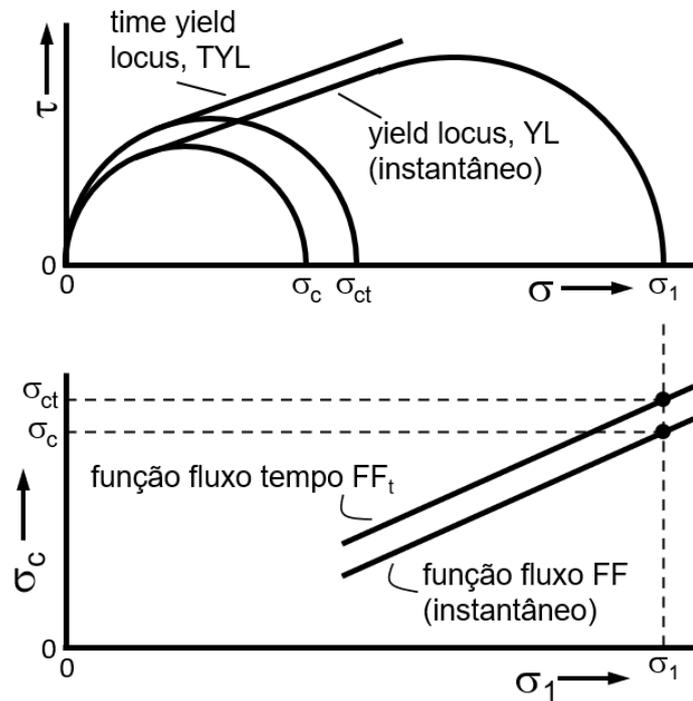


Figura 2.24 – “Time Yield Locus”, TYL, e função fluxo tempo FF_t . Fonte: Adaptado de Roberts (2005).

2.1.2 Características do minério de ferro

O minério de ferro apresenta, em geral, características e peculiaridades próprias e, devido a isto, estudos e pesquisas com foco no manuseio deste minério são sempre pauta dos desenvolvimentos na indústria.

Um número grande de minerais contém ferro. No entanto, apenas alguns são usados comercialmente. Aqueles que contêm quantidades importantes de ferro são agrupados de acordo com sua composição química. Alguns dos principais minerais são apresentados na Tabela II-1.

Tabela II-1 – Principais classes de minerais e suas composições químicas para minério de ferro. Fonte:

Adaptado de Wang (2015).

Classe	Composição química
Magnetita	Fe_3O_4
Hematita	Fe_2O_3
Goethita	$FeO(OH)$

Wang (2015) afirma que diferentes tipos de minério de ferro apresentam diferentes comportamentos de fluxo. Em um experimento, dois tipos de finos de minério de ferro, magnetita e goethita, foram testados com 5% de teor de umidade e granulometria de 25-75 μm . O resultado, apresentado na Figura 2.25, realça a diferença de comportamento entre os dois tipos, sendo a resistência coesiva, σ_c , da magnetita mais sensível ao aumento da tensão de consolidação, σ_1 , quando comparada a goethita.

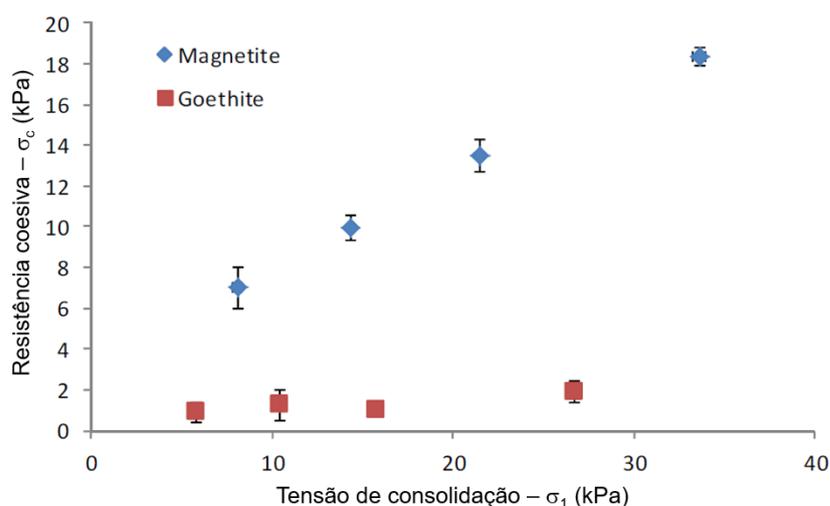


Figura 2.25 – Tensão de consolidação, σ_1 , vs resistência coesiva, σ_c , entre magnetita e goethita. Fonte: Wang (2015).

Geralmente, os produtos de minério de ferro são produzidos em quatro faixas diferentes em função do tamanho de partículas: *lump*, granulados, *sinter feed* e *pellet feed*. O produto de minério “*lump*” tem tamanho de partícula entre 6,3 e 40 mm. A faixa de tamanho de partículas de produtos granulados está entre 8 e 14 mm (MOHAJERI et al. 2020).

A categoria “*sinter feed*” exige granulometrias menores, requeridas no processo de sinterização. A faixa de tamanho exigida está entre 10/6,3 mm e 0,15 mm, este é gerado nas minas após o processamento úmido da matéria-prima do minério de ferro para a produção de *sinter*.

O “*pellet feed*” é o produto utilizado no processo de pelotização e sua distribuição granulométrica tem grande importância neste processo, influenciando a resistência, resiliência da pelota e seu controle de porosidade. Normalmente, este produto tem tamanho de partículas entre 0,15 mm e 150 μm (BHAGAT, 2019).

Três amostras de minério de ferro são apresentadas na Figura 2.26, pellets, *sinter feed* e *pellet feed*, indicando a diferença da distribuição granulométrica.

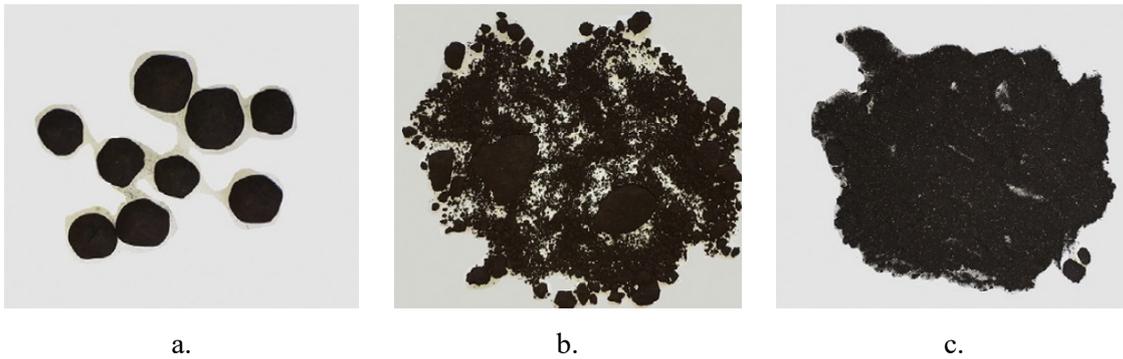


Figura 2.26 – Diferença de distribuição granulométrica: a. Pellets; b. Sinter feed; c. Pellet feed. Fonte: Mohajeri et al. (2020).

Durante o fluxo do minério de ferro em tremonhas com uma ampla variedade de tamanhos de partículas, geralmente as partículas maiores, produtos “*lump*” e granulares, se movem com maior facilidade, enquanto os finos cisalham entre si. Portanto a resistência coesiva do minério de ferro, σ_c , e o risco associado a interrupção de fluxo dependem da resistência dos finos. Como consequência, a resistência de um minério de ferro é geralmente avaliada na fração de tamanhos de finos, apesar de conter partículas de tamanho maior em partes do processo. (KRULL, et al., 2014)

A densidade aparente, ρ_b , do minério de ferro tem um lugar de destaque, comparada com outros produtos a granel normalmente aplicados em silos e tremonhas, por apresentar uma alta densidade aparente. Os valores de cada um destes produtos são apresentados pela CEMA (2003), sendo possível agrupá-los e apresentá-los em um gráfico de caixas, Figura 2.27.

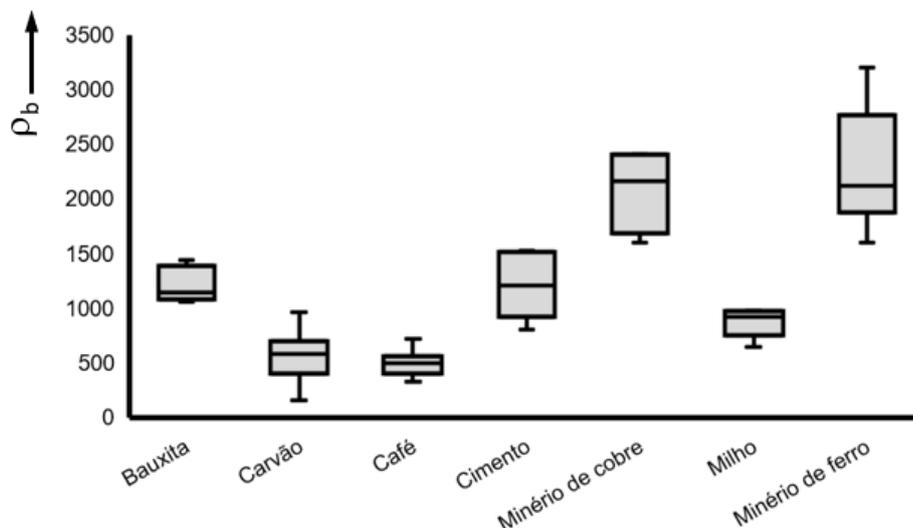


Figura 2.27 – Comparativo entre densidades aparente de vários produtos. Fonte: CEMA (2003).

Segundo Krull, et al. (2014), a adesão e o atrito com a parede são parâmetros críticos para um projeto funcional de tremonhas. A seleção correta do material de revestimento da parede é muito importante para a confiabilidade e custo de equipamentos de manuseio de produtos, onde revestimentos com maior atrito com a parede tendem a exigir ângulos mais acentuados de tremonha, enquanto revestimento com ângulos de atrito com a parede menores podem resultar em velocidades mais altas, contribuindo para o maior desgaste das paredes e componentes de recebimento do minério de ferro. Sendo o desgaste um problema comum relatado pela indústria do minério de ferro. O desgaste é influenciado pelas propriedades abrasivas do minério de ferro manuseado, o teor de umidade presente, as propriedades do material de revestimento e a geometria da tremonha em análise.

Calil Jr. e Cheung (2007) destacam que as pressões em silos e tremonhas são fortemente afetadas pelas propriedades do produto. As propriedades, como ângulo de atrito com a parede e densidade, mudam a forma das curvas de pressões laterais e verticais.

2.2 Projeto de tremonhas para fluxo

Problemas ocorrem com frequência durante a operação de uma tremonha (enchimento, armazenamento e descarregamento), muitos destes problemas estão vinculados com a definição equivocada do tipo de fluxo e projeto geométrico inadequado da tremonha para o fluxo escolhido.

O fluxo de produtos a granel em silos e tremonhas, tem sido tópico de extensivas pesquisas teóricas e experimentais por décadas. Jenike (1961, 1964) desenvolveu um procedimento que permite determinar a inclinação da parede da tremonha para fluxo de massa e a dimensão de abertura crítica, evitando obstrução por arco coesivo. Após este desenvolvimento, outros pesquisadores como Walker (1966), Enstad (1975), Arnold e McLean (1976), Benink (1989), Haaker (1999), Roberts (2005) entre outros apresentaram novas abordagens e resultados. Estes métodos serão abordados nas próximas seções.

2.2.1 Tipos de tremonhas

Jenike (1961, 1964) desenvolveu seus estudos a partir de dois tipos de tremonhas, a tremonha cônica, Figura 2.28a, e a tremonha tipo cunha, Figura 2.28b.

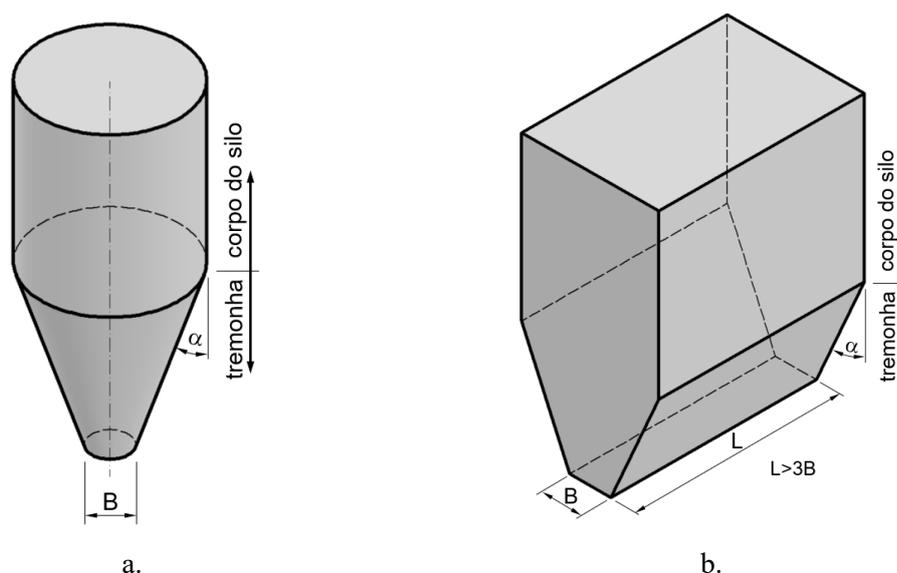


Figura 2.28 – Tipos de tremonhas iniciais: a. Tremonha cônica; b. Tremonha tipo cunha.

As tremonhas cônicas podem ser reconhecidas também por tremonha de fluxo axissimétrico e as tremonhas tipo cunha, por tremonhas de fluxo plano.

Devido às limitações geométricas, de espaço ou operação, outros tipos de tremonhas são aplicados na indústria, cujo comportamento do produto armazenado é estudado a partir dos tipos de tremonhas apresentados na Figura 2.28. Este trabalho aborda mais dois tipos, tremonha piramidal quadrada, Figura 2.29a, e tremonha piramidal retangular, Figura 2.29b.

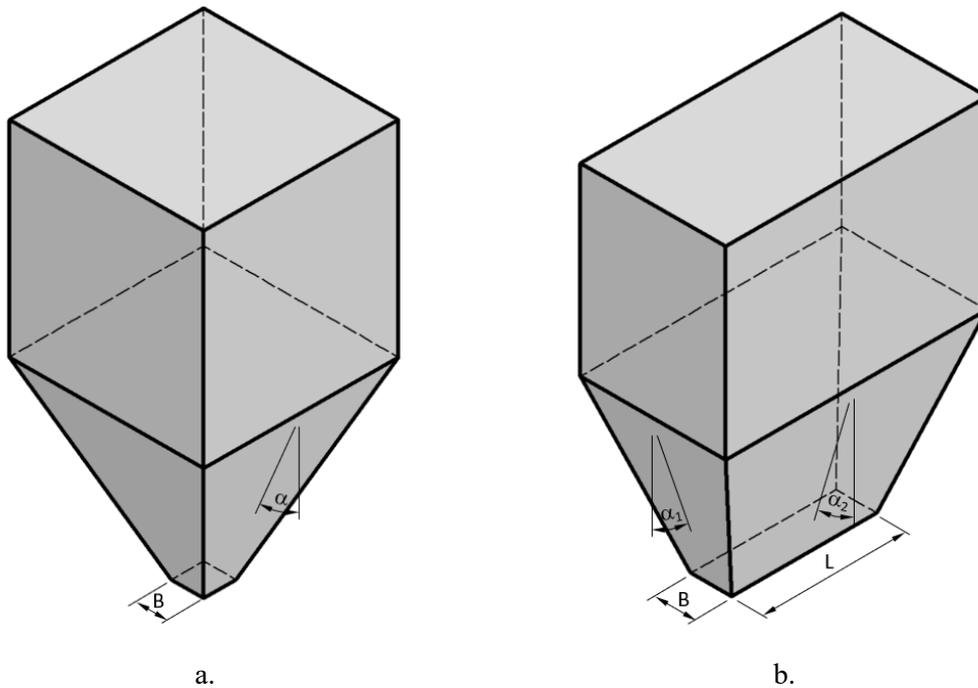


Figura 2.29 – Tipos de tremonhas: a. Tremonha piramidal quadrada; b. Tremonha piramidal retangular.

Especial atenção deve ser dada as inclinações das paredes das tremonhas. As tremonhas cônica, cunha e piramidal quadrada tem apenas um valor para inclinação de parede, α , enquanto a tremonha piramidal retangular apresenta duas inclinações diferentes, α_1 e α_2 . Estes valores são fundamentais para a definição das dimensões da tremonha.

2.2.2 Tipos de fluxo

Para o projeto da tremonha, deve-se caracterizar o tipo de fluxo que está ocorrendo. O tipo de fluxo determina a característica da descarga, segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente, a distribuição de pressões no componente e fundação, a integridade e o custo da construção. A determinação do tipo de fluxo deve ser feita enquanto o silo e tremonha estão sendo projetados ou selecionados. (CALIL JR., 1990)

O tipo de fluxo é dividido em dois tipos, Figura 2.30:

- Fluxo de massa: Segundo Roberts (2005), este tipo de fluxo garante a descarga completa do produto no silo com uma taxa de fluxo previsível. Padrão de fluxo conhecido pela expressão “*first in, first out*” (primeiro a entrar é o primeiro a sair). Caracteriza-se pelo fato de todas as partículas do produto armazenado estarem em movimento durante a operação de descarga. Nenhuma partícula permanece em sua posição original, desde o início da descarga, o que impede a formação de zonas estacionárias. Este padrão de fluxo é o ideal e deve ser obtido sempre que possível (CALIL JR.; CHEUNG, 2007).
- Fluxo de funil: Segundo Roberts (2005), este tipo de fluxo ocorre quando a inclinação da parede da tremonha, α , e o acabamento superficial das paredes da tremonha são muito altos para atingir o fluxo de massa. Padrão de fluxo conhecido pela expressão “*first in, last out*” (primeiro a entrar é o último a sair), o que causa a formação do canal de fluxo. Esta condição de descarga leva a formação da zona estagnada de produto interna ao silo.

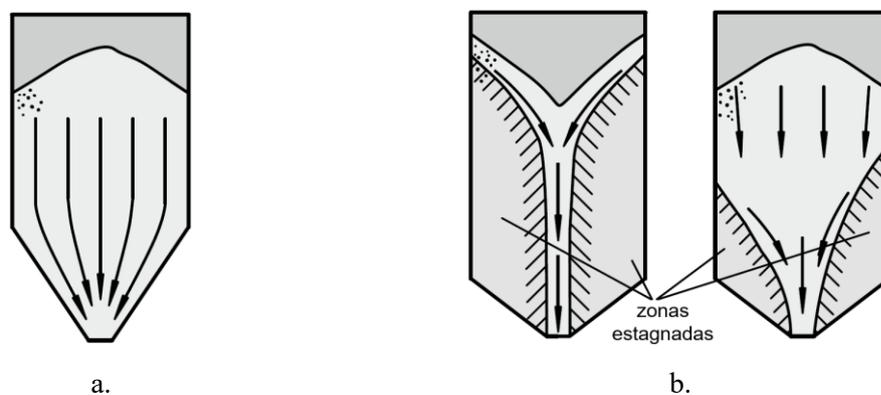


Figura 2.30 – Tipos de fluxo: a. Fluxo de massa; b. Fluxo de funil. Fonte: Schulze (2021).

O fluxo é induzido pelas zonas de cisalhamento criadas durante o descarregamento do produto. Estas zonas de cisalhamento sempre ocorrem ao longo das paredes dos silos e tremonhas devido a sua rugosidade e no interior do fluxo do produto, entre partículas. Inicialmente, elas são criadas nas bordas da saída, no início do descarregamento, e se propagam para níveis superiores da tremonha. As zonas de cisalhamento interiores se cruzam em torno da simetria do silo, atingem as paredes durante o fluxo de massa e posteriormente são refletidas a partir delas, Figura 2.31. Este processo se repete até as zonas atingirem o limite livre na tremonha ou a linha de transição, tremonha/corpo do silo. O comportamento no tipo de fluxo de funil é diferente, onde as zonas de cisalhamento no produto são quase simétricas, em torno de uma linha vertical média, Figura 2.32. Algumas destas zonas se propagam para cima, outras se cruzam (TEJCHMAN, 2013).

Com auxílio de raio-X, Michalowski (1984, 1990), observou as zonas de cisalhamento durante o fluxo de produto granular confinado, Figura 2.31 e Figura 2.32.

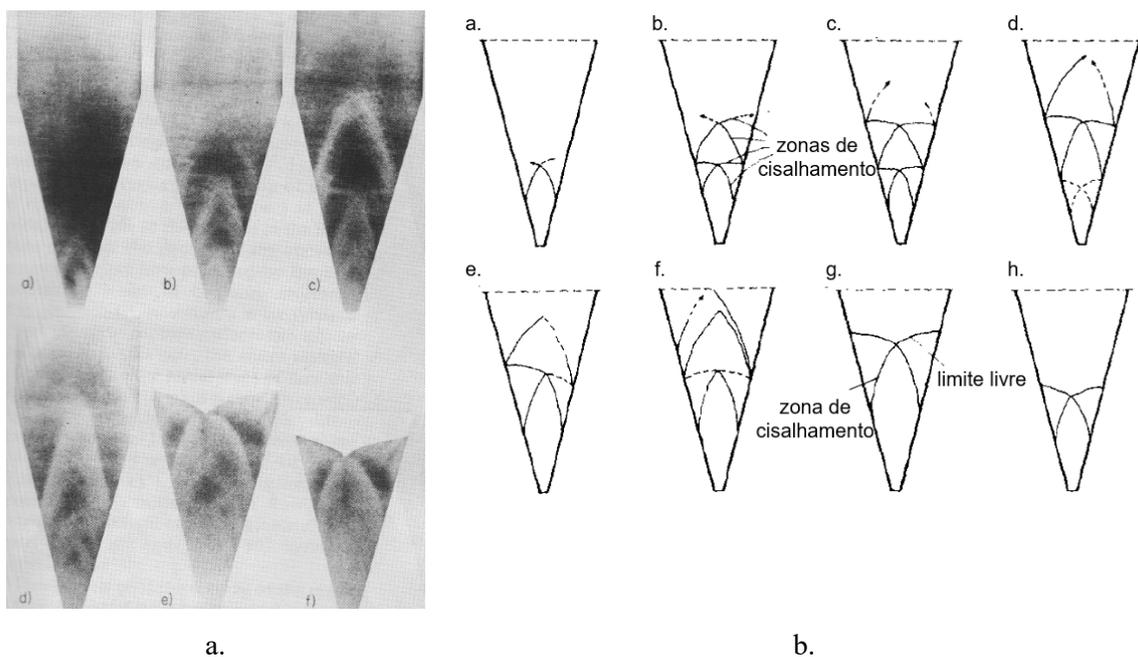


Figura 2.31 – Fluxo de massa em tremonha: a. Imagens de raio-x; b. Representação esquemática do comportamento de fluxo. Fonte: Michalowski (1984, 1990).

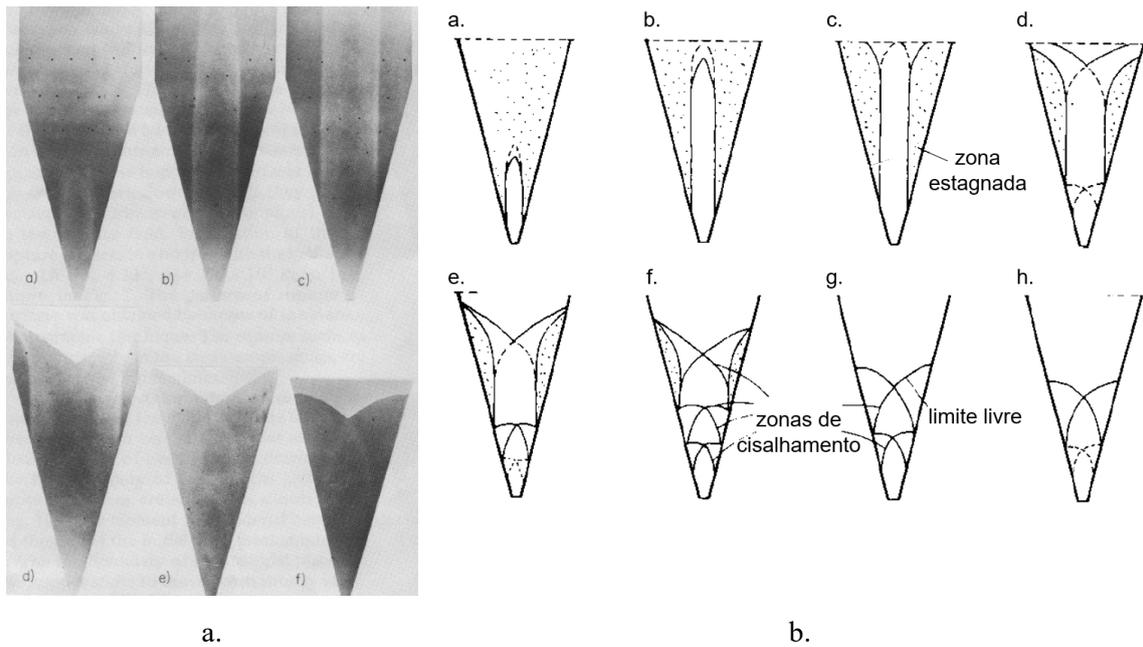


Figura 2.32 – Fluxo de funil em tremonha: a. Imagens de raio-x; b. Representação esquemática do comportamento de fluxo. Fonte: Michalowski (1984, 1990).

2.2.3 Vantagens e desvantagens do tipo de fluxo

A Tabela II-2 apresenta as vantagens e desvantagens de cada tipo de fluxo para auxílio na escolha.

Tabela II-2 – Comparação entre os padrões de fluxo. Fonte: Cheung (2007).

FLUXO DE MASSA		FLUXO DE FUNIL	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Vazão regular	Altas tensões na transição da tremonha	Menor altura da tremonha	Flutuações na vazão
Efeitos de segregação radial é reduzido, com a melhora da homogeneidade	Desgaste superficial da parede	Diminuição das pressões dinâmicas na região da tremonha	Segregação de sólidos
Campo de tensões mais previsível	São necessárias tremonhas mais inclinadas e lisas	Menor desgaste superficial da parede	Efeitos de consolidação com o tempo podem causar obstruções no fluxo
Toda capacidade é utilizada	Maior energia de elevação		Deterioração dos produtos por causa da região estagnada
Maior capacidade de armazenamento, pois não possui regiões com produto estagnado			Formação de tubos
			Picos de pressões na região de transição efetiva

Segundo Jenike (1964), fluxo de funil é utilizado para produtos com partículas duras, abrasivas e granulares, devido ao pouco desgaste das paredes da tremonha. No entanto, as pressões nas paredes em tremonhas com fluxo de massa são relativamente baixas com desgastes possíveis de serem acompanhados. A condição para produto muito coesivo, após seu armazenamento e acomodação, requer, como exemplo, alimentadores ou equipamentos de grandes larguras para fluxo de funil. Uma situação mais econômica é a utilização de fluxo de massa, com significativas reduções dos equipamentos sob a tremonha, construindo tremonhas mais robustas e revestimentos mais elaborados para o desgaste.

No entanto, a principal razão de fluxo de funil ainda ser utilizado é a lacuna de conhecimento sobre a aplicação de fluxo de massa, pois existe uma noção que silos e tremonhas de fluxo de

funil são mais baratos. Sendo que a “economia” é mais aparente do que real. Com frequência a utilização de fluxo de funil se torna mais oneroso em termos de tempo excessivo de “startup”, turnos adicionais, baixa qualidade de produção, problemas com armazenamento, modificações em projeto e em loco, dispositivos de promoção de fluxo e tempo de equipes de operação e supervisão para manter o fluxo do produto.

2.2.4 Determinação do tipo de fluxo

2.2.4.1 Limites superiores para fluxo de massa segundo Jenike

Pelos campos de tensões radiais, Jenike (1961) definiu os limites de fluxo de massa e fluxo de funil na tremonha. Segundo Roberts (2005), estes limites são bem conhecidos e têm sido usados extensivamente e com sucesso no projeto de silos. Estes limites, para tremonhas de fluxo axissimétrico (tipo cônica) e de fluxo plano (tipo cunha), dependem do ângulo de inclinação da parede da tremonha, α , do efetivo ângulo de atrito interno, δ , e o ângulo de atrito com a parede, φ_w .

Para os silos com fluxo axissimétricos, Jenike (1961) mostra que o limite superior para fluxo de massa pode ser obtido pelas equações 2.5 e 2.6.

$$\alpha \leq \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \cdot \arccos\left(\frac{1 - \text{sen } \delta}{2 \cdot \text{sen } \delta}\right) - \beta \quad (2.5)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot \left[\varphi_w + \arcsen\left(\frac{\text{sen } \varphi_w}{\text{sen } \delta}\right) \right] \quad (2.6)$$

Onde:

α = Ângulo da tremonha

φ_w = Ângulo de atrito com a parede

δ = Efetivo ângulo de atrito interno

β = Ângulo entre a tensão principal, σ_l , e a tensão normal na parede, σ_w , durante o fluxo, conforme apresentado na Figura 2.33.

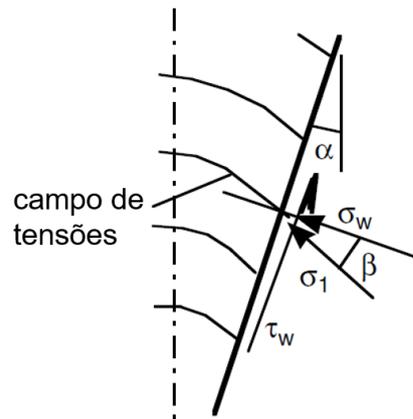


Figura 2.33 – Campo de tensões na tremonha. Fonte: Adaptado de Roberts (2005).

O limite para tremonha de fluxo plano é representado empiricamente pela equação 2.7.

$$\alpha \leq \frac{e^{[3,75 \cdot 1,01^{(0,1 \cdot \delta - 3)}]} - \varphi_w}{0,725 \cdot (\tan \delta)^{0,2}} \quad (2.7)$$

Os limites para tremonha de fluxo axissimétrico e tremonha de fluxo plano são representados graficamente nas Figura 2.34a e Figura 2.34b, respectivamente, para cinco valores distintos de efetivo ângulo de atrito interno, δ .

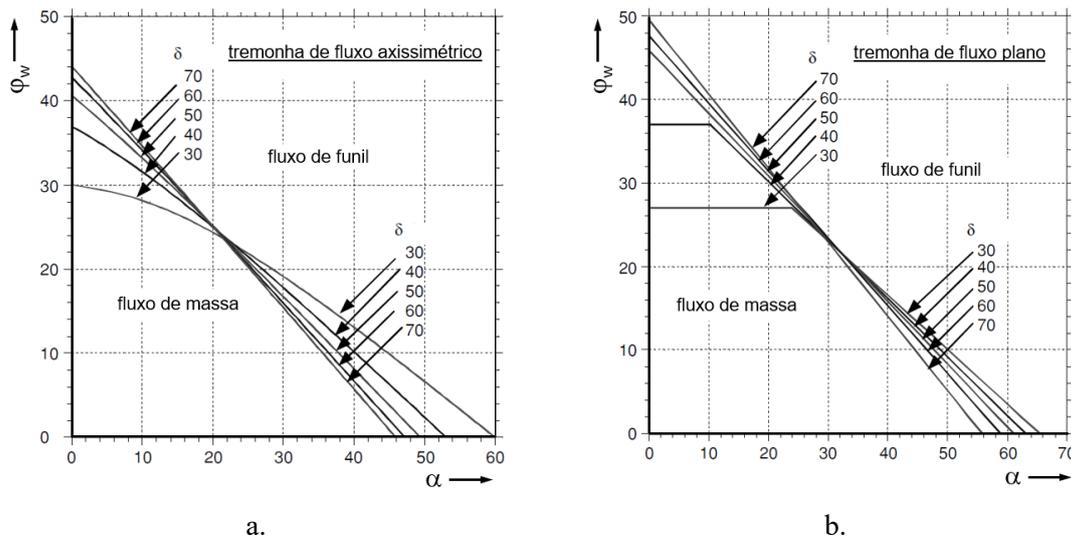


Figura 2.34 – Limites para fluxo de massa: a. Tremonha de fluxo axissimétrico; b. Tremonha de fluxo plano. Fonte: Adaptado de Roberts (2005).

Para tremonhas de fluxo axissimétrico (tipo cônica), Roberts (2005) recomenda, como fator de segurança, que o ângulo de inclinação da parede da tremonha seja 3° abaixo do limite indicado no gráfico. Para as tremonhas de fluxo plano (tipo cunha), o limite de projeto indicado no gráfico pode ser utilizado.

Ao se determinar o tipo de fluxo para tremonhas piramidais quadradas Walker (1966) sugere a utilização dos mesmos limites para fluxo de massa das tremonhas cônicas, devido a simetria.

2.2.4.2 Identificação de fluxo segundo as normas internacionais

As normas internacionais, de maneira geral, apresentam dois gráficos para a determinação do tipo de fluxo que ocorre no silo. Segundo Cheung (2007) os gráficos apresentados pelas normas têm como base a teoria de Jenike (1961) e experimentos conduzidos por outros pesquisadores, que dividem o fluxo em três categorias:

- Fluxo de massa
- Fluxo intermediário (misto)
- Fluxo de funil

Estes gráficos fornecem o tipo de fluxo em função do coeficiente de atrito com a parede, μ_w , o ângulo de inclinação das paredes da tremonha, α , e o tipo de tremonha (cônicas ou cunhas). A Figura 2.35 são os gráficos apresentados pela EN 1991-4:2006 e a Figura 2.36, os gráficos apresentados pela AS 3774-1996.

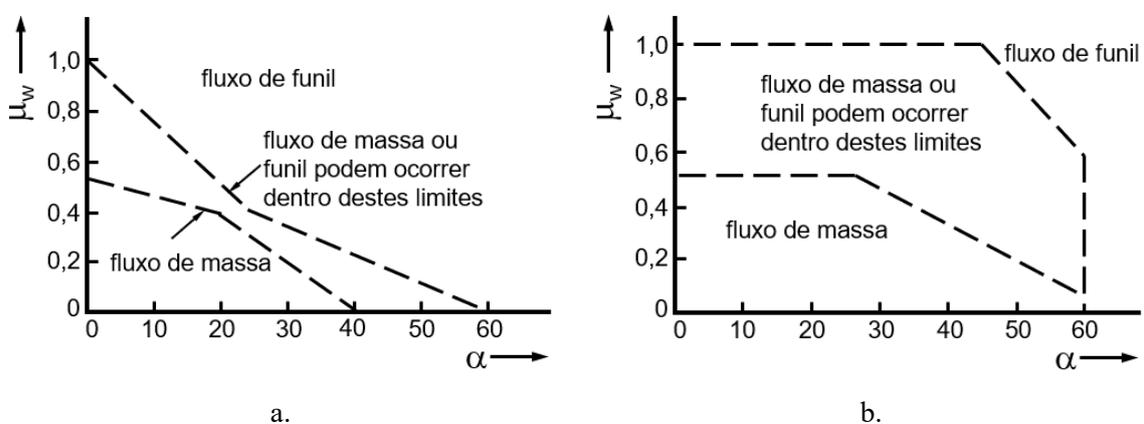


Figura 2.35 – Determinação do tipo de fluxo em tremonhas: a. Tipo cônica; b. Tipo cunha. Fonte: EN 1991-4:2006.

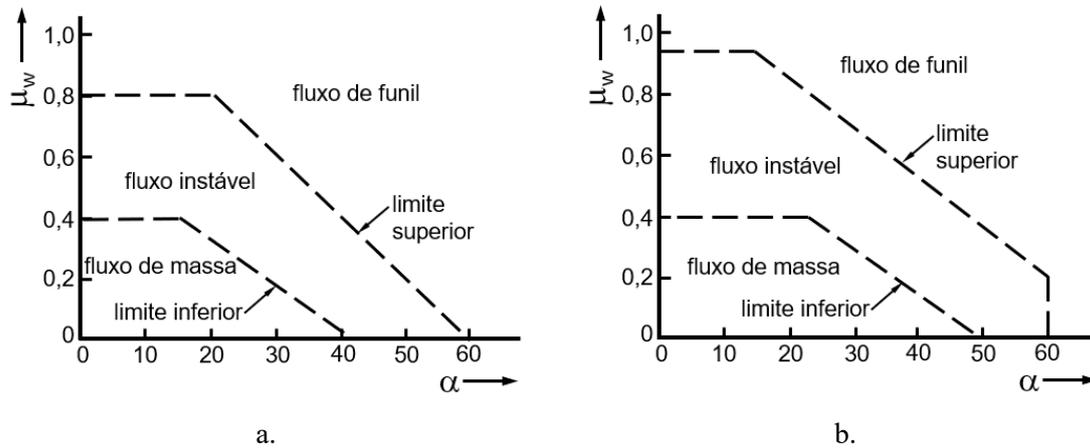


Figura 2.36 – As fronteiras entre fluxo de massa e fluxo de funil: a. Tipo cônica; b. Tipo cunha. Fonte: AS 3774-1996.

2.2.4.3 Identificação de fluxo segundo Benink

Benink (1989) afirma, por meio de seus experimentos, que a teoria de tensões radiais de Jenike (1961) é inadequada para identificar os limites de fluxo de funil, indicando que além do fluxo de massa e funil, um terceiro tipo de fluxo, que é caracterizado pela mudança de fluxo durante o descarregamento, chamado de fluxo intermediário ou misto.

Segundo Thomson (1997) estudos mostram que os limites de fluxo de funil não podem ser previstos com certeza para teoria do campo de tensões radiais, pois não se leva em conta a influência da carga de sobrecarga referente ao corpo do silo durante o escoamento do produto.

Benink (1989) desenvolveu uma nova teoria para distinguir os três regimes de fluxo, fluxo de massa, fluxo intermediário ou misto e fluxo de funil, Figura 2.38. A teoria estima a altura crítica, H_{cr} , no qual o fluxo muda. A relação da altura crítica com as propriedades de fluxo do produto a granel e parâmetros geométricos da tremonha levou o limite de fluxo de funil, denominado limite de Benink, a dependência do efetivo ângulo de atrito interno, δ , e a razão entre a altura do corpo do silo e o valor de abertura (H/D), Figura 2.37. Nesta teoria, o limite de fluxo de massa permanece conforme Jenike (1961).

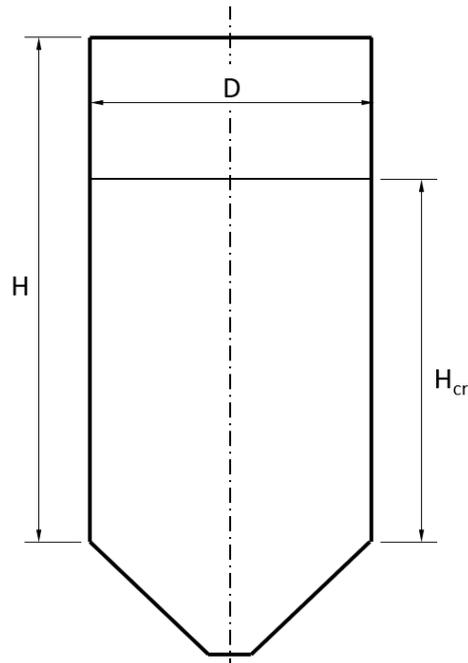


Figura 2.37 – Indicação das dimensões apresentadas por Benink (1989).

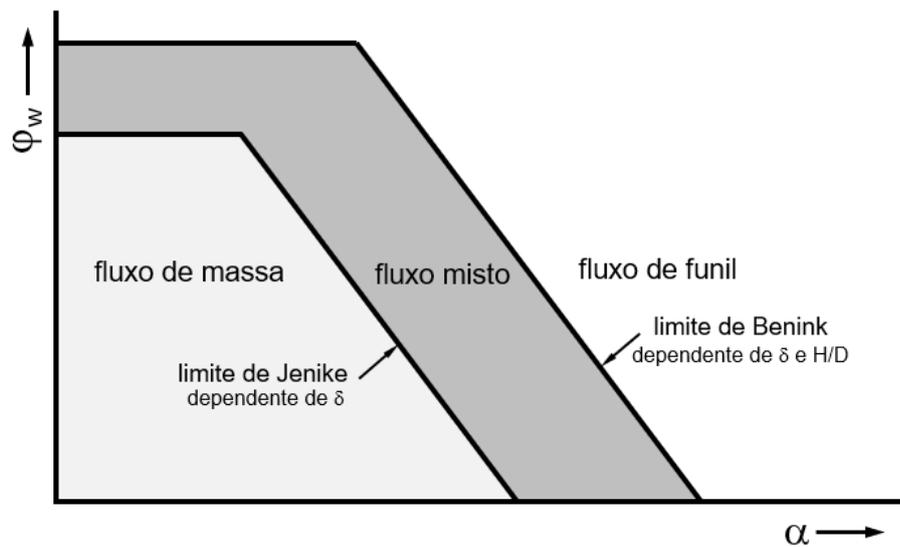


Figura 2.38 – Padrões de fluxo. Fonte: Benink (1989).

2.2.5 Obstruções de fluxo

Segundo Calil Jr. e Cheung (2007) a formação de uma obstrução de fluxo deve-se ao fato de que o produto armazenado adquire resistência suficiente para suportar o próprio peso, devido a consolidação do produto. Existem basicamente dois tipos de obstruções de fluxo: arco e tubo. Assume-se que, durante a descarga do produto, se nenhuma dessas duas obstruções

ocorreram, um fluxo satisfatório acontecerá.

Estas obstruções causam sérios danos aos silos e principalmente para a tremonha, pois quando rompem, atuam como um pistão, comprimindo o ar existente na tremonha, levando a danos na boca de descarga e paredes laterais (PALMA, 2005).

2.2.6 Determinação da geometria da tremonha para fluxo de massa

A geometria da tremonha deve ser projetada para garantir que não haja obstruções de fluxo. Para isto o conhecimento das propriedades de fluxo, item 2.1, é de extrema importância para tal definição. O conhecimento de outro parâmetro se destaca nesta etapa de projeto, o fator fluxo da tremonha, f , dependente da geometria da tremonha, do efetivo ângulo de atrito interno, δ , e do ângulo de atrito do produto com a parede, ϕ_w . Este é um fator de interação entre o produto e a tremonha para a avaliação da possibilidade de obstrução.

2.2.6.1 Projeto de tremonha para obstrução tipo arco

Segundo Calil Jr. e Cheung (2007) a principal fonte de obstruções de fluxo de massa é a formação de arcos estáveis, formados acima da saída e resultando em fluxo irregular ou em bloqueio total do fluxo. A abertura de saída deve ser dimensionada de tal maneira a prevenir a formação de arco mecânico, Figura 2.39a, que é formado pelo travamento de uma pequena quantidade de partículas.

Haaker (1999) sugere:

$$B \geq (5 \text{ a } 7) \cdot d_{p(\text{máx})} \quad (2.8)$$

Para partículas esféricas:

$$B \geq 6 \cdot d_{p(\text{máx})} \text{ e } B \geq 25,4 \text{ cm} \quad (2.9)$$

Para partículas angulares:

$$B \geq 8 \cdot d_{p(\text{máx})} \text{ e } B \geq 25,4 \text{ cm} \quad (2.10)$$

Onde, $d_{p(\text{máx})}$ é o maior diâmetro das partículas do produto (CALIL JR.; CHEUNG, 2007).

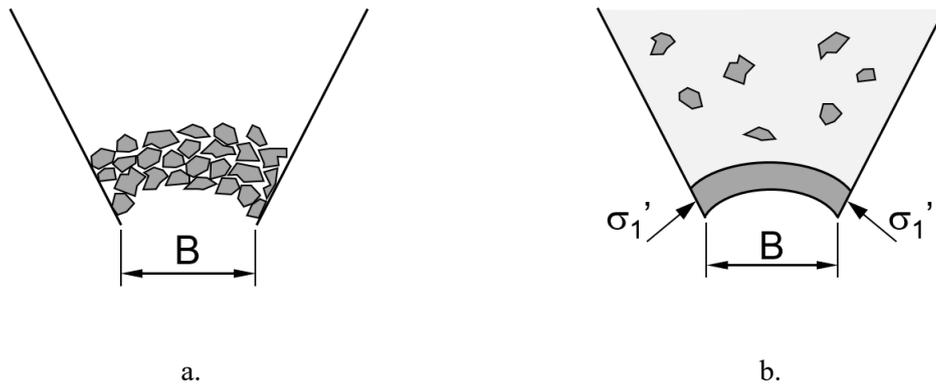


Figura 2.39 – Obstruções tipo arco: a. Arco mecânico; b. Arco coesivo.

O arco coesivo, Figura 2.39b, é formado a partir da resistência coesiva do produto devido à tensão de consolidação. O principal objetivo do projeto de tremonha para fluxo de massa é determinar o ângulo da parede da tremonha, α , e a dimensão mínima de abertura de descarga, B , para prevenir a formação de arco coesivo, ao mesmo tempo garantindo que o arco mecânico não se forme.

Segundo Gaylord Jr. e Gaylord (1984), para análise de fluxo em tremonhas piramidais, o ângulo de inclinação da parede da tremonha a ser avaliado é o ângulo de vale, α_v , ou o maior ângulo entre ele e as paredes.

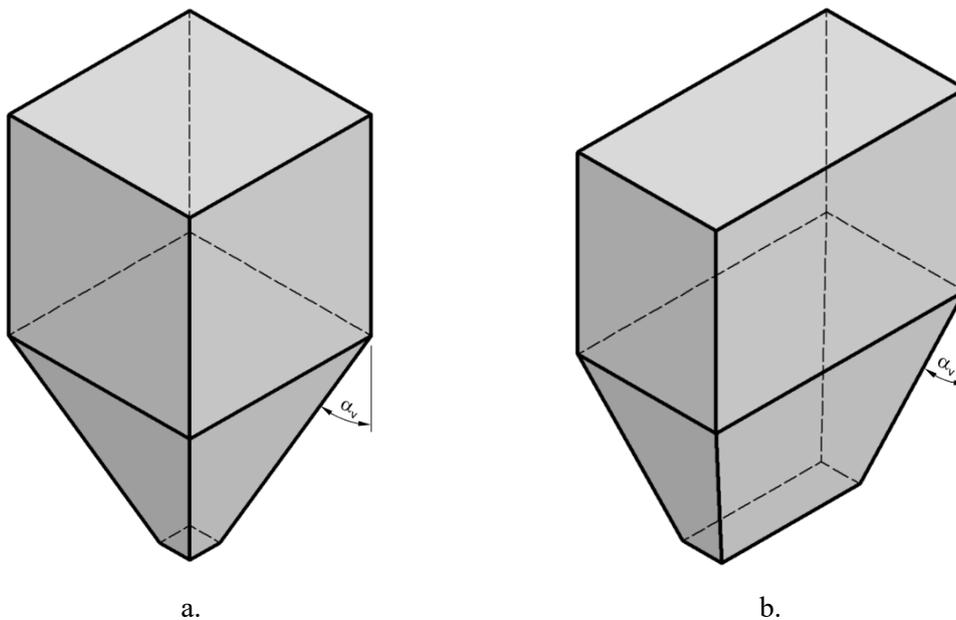


Figura 2.40 – Identificação do ângulo de vale, α_v : a. Tremonha piramidal quadrada; b. Tremonha piramidal retangular.

O primeiro depósito de produto durante o enchimento do silo, caracteriza-se por ser um produto não consolidado, mas à medida que o nível de produto sobe, o produto se consolida sob a ação da tensão de consolidação, σ_l . Como resultado desta consolidação, a resistência coesiva, σ_c , também tem variação, Figura 2.41 (esta relação pode ser percebida pela função fluxo, FF , no item 2.1.1.2).

A tensão principal atuando no arco, σ_l' , é proporcional a dimensão, B , do arco. Sempre que $\sigma_l' > \sigma_c$, o produto a granel tem resistência insuficiente para suportar o arco coesivo, garantindo o escoamento. Em caso inverso, $\sigma_l' < \sigma_c$, o produto a granel passa a ter resistência suficiente para suportar o arco coesivo, bloqueando o fluxo. A dimensão crítica de abertura da tremonha, B_{cr} , é determinada para a condição $\sigma_l' = \sigma_c$ (ROBERTS, 2005).

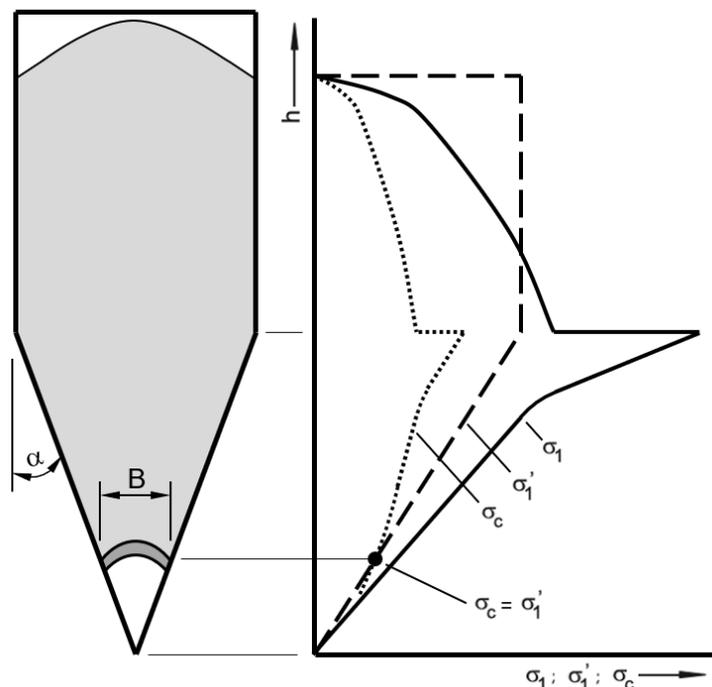


Figura 2.41 – Estado de tensões que mostram a formação de arcos estáveis. Fonte: Adaptado de Jenike (1964).

A teoria do campo de tensões radiais, Jenike (1964), é uma das teorias mais importantes para determinação do fator fluxo da tremonha, ff . Esta teoria determina os campos de tensões próximo a saída da tremonha durante o esvaziamento. Jenike (1964) introduziu o critério de fluxo e não-fluxo para prever a dimensão crítica, B_{cr} , da saída da tremonha para prever as obstruções por arcos coesivos. Porém esta teoria recai em um sistema de equações diferenciais parciais ordinárias e requer um método numérico de resolução (CALIL JR.;

CHEUNG, 2007).

Abordagem de Jenike (1964)

Tais resoluções foram publicadas por Jenike (1964), para tremonha de fluxo axissimétrico (tipo cônica) e de fluxo plano (tipo cunha), na forma de gráficos de fatores de fluxo. Cada gráfico refere-se a um efetivo ângulo de atrito interno, δ . Os gráficos representados na Figura 2.42 referem-se a $\delta = 50^\circ$.

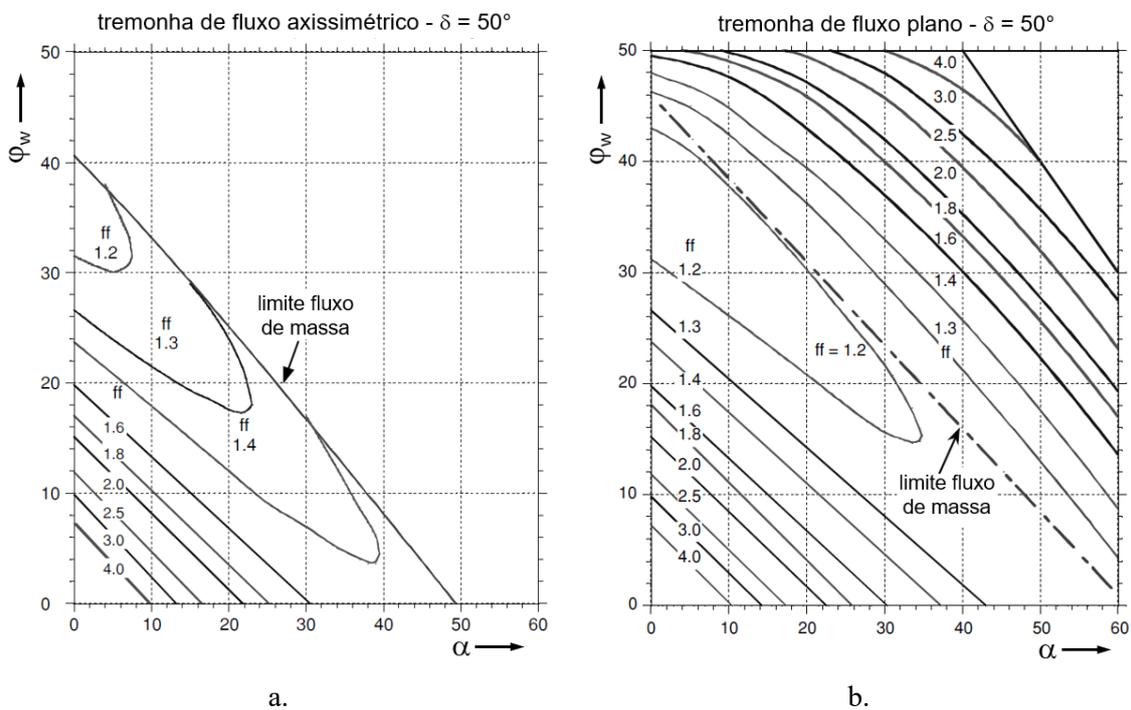


Figura 2.42 – Gráficos de fator fluxo para tremonhas com $\delta = 50^\circ$: a. Tremonha de fluxo axissimétrico; b. Tremonha de fluxo plano. Fonte: Jenike (1964).

O fator de fluxo também é um parâmetro de fluxo e descreve a condição de tensão na tremonha durante o fluxo. Fornece uma indicação de fluxo, que quanto menor o valor de ff , melhor o fluxo na tremonha. O fator de fluxo é dado pela equação 2.11.

$$ff = \frac{\sigma_1}{\sigma'_1} \quad (2.11)$$

Abordagem de Walker (1966)

Walker (1966) sugeriu as seguintes fórmulas para o fator fluxo da tremonha para fluxo axissimétricos, não podendo ser aplicado em tremonhas tipo cunha.

$$ff = \frac{1 \cdot \text{sen } \delta}{\Delta} \quad ; \quad \alpha + \varphi_w \geq 45^\circ \quad (2.12)$$

$$ff = \frac{1 \cdot \text{sen } \delta}{\Delta} \cdot \text{sen } 2(\alpha + \varphi_w) \quad ; \quad \alpha + \varphi_w < 45^\circ \quad (2.13)$$

$$\Delta = 2 \cdot \text{sen } \delta \cdot \text{sen } 2(\alpha + \beta) - \tan \alpha \cdot [1 - \text{sen } \delta \cdot \cos 2(\alpha + \beta)] \quad (2.14)$$

Onde:

ff = Fator fluxo da tremonha

φ_w = Ângulo de atrito com a parede

δ = Efetivo ângulo de atrito interno

α = Ângulo da tremonha

O ângulo β está descrito pela equação 2.6.

Abordagens de Enstad (1975), Arnold e McLean (1976)

Enstad (1975) também sugeriu formulações para determinações de ff para tremonhas tipo cunha, Arnold e McLean (1976) as adaptou para aplicação em tremonhas cônicas, gerando as seguintes fórmulas:

$$ff = \frac{Y \cdot (1 + \text{sen } \delta)}{2 \cdot (X - 1) \cdot F(\alpha) \cdot \text{sen } \alpha} \quad (2.15)$$

$$F(\alpha) = \left[\frac{65}{130 + \alpha} \right]^m \cdot \left[\frac{200}{200 + \alpha} \right]^{1-m} \quad (2.16)$$

$$X = \frac{2^m \cdot \text{sen } \delta}{1 - \text{sen } \delta} \cdot \left[\frac{\text{sen } (2\beta + \alpha)}{\text{sen } \alpha} + 1 \right] \quad (2.17)$$

$$Y = \frac{[2(1 - \cos(\beta + \alpha))]^m \cdot (\beta + \alpha)^{1-m} \cdot \text{sen } \alpha + \text{sen } \beta \cdot \text{sen}^{1+m}(\beta + \alpha)}{(1 - \text{sen } \delta) \cdot \text{sen}^{2+m}(\beta + \alpha)} \quad (2.18)$$

Onde:

$m = 0$: Para tremonhas de fluxo plano

$m = 1$: Para tremonhas de fluxo axissimétrico

Abordagens de Moore e Arnold (1985) e Roberts (2005)

Moore e Arnold (1985) desenvolveu uma apresentação gráfica para o método de Jenike (1964), para tremonhas cônicas e de tipo cunha. Roberts (2005) apresentou gráficos alternativos às de Moore, Figura 2.43, para uma faixa de valores de δ e φ_w . Os gráficos eliminam a necessidade de interpolações imprecisas e exibem os valores críticos de projeto próximos aos limites de fluxo de massa e fluxo de funil e simplificam consideravelmente a seleção do ângulo da tremonha, α , e o fator fluxo da tremonha, ff , correspondente.

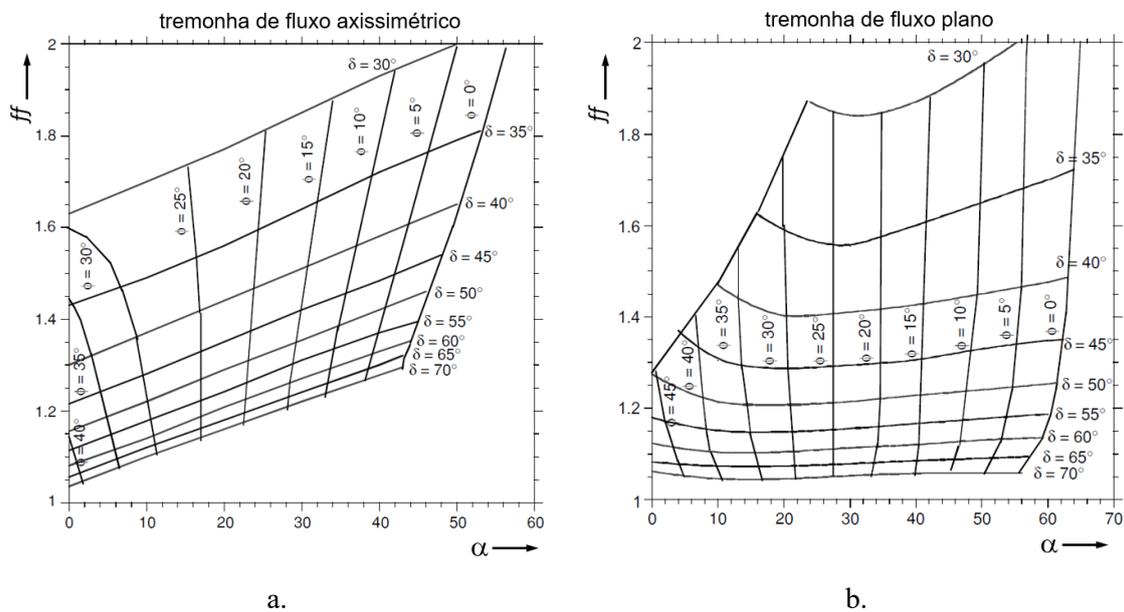


Figura 2.43 – Gráficos de fator fluxo da tremonha: a. Tremonha de fluxo axissimétrico; b. Tremonha de fluxo plano. Fonte: Roberts (2005).

Os ângulos de tremonha, α , para tremonha de fluxo axissimétrico ou de tipo cônica, apresentado na Figura 2.43a, já foram considerados 3° a menos dos valores limites na fronteira fluxo de massa/fluxo de funil. Esta é a prática de projeto recomendada para garantir que as soluções de projeto estejam dentro das zonas de fluxo de massa. Os ângulos de tremonha de fluxo plano ou tipo cunha, Figura 2.43b, são baseados nos limites recomendados por Jenike (ROBERTS, 2005).

A dimensão crítica, B_{cr} , na saída da tremonha é obtida na condição em que a tensão principal, σ'_1 , agindo no arco se iguala a resistência coesiva do produto, σ_c , Figura 2.41. Esta condição ocorre no ponto de interseção da função fluxo, FF , com o fator fluxo da tremonha, ff . Isto é chamado de critério de fluxo e não-fluxo (CALIL JR.; CHEUNG, 2007).

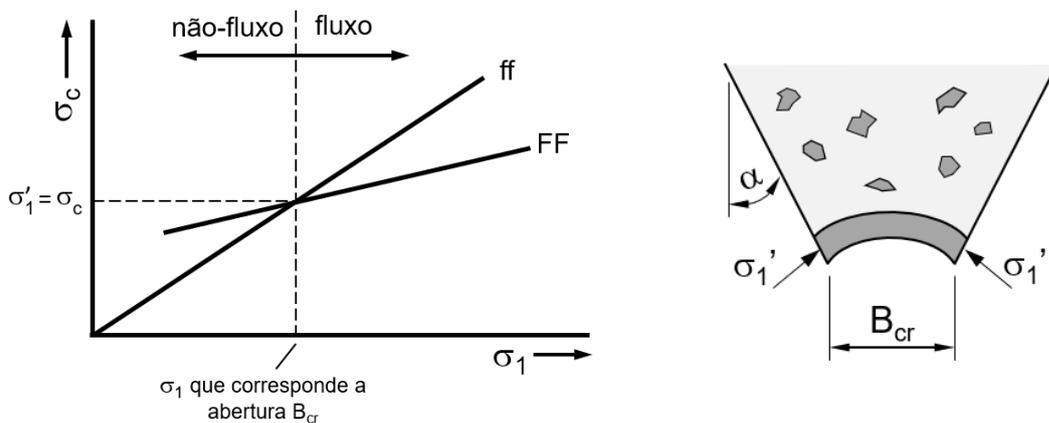


Figura 2.44 – Critério de fluxo e não-fluxo. Fonte: Adaptado de Calil Jr. e Cheung (2007).

Segundo Jenike (1964) o valor da mínima dimensão crítica de abertura, B_{cr} , para fluxo é dada pela equação 2.19.

$$B_{cr} = \frac{\sigma'_1 \cdot H(\alpha)}{\rho_b \cdot g} \quad (2.19)$$

Onde:

α = Ângulo da tremonha

σ'_1 = Tensão de arco

B_{cr} = Dimensão da abertura crítica de saída da tremonha

ρ_b = Densidade aparente

g = Aceleração da gravidade

O $H(\alpha)$, Figura 2.45 é o parâmetro referente a espessura do arco e seus valores foram computados para várias formas de saída por Jenike (1964).

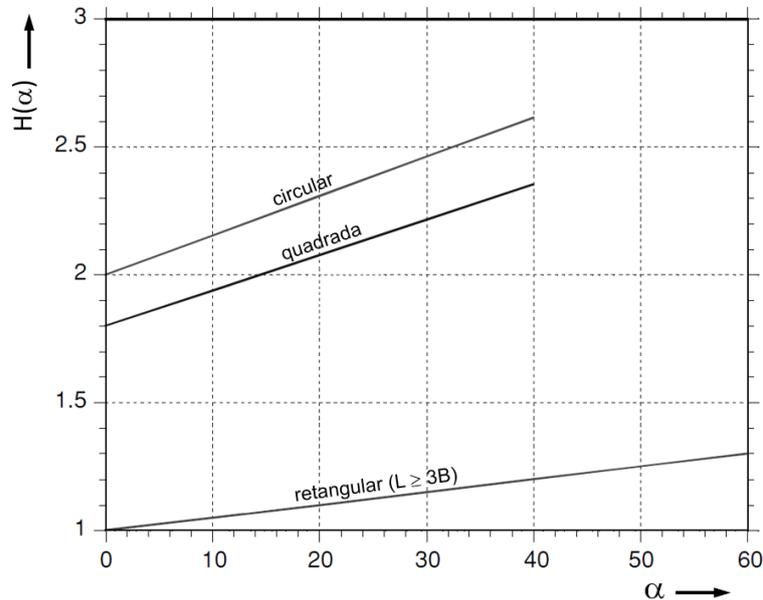


Figura 2.45 – Função $H(\alpha)$. Fonte: Jenike (1964).

Roberts (2005) sugere um acréscimo de 20% no valor de B_{cr} encontrado, enquanto Calil Jr. e Cheung (2007) sugerem o acréscimo de 25 a 30%, para garantir o fluxo do produto.

2.2.7 Projeto de tremonhas para minério de ferro

Segundo Mohajeri et al. (2020), o tipo de minério de ferro, teor de umidade, estado de consolidação são parâmetros importantes para o projeto de equipamentos de manuseio de minério de ferro coesivo, Figura 2.46, e que o comportamento do produto pode ser otimizado com melhorias na geometria dos equipamentos.

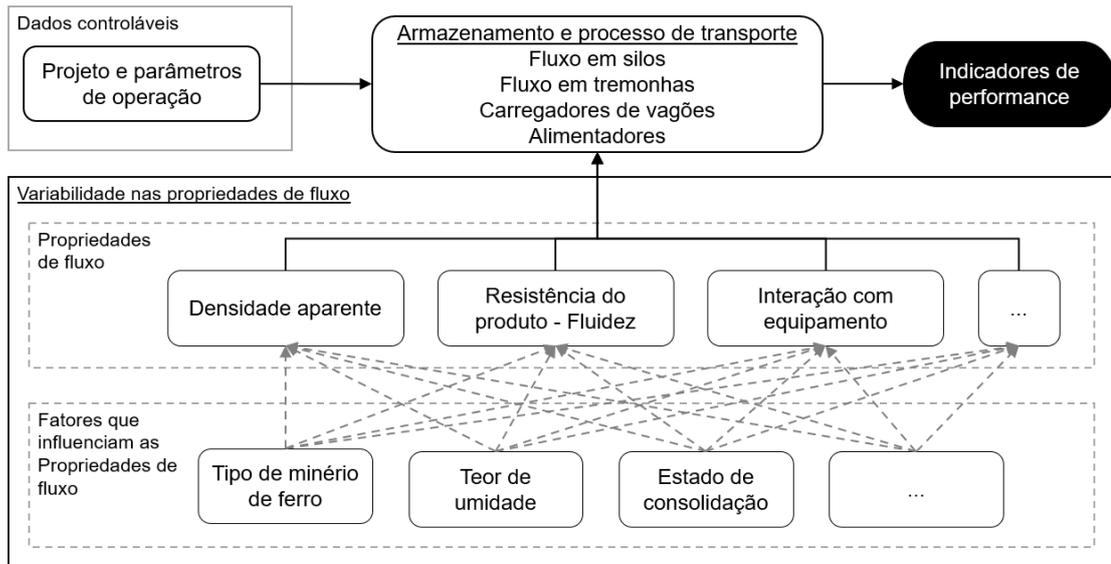


Figura 2.46 – Dados controláveis e não controláveis do processo de armazenamento e transporte de minério de ferro. Fonte: Adaptado de Mohajeri et al. (2020).

Gaylord Jr. e Gaylord (1984) e Roberts (2005) indicam a utilização de chanfros e arredondamentos de arestas e vales de tremonhas piramidais e tipo cunha, para produtos coesivos, de forma a otimizar o fluxo e prevenir a suspensão dos sólidos resultando em fluxo de funil, exemplo na Figura 2.47.

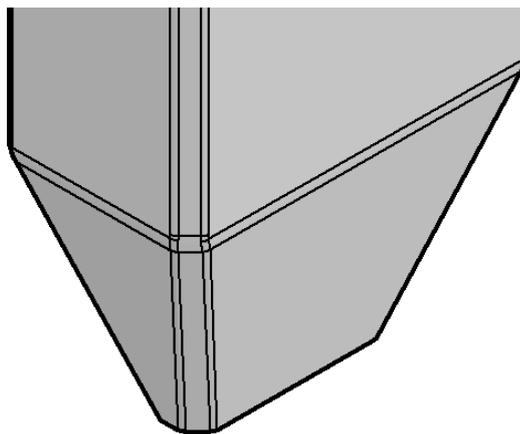


Figura 2.47 – Chanfros e arredondamentos de arestas e vales.

Schulze (2021) destaca a influência do tempo de armazenamento e da operação na dimensão crítica de saída da tremonha, B_{cr} . A Figura 2.48, mostra a diferença entre a curva da resistência coesiva do produto, σ_c , instantâneo ($t=0$) para o $\sigma_c(t_1)$, o que eleva o ponto crítico

onde $\sigma_c(t_1) = \sigma_1'$, requerendo uma dimensão maior de saída da tremonha.

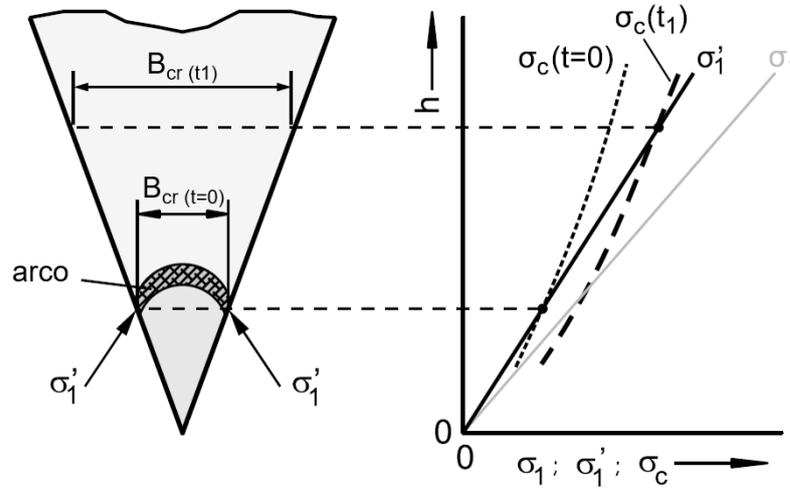


Figura 2.48 – Tremonha de fluxo de massa, tensão de consolidação, σ_1 , tensão principal atuante no arco, σ_1' , e resistência coesiva do produto, σ_c , em diferentes tempos de consolidação ($t=0$, t_1). Fonte: Adaptado de Schulze (2021).

Quando a dimensão de saída da tremonha é limitada, devido ao equipamento instalado sob ela, por exemplo, o modo de operação do sistema passa a ser um fator importante para este dimensionamento. Limitar o tempo de armazenamento do produto, t_R , para a dimensão, B , projetada. O produto não deve ser descarregado após cada tempo t_R , com o objetivo de movimentar o produto armazenado por meio da tremonha. Desta forma, a dimensão crítica, B_{cr} , nunca excede a dimensão de funcionamento, $B_{cr}(t_R)$, Figura 2.49.

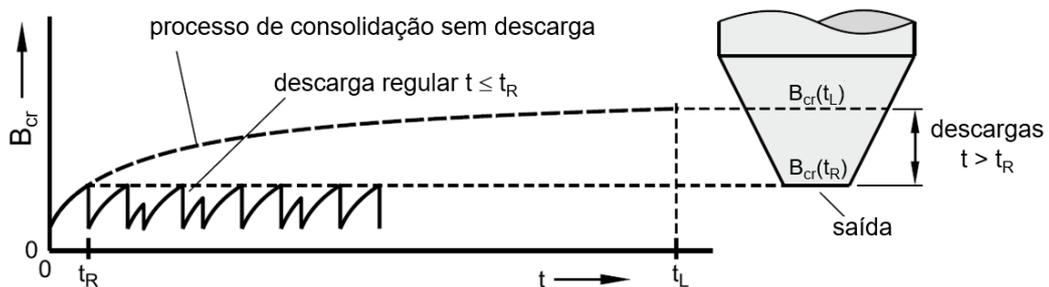


Figura 2.49 – Dimensão crítica, B_{cr} , vs. tempo para descargas em intervalos regulares do produto armazenado, $\Delta t \leq t_R$, comparado a dimensão crítica para um tempo de armazenamento superior, t_L .

Fonte: Adaptado de Schulze (2021).

Segundo Krull, T., et al. (2014) um ponto importante sobre as propriedades do minério de ferro é o desgaste por abrasão, ou desgaste por deslizamento, que ocorre quando um produto de partícula com superfície dura e áspera, como o minério de ferro, desliza sobre uma superfície mais macia, como o revestimento de desgaste. A abrasão ocorre em silos e tremonhas de armazenamento, particularmente quando as condições de fluxo de massa estão presentes e o deslizamento do produto a granel ocorre ao longo da tremonha e das paredes do silo. O projeto e escolha do material das paredes são fundamentais para otimização do fluxo e controle de desgaste.

2.3 Pressões em silos e tremonhas

As pressões são geradas devido a processos operacionais no silo, como carregamento, armazenamento e descarregamento. Para cada uma destas etapas, existe um comportamento diferente para o silo, sendo de vital importância separar cada etapa para se efetuarem análises estruturais (CALIL JR.; CHEUNG, 2007).

Muitos estudos e teorias foram desenvolvidos ao longo dos anos, com o objetivo de prever as tensões induzidas pelo produto a granel em silos. Referências reconhecidas, como Janssen (1895), Walker (1966), Walters (1973), Jenike et al. (1973), Roberts (2005), entre outros, contribuíram historicamente para os estudos de pressões laterais, desenvolvendo diversas metodologias para avaliação das distribuições de pressões. No entanto, o tema ainda não está livre de incertezas, pois os silos apresentam uma alta taxa de falhas. Segundo Stahlbau-Handbuch de 1985 apud Schulze (2021), que relata uma taxa de falha 1000 vezes maior do que outras estruturas. Mesmo que atualmente esse número possa ser menor, devido as normas desenvolvidas, falhas de silos ainda são comuns (SCHULZE, 2021).

O objetivo deste tópico não é decorrer sobre as normas atuais, mas sobre as teorias existentes que serviram de base para elaboração destas e apresentar estudos que contribuíram para este trabalho.

2.3.1 Campos de tensões atuantes em silos e tremonhas de fluxo de massa

Segundo Roberts (2005) os campos de tensões e pressões normais às paredes ocorrem em silos e tremonhas de fluxo de massa para a condição de enchimento, também conhecido como condição inicial, que gera o campo ativo de tensões e para a condição de fluxo, que gera o campo passivo de tensões, Figura 2.50. Quando o silo em vazio é carregado, o campo ativo de tensões acontece, Figura 2.50a, sendo vertical a maior tensão principal. Quando o fluxo ocorre, há uma convergência do campo de tensões, formando arcos na tremonha, limitado a altura de transição, Figura 2.50b. No campo passivo de tensões, a carga é transmitida para as paredes da tremonha, com a maior tensão principal sendo tangente ao arco formado. O comportamento da maior tensão principal nas condições de enchimento e de fluxo pode ser observado na Figura 2.50c.

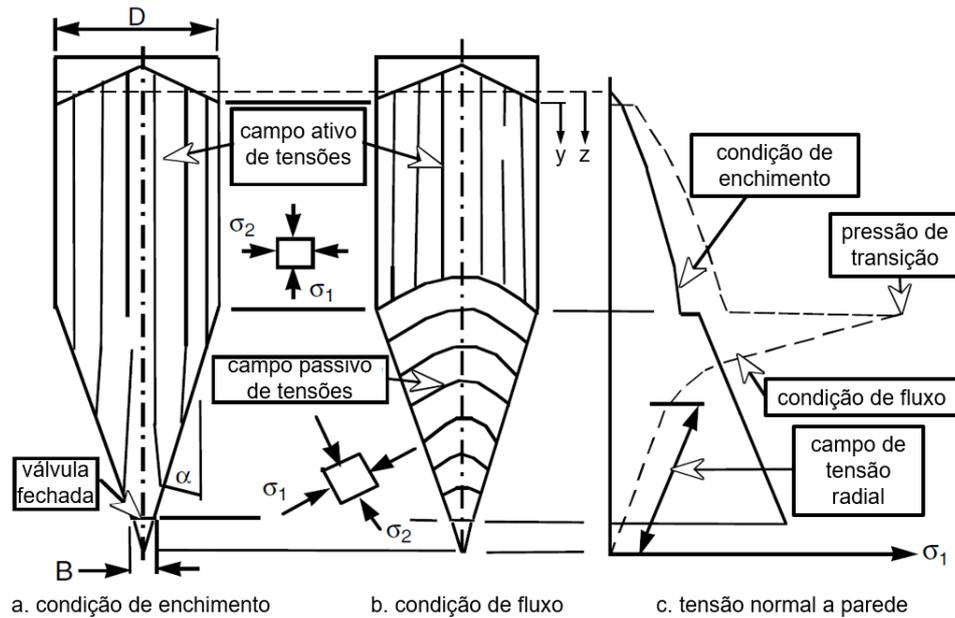


Figura 2.50 – Campos e tensões para condição de enchimento e de fluxo. Fonte: Roberts (2005).

2.3.2 Pressões no corpo do silo - Teoria de Janssen

Janssen, um dos primeiros pesquisadores responsáveis pela evolução da pesquisa sobre comportamento de pressões, partiu de um experimento com milho, Figura 2.52, concluindo, a partir de uma fatia elementar, de altura infinitesimal, dz , que as paredes verticais do silo carregam parte do peso do produto armazenado. Segundo Cheung (2007), esse modelo é válido somente para as condições de carregamento, pois é deduzida através do equilíbrio estático, Figura 2.51.

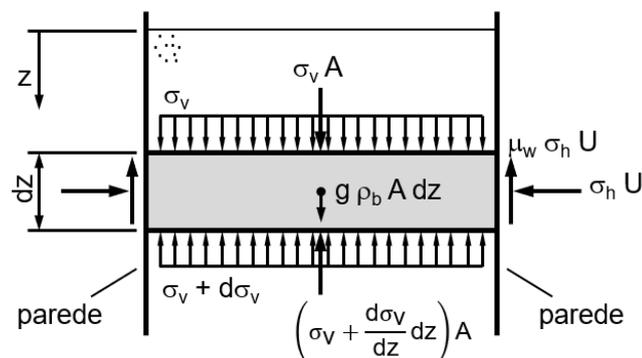


Figura 2.51 – Equilíbrio estático de uma fatiar elementar, proposto por Janssen (1895).

Partindo do equilíbrio apresentado na Figura 2.51, com suposições de tensão vertical e densidade aparente constantes, tem-se:

$$\sigma_v \cdot A + g \cdot \rho_b \cdot A \cdot dz = \left(\sigma_v + \frac{d\sigma_v}{dz} dz \right) \cdot A + \sigma_h \cdot U \cdot \mu_w \cdot dz \quad (2.20)$$

Admitindo-se a relação constante entre a tensão vertical, σ_v , com a tensão horizontal, σ_h , se adquire a constante K :

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (2.21)$$

E a relação da área, A , com o perímetro, U , é admitida como a constante R , denominada raio hidráulico:

$$R = \frac{A}{U} \quad (2.22)$$

A equação final, proposta por Janssen (1895) e reformulada por Ketchum (1911) é:

$$\sigma_v = \frac{g \cdot \rho_b \cdot R}{K \cdot \mu_w} \cdot \left(1 - e^{-\frac{K \cdot \mu_w \cdot z}{R}} \right) \quad (2.23)$$

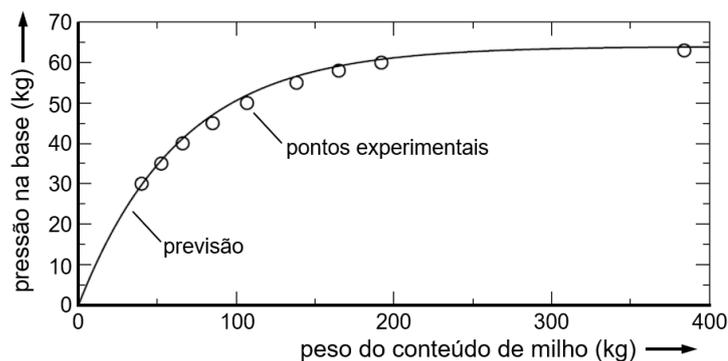


Figura 2.52 – Resultado de experimento com milho. Fonte: Janssen (1895).

Segundo Cheung (2007) essa teoria continua sendo utilizada até hoje pela maioria das normas internacionais de silos para cálculo de pressão estática ou inicial de carregamento em silos de seções cilíndricas e poligonais. Até mesmo para cálculo das pressões dinâmicas, isto é,

durante o fluxo, um dos métodos mais utilizados pelas mesmas é aplicar coeficientes aos valores obtidos para condição estática.

De forma geral, segundo Schulze (2021), quando aplicado um carregamento inicial, σ_{v0} , a equação 2.23 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\sigma_v = \frac{g \cdot \rho_b \cdot R}{K \cdot \mu_w} \cdot \left(1 - e^{\frac{-K \cdot \mu_w \cdot z}{R}}\right) + \sigma_{v0} \cdot e^{\frac{-K \cdot \mu_w \cdot z}{R}} \quad (2.24)$$

Aplicando a equação 2.21 em 2.24, tem-se:

$$\sigma_h = \frac{g \cdot \rho_b \cdot R}{\mu_w} \cdot \left(1 - e^{\frac{-K \cdot \mu_w \cdot z}{R}}\right) + \sigma_{h0} \cdot e^{\frac{-K \cdot \mu_w \cdot z}{R}} \quad (2.25)$$

Onde:

$$\sigma_{h0} = K \sigma_{v0} \quad (2.26)$$

2.3.2.1 Teoria de Janssen nas normas internacionais

Norma australiana - AS 3774-1996 – Condição de enchimento

A norma AS 3774-1996 apresenta σ_h como p_{ni} na seguinte expressão:

$$p_{ni} = \frac{\gamma r_c c_z}{\mu} \quad (2.27)$$

Onde:

$$c_z = 1 - e^{(-z/z_0)} \quad (2.28)$$

$$z_0 = \frac{r_c}{\mu k} \quad (2.29)$$

Então:

$$p_{ni} = \frac{\gamma r_c}{\mu} \cdot [1 - e^{-(\mu k z/r_c)}] \quad (2.30)$$

Onde, $\gamma = g \rho_b$

Aplicando um carregamento inicial, σ_{v0} , no nível em que a sobrecarga intercepta a parede e mudando a origem de z para y , Figura 2.50, tem-se:

$$p_{ni} = \frac{\gamma r_c}{\mu} \cdot [1 - e^{-(\mu k y/r_c)}] + p_{n0} \cdot e^{-(\mu k y/r_c)} \quad (2.31)$$

Se equivale a equação 2.25.

$$p_{qi} = \mu \cdot p_{ni} \quad (2.32)$$

Norma australiana - AS 3774-1996 – Condição de fluxo

A teoria de Janssen (1895) também é aplicada, pela norma, para a condição e fluxo, citada no item 2.3.1. Neste caso, um fator multiplicador, c_{nf} , sobre a pressão normal da condição de enchimento é aplicado:

$$p_{nf} = c_{nf} \cdot p_{ni} \quad (2.33)$$

A tensão de cisalhamento segue o mesmo padrão:

$$p_{qf} = c_{qf} \cdot p_{qi} \quad (2.34)$$

Norma europeia – Eurocode EN 1991-4.2006 – Condição de enchimento

A norma EN 1991-4.2006 apresenta σ_h como p_{hf} na seguinte expressão:

$$p_{hf}(z) = p_{h0} Y_j(z) \quad (2.35)$$

O desenvolvimento é similar ao apresentado para a norma australiana AS 3774-1996, concluindo com a seguinte equação:

$$p_{hf}(z) = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{A}{U} \cdot [1 - e^{-(\mu K z U/A)}] \quad (2.36)$$

Onde, $A/U = R$, referindo a característica geométrica do silo (raio característico), conforme equação 2.22.

Aplicando um carregamento inicial, σ_{v0} , no nível em que a sobrecarga intercepta a parede e mudando a origem de z para y , Figura 2.50, tem-se:

$$p_{hf}(z) = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{A}{U} \cdot [1 - e^{-(\mu K y U/A)}] + p_{hf0} \cdot e^{-(\mu k y U/A)} \quad (2.37)$$

Se equivale a equação 2.25.

$$p_{wf} = \mu \cdot p_{hf} \quad (2.38)$$

Norma europeia – Eurocode EN 1991-4.2006 – Condição de fluxo

Assim como na norma australiana, a Eurocode EN 1991-4.2006 também aplica um fator multiplicador, c_h , sobre a pressão normal da condição de enchimento para o resultado da pressão normal da condição de fluxo:

$$p_{he} = c_h \cdot p_{hf} \quad (2.39)$$

$$p_{we} = c_w \cdot p_{wf} \quad (2.40)$$

2.3.3 Pressões em tremonha

A principais teorias existentes de pressões em tremonhas são baseadas no equilíbrio de uma fatia elementar, similar a proposta apresentada por Janssen (1895), submetida a um carregamento inicial na parte superior, Figura 2.53.

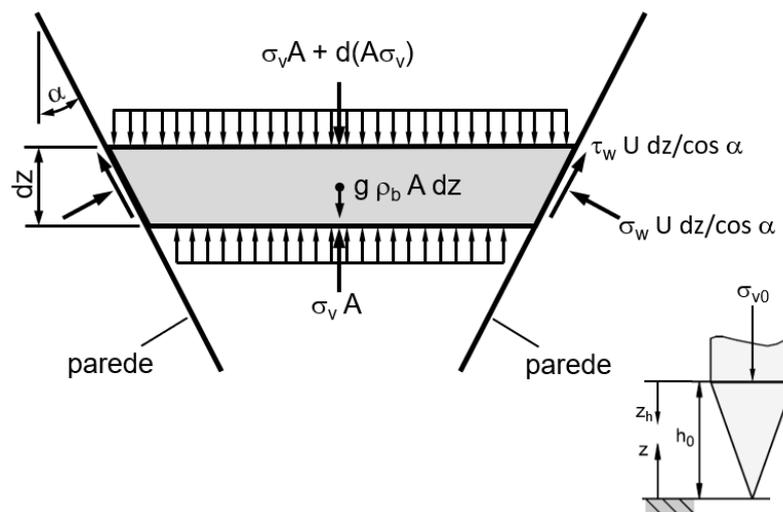


Figura 2.53 – Equilíbrio de uma fatia elementar em tremonha. Fonte: Adaptado de Walker (1966).

Partindo do equilíbrio apresentado na Figura 2.53, tem-se:

$$d(A \sigma_v) + g \rho_b A dz = \frac{dz}{\cos \alpha} (\sigma_w U \operatorname{sen}(\alpha) + \tau_w U \operatorname{cos}(\alpha)) \quad (2.41)$$

Da equação 2.2:

$$\tau_w = \sigma_w \cdot \tan \varphi_w \quad (2.42)$$

Admitindo-se a relação constante entre a tensão vertical, σ_{vhi} , com a tensão normal na parede, σ_{whi} , a constante K pode ser escrita como:

$$K_h = \frac{\sigma_{whi}}{\sigma_{vhi}} \quad (2.43)$$

Condição de contorno:

$$\sigma_v(z = h_0) = \sigma_{v0} \quad (2.44)$$

Adequando a equação 2.41, utilizando as equações 2.42 e 2.43 e aplicando a condição de contorno da equação 2.44, obtém-se a seguinte equação:

$$\sigma_v = \frac{g \rho_b z}{j-1} + \left(\sigma_{v0} - \frac{g \rho_b h_0}{j-1} \right) \cdot \left(\frac{z}{h_0} \right)^j \quad (2.45)$$

Onde:

$$j = (m + 1) \cdot \left[K_h \left(1 + \frac{\tan \varphi_w}{\tan \alpha} \right) - 1 \right] \quad (2.46)$$

m = 0: Para tremonhas retangulares

m = 1: Para tremonhas axissimétricas

A Figura 2.54 apresenta a forte influência da variação do parâmetro j na tensão vertical na tremonha.

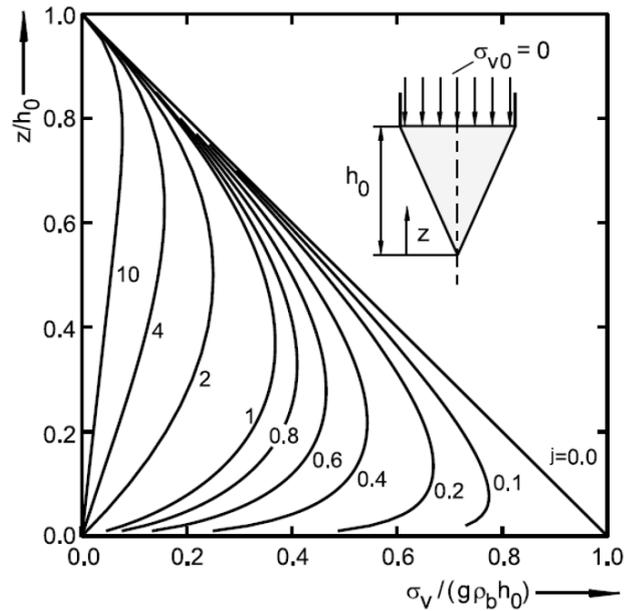


Figura 2.54 – Tensão vertical adimensional na tremonha. Fonte: McLean (1985).

Esta equação é a base para a teoria proposta por Walker (1966) e posteriormente trabalhadas por Walters (1973), Jenike et al. (1973) e McLean (1985).

2.3.3.1 Teoria de Walker

Segundo Araújo (1997) a teoria de Walker (1966) é bastante precisa para os cálculos das condições de enchimento e de fluxo nas paredes da tremonha e no corpo do silo. Na condição de fluxo, essa teoria baseia-se nas seguintes hipóteses:

1. As direções das tensões principais, maior e menor, estão no plano vertical próximo à seção da parede, e estas definem o escorregamento do produto, independentemente da terceira tensão principal, perpendicular ao plano;
2. O produto deve escoar e ser capaz de deslocar, independentemente das variações transversais da tremonha;
3. O produto é de fluxo livre e, para fins de projeto, o silo é dimensionado para fluxo de massa;
4. Supõe-se que as pressões verticais sobre o mesmo plano horizontal são constantes.

2.3.3.2 Teoria de Walters

O estudo de Walker (1966) é aprofundado por Walters (1973), para silos com fluxo de massa. Esta teoria depende da determinação do ângulo de atrito com a parede e do efetivo ângulo de atrito interno para seus equacionamentos, simplificando sua aplicação.

Porém, esta teoria não pode ser aplicada na maioria dos casos práticos, pois se restringe apenas a pequenas inclinações de tremonhas (CALIL JR.; CHEUNG, 2007).

2.3.3.3 Teoria de Jenike

Segundo Palma (2005), as pesquisas desenvolvidas por Jenike et al. (1973) formam a base de teoria de armazenamento e fluxo dos produtos armazenados e explica o campo de tensões no produto por meio da definição de três estados para fluxo de massa:

- **Condição inicial (Condição de enchimento):** Esta condição também pode ser chamada como estado ativo de tensões. Durante o enchimento do silo vazio, o produto contrai verticalmente, com a maior tensão principal, σ_1 , na vertical. A pressão inicial é representada por Janssen no corpo do silo e por uma distribuição linear na tremonha, Figura 2.56a;
- **Condição de transição:** Instantes após a abertura da boca de descarga, ocorre a passagem do estado ativo para o estado passivo de tensões. Esta mudança ocorre acima da abertura de saída do produto e se propaga para cima em direção a sua superfície livre. A fração de segundos em que o estado ativo e o passivo de tensões coexistem é denominada mudança, ou condição de transição. Um pico de pressão ocorre nas paredes da tremonha no local da mudança. Este pico se desloca para cima, do nível inferior da tremonha até o nível de intercessão com o corpo do silo, Figura 2.56b.
- **Condição de fluxo:** Quando a comporta, abaixo da tremonha, está aberta, o produto está fluindo pela abertura de saída, neste momento há uma expansão vertical do produto, formando uma condição de fluxo. A direção da menor tensão principal, σ_2 , tende a alinhar com a direção da expansão do produto e a direção da maior tensão principal tende a tangenciar com os arcos do campo formado pela expansão, estado passivo de tensões, Figura 2.56c.

Roberts et al. (2021) realizou um experimento apresentando a importante influência da

transição do estado ativo para o estado passivo de tensões em tremonha, controlando a carga na comporta de descarga abaixo da tremonha. O gráfico, Figura 2.55, destaca a variação da carga na comporta como uma razão da carga total do sistema a partir do início da operação de enchimento. Nos primeiros 8 segundos, a comporta suporta 100% do minério de ferro manuseado, sem suporte das paredes da tremonha. Neste momento o campo de tensões é considerado “ativo”. Durante os próximos 4 segundos, à medida que a transferência de carga para as paredes da tremonha começa, a carga na comporta diminui rapidamente para 30%. Isso se deve a transição para o estado de tensão “passivo”. Então, para o restante da operação de enchimento, à medida que o completo estado de tensão passivo se desenvolve, a carga na comporta reduz mais, aproximando-se do valor de 5% da carga total do silo.

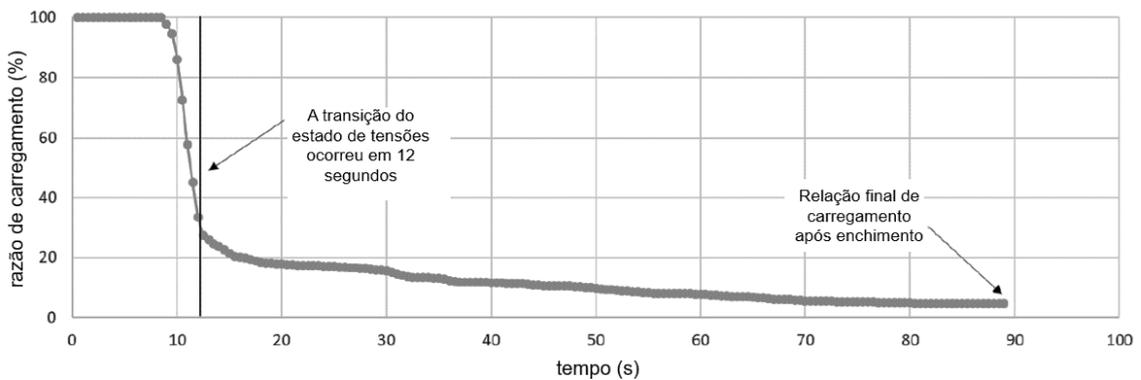


Figura 2.55 – Razão de carregamento na tremonha e comporta durante enchimento. Fonte: Roberts et al. (2021).

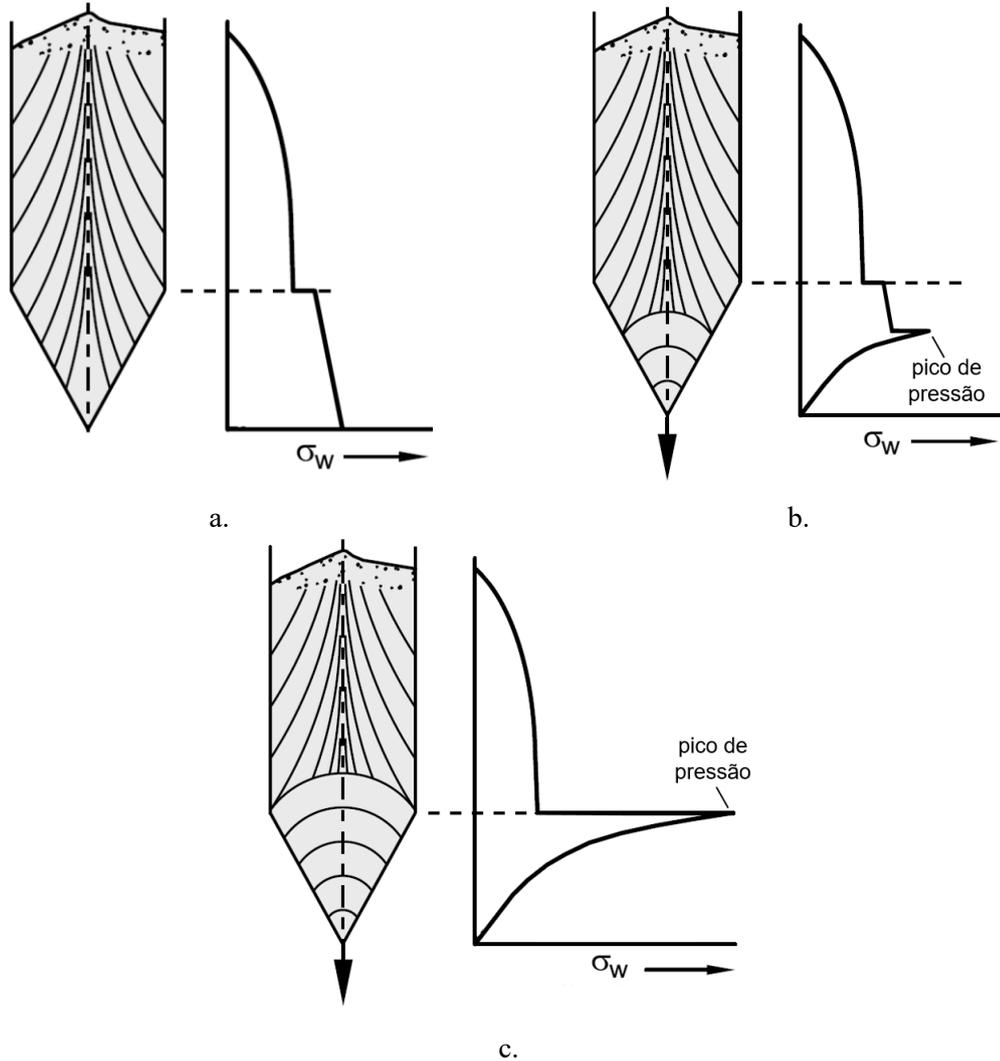


Figura 2.56 – Estado de tensões para fluxo de massa: a. Condição de enchimento; b. Condição de transição; c. Condição de fluxo. Fonte: Adaptado de Jenike et al. (1973).

Condição de enchimento

Para a condição de enchimento, o mínimo valor de K_h é utilizado, neste momento será chamado de K_{hi} . A partir da equação 2.45, com $j = 0$, tem-se:

$$\sigma_{vhi} = \sigma_{v0} + \gamma z_h \quad (2.47)$$

A pressão normal, σ_{nhi} , é:

$$\sigma_{nhi} = K_{hi} \cdot \sigma_{vhi} = K_{hi} (\sigma_{v0} + \gamma z_h) \quad (2.48)$$

Da equação 2.46 com $j = 0$:

$$K_{hi} = \frac{\tan \alpha}{\tan \varphi_w + \tan \alpha} \quad (2.49)$$

$$\tau_{whi} = \mu_w \cdot \sigma_{nhi} \quad (2.50)$$

Condição de fluxo

A equação 2.45 e 2.46 são aplicáveis. Alterando os índices para identificação, tem-se:

$$\sigma_{vhf} = \frac{g \rho_b z}{j-1} + \left(\sigma_{v0} - \frac{g \rho_b h_0}{j-1} \right) \cdot \left(\frac{z}{h_0} \right)^j \quad (2.51)$$

$$\sigma_{nhf} = K_{hf} \cdot \sigma_{vhf} \quad (2.52)$$

$$j = (m+1) \cdot \left[K_{hf} \left(1 + \frac{\tan \varphi_w}{\tan \alpha} \right) - 1 \right] \quad (2.53)$$

$$\tau_{whf} = \mu_w \cdot \sigma_{nhf} \quad (2.54)$$

Conforme apresentado por Guo et al. (2017), existem diferentes equacionamentos para K_{hf} . As formulações apresentadas neste trabalho se limitaram as equações normativas.

2.3.3.4 Pressões em tremonha pelas normas internacionais

Norma australiana - AS 3774-1996 – Condição de enchimento

A norma AS 3774-1996 apresenta σ_{nhi} como p_{nhi} e σ_{v0} como p_{vit} na seguinte expressão:

$$p_{nhi} = k_h (\gamma z_h + p_{vit}) \quad (2.55)$$

$$k_h = \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha + \mu_h} \quad (2.56)$$

As equações acima são equivalentes as apresentadas em 2.48 e 2.49.

$$\mu_h = \tan \varphi_w \quad (2.57)$$

$$p_{qi} = \mu \cdot p_{nhi} \quad (2.58)$$

Norma australiana - AS 3774-1996 – Condição de fluxo

A norma AS 3774-1996 apresenta σ_{nhf} como p_{nhf} na seguinte expressão:

$$p_{nhf} = k_{hf} \cdot p_{vhf} \quad (2.59)$$

E σ_{vhf} como p_{vhf} para qualquer valor de z_h abaixo da transição, Figura 2.53.

$$p_{vhf} = \frac{\gamma (h_h - z_h)}{j - 1} + \left(p_{vit} - \frac{\gamma h_h}{j - 1} \right) \cdot \left[\frac{(h_h - z_h)}{h_h} \right]^j \quad (2.60)$$

Onde:

h_h refere-se ao h_0 da Figura 2.53.

z_h : Profundidade abaixo da transição do corpo do silo para a tremonha

As equações acima são equivalentes as apresentadas em 2.52 e 2.51, respectivamente.

A equação 2.61 representa o k_{hf} dada pela norma australiana, sendo as tensões atuantes na tremonha durante fluxo representadas pelo círculo de Mohr da Figura 2.57.

$$k_{hf} = \frac{1 + \text{sen } \delta \cdot \cos (2\eta)}{1 - \text{sen } \delta \cdot \cos [2(\alpha + \eta)]} \quad (2.61)$$

Para tensão de cisalhamento, tem-se:

$$p_{tf} = \mu_h \cdot p_{nf} \quad (2.67)$$

Norma europeia – Eurocode EN 1991-4.2006 – Condição de fluxo

A norma EN 1991-4.2006 apresenta σ_{nhf} como p_{ne} na seguinte expressão:

$$p_{ne} = F_e \cdot p_v \quad (2.68)$$

E σ_{vhf} como p_v para qualquer valor de z apresentado na Figura 2.53.

$$p_v = \frac{\gamma (h_h)}{j - 1} \left[\left(\frac{z}{h_h} \right) - \left(\frac{z}{h_h} \right)^j \right] + p_{vit} \left(\frac{z}{h_h} \right)^j \quad (2.69)$$

$$F_e = \frac{1 + \text{sen } \delta \cdot \cos (\eta)}{1 - \text{sen } \delta \cdot \cos (2\alpha + \eta)} \quad (2.70)$$

Obs.: Esta norma expressa o k_{hf} por F_e .

$$\eta = \varphi_w + \arcsen \left(\frac{\text{sen } \varphi_w}{\text{sen } \delta} \right) \quad (2.71)$$

E j é obtido pela seguinte equação:

$$j = S(F_f \cdot \mu_h \cdot \cot \alpha + F_f - 2) \quad (2.72)$$

$$p_{te} = \mu_h \cdot p_{ne} \quad (2.73)$$

2.3.4 Comparativo: Campos de tensões radiais e o método de fatia elementar

No item 2.2 foi apresentado o dimensionamento de aberturas críticas da tremonha para impedir a criação de arcos coesivos a partir dos campos de tensões radiais (método de arcos), criados na região inferior da tremonha. Percebe-se que neste método, o carregamento vertical inicial é desprezado. Entretanto, para análises de pressões nas paredes da tremonha, item 2.3, onde se utiliza o modelo de fatia elementar horizontal, este carregamento vertical inicial que atua na tremonha é empregado, Figura 2.58.

Roberts (2010) fez um estudo, relatando que as duas abordagens citadas são válidas, mas existem diferenças entre os métodos, incluído a importância da influência do carregamento vertical inicial em tremonhas para fluxo de massa.

O estudo parte do enchimento inicial de um silo com carvão, que posteriormente é descarregado de forma a manter o nível do produto abaixo da transição tremonha/corpo do silo. Desta forma, presume-se que existe um estado passivo de tensões na tremonha, mesmo com a válvula de descarga fechada. Nesta condição inicia-se o enchimento novamente. A partir deste ponto, as considerações foram relatadas.

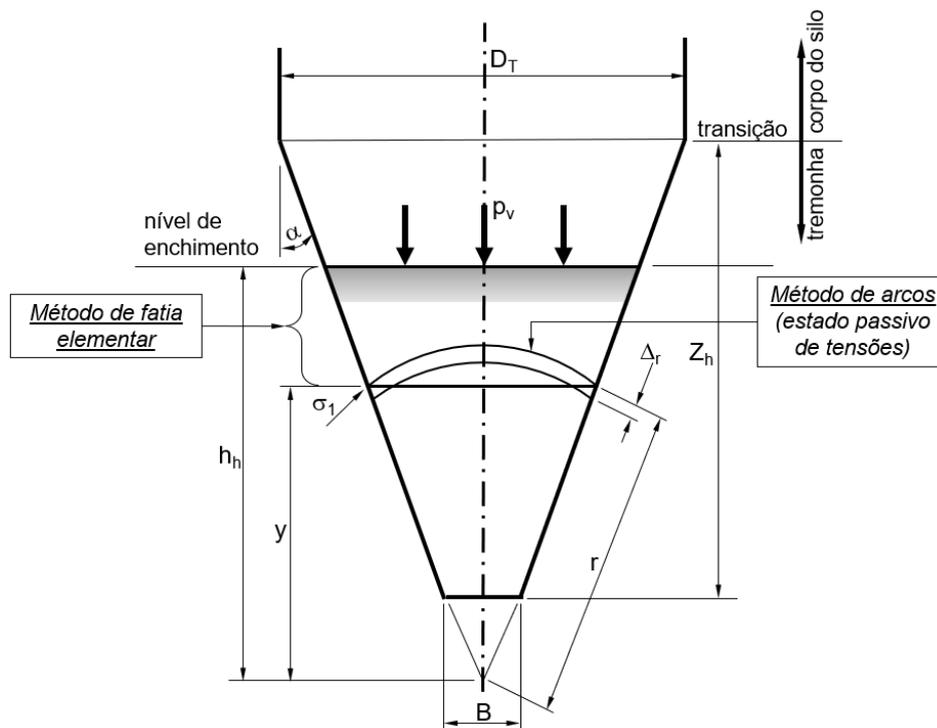


Figura 2.58 – Representação geométrica e de métodos para tremonha de fluxo de massa. Fonte:

Adaptado de Roberts (2010).

Conhecido todos os parâmetros, Roberts (2010) faz uma comparação entre as metodologias, que apresenta um resultado idêntico para as regiões mais inferiores da tremonha, o que atende as teorias de Jenike (1961, 1964). Portanto, para regiões superiores, trata-se de distribuições de tensões não-lineares, indicando que a tensão de consolidação não é mais proporcional à distância radial, r , Figura 2.59.

Em resumo, a profundidade da tremonha, projetada para fluxo de massa, deve ser de tal maneira que permita a formação do campo radial de tensões. Desta forma, há uma redução das tensões na abertura de saída, minimizando a dimensão de abertura necessária. Recomenda-se uma razão de profundidade e largura de transição: $Z_h/D_T \geq 0,6$ (ROBERTS, 2010).

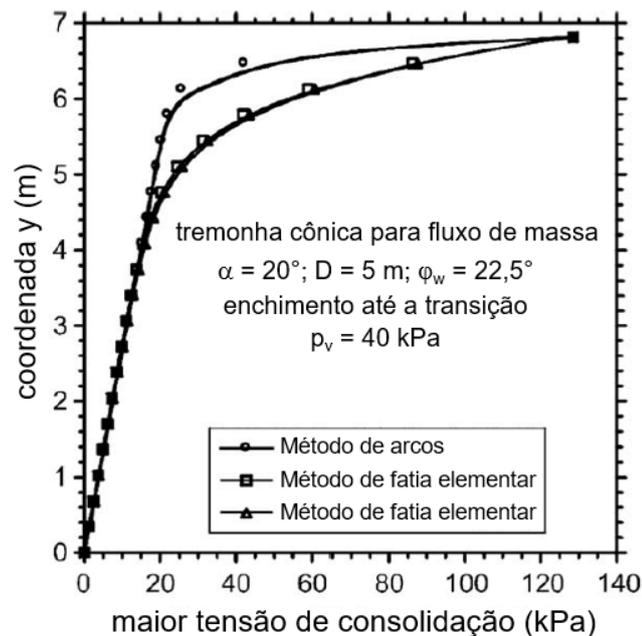


Figura 2.59 – Tensões de consolidação para os métodos de arco e de fatia elementar. Fonte: Roberts (2010).

2.3.5 Considerações extras e aplicações na mineração

O controle volumétrico ou de massa do minério de ferro no descarregamento em um sistema de carregador de vagões é de extrema importância. Este controle garante que o volume máximo do vagão não seja ultrapassado, ou que a carga máxima admitida pelos truques dos vagões seja respeitada.

Válvulas, comportas, desviadores de fluxo, células de carga são responsáveis por direcionar,

bloquear e medir o fluxo de produto durante a operação e manutenção. Devido a função de cada componente e sua posição no processo, este pode estar localizado entre tremonhas, interferindo no comportamento de fluxo e pressões, como demonstrado na Figura 2.60.

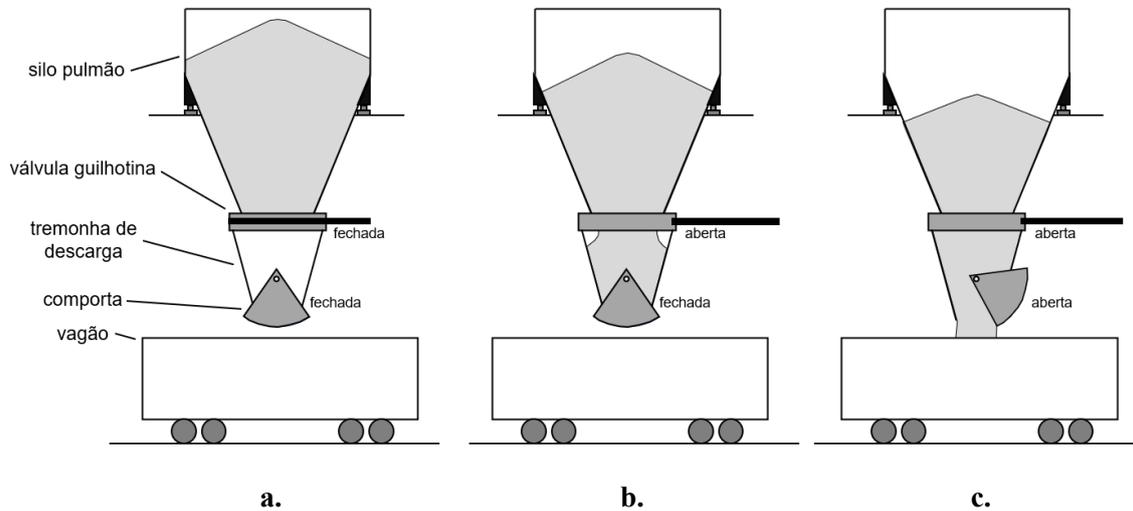


Figura 2.60 – Esquema de um carregador de vagões.

A configuração tremonha sobre tremonha não é abordado pelas normas atuais. Calil Jr. (1982) comprovou que um comportamento de tremonha sobre tremonha tem um efeito benéfico no fluxo de produtos, Figura 2.61.

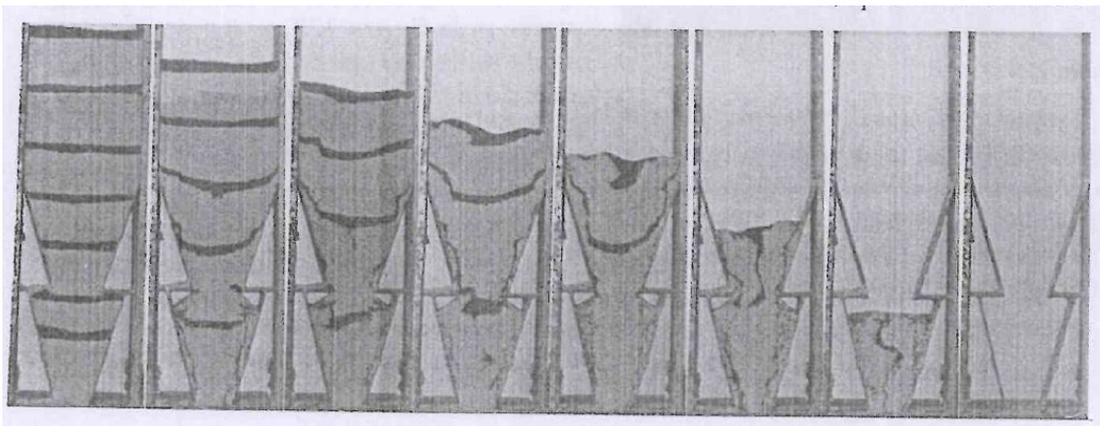


Figura 2.61 – Comportamento em modelo reduzido do fluxo de tremonha sobre tremonha. Fonte: Calil Jr. (1982).

Nos casos em que há mudança do revestimento ou inclinação da tremonha ao longo da altura, destaca-se a solução apresentada por Roberts (2022) para utilização do carregamento vertical

inicial, p_s , Figura 2.62.

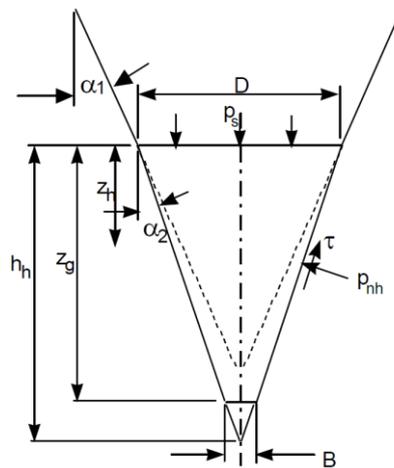


Figura 2.62 – Mudança de inclinação e/ou revestimento da tremonha. Fonte: Roberts (2022).

- Para condição de pressão inicial: $p_s = p_{vhi}$
- Para condição de fluxo: $p_s = p_{vhf}$

Segundo Schulze (2021), para o cálculo das pressões em um silo com diferentes configurações, conforme a Figura 2.63, cada seção deve ser avaliada como uma parte individual (seção vertical, tremonha etc.), sendo consideradas uma após a outro, com o cálculo começando na superfície superior e continuando para parte inferior.

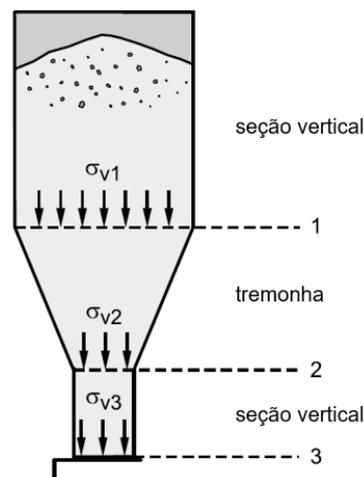


Figura 2.63 – Silo subdividido em seções. Fonte: Schulze (2021).

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais e recursos

3.1.1 Materiais

As amostras de minério de ferro utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho seguem as características apresentadas na Tabela III.1.

Tabela III.1 – Características das amostras de minério de ferro.

Tipo de produto	Designação	Densidade da partícula - kg/m ³	Teor de umidade - %				
Minério de ferro	IO-A	5246	0,99%	3,9%	6,9%	8,9%	11%
	IO-B	4581	11%	13%	15%		
	IO-C	3711	10%	11%	12%		

Os materiais de revestimento testados estão descritos na Tabela III.2, para suas respectivas amostras.

Tabela III.2 – Materiais de desgaste.

Tipo de produto	Designação	Material de revestimento	
Minério de ferro	IO-A	UHMW	HARDOX 600
	IO-B	HARDOX 500	CDP 4666
	IO-C	HARDOX 500	CDP 4666

Distribuição granulométrica

A amostra IO-A teve sua distribuição granulométrica determinada pelo método de difração laser. Os tamanhos de D10, D50 e D90 calculados são apresentados na Tabela III.3.

Tabela III.3 – Distribuição granulométrica do IO-A.

Amostra	Pressão de dispersão de 0,5 bar			Pressão de dispersão de 3 bar		
	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)
IO-A	25	62	134	22	56	119

As distribuições granulométricas para as amostras IO-B e IO-C foram determinadas utilizando o método de peneiramento a seco (vibração de peneiras, 5 minutos no tempo total). A Figura 3.1 apresenta a distribuição granulométrica de cada amostra.

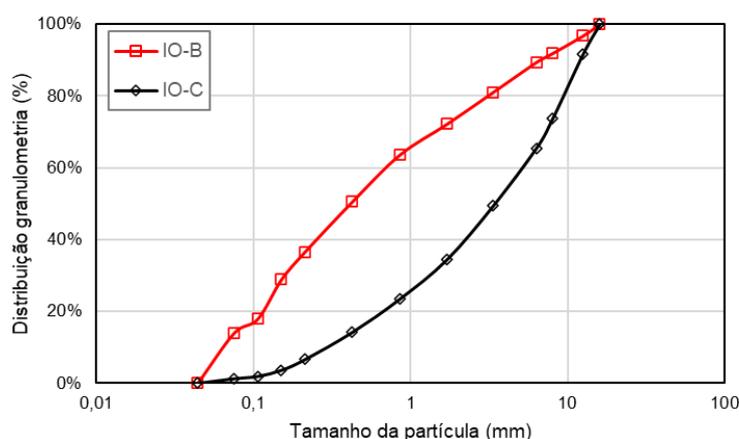


Figura 3.1 – Distribuição granulométrica.

Ângulos de repouso

Os ângulos de repouso para as amostras IO-B e IO-C estão na Tabela III.4.

Tabela III.4 – Ângulos de repouso.

Amostra	Ângulo de repouso (variação)
IO-B	35° - 53°
IO-C	30° - 36°

Teste de desgaste por abrasão

As amostras de minério de ferro IO-B e IO-C foram testadas para dois materiais de revestimento da parede: HARDOX 500 e CDP 4666. Os testes foram realizados à pressão

normal de 172 kPa. A medição do ângulo de atrito com a parede para ambos os materiais foi realizada antes e depois dos testes de desgaste.

A Tabela III.5 fornece um resumo dos resultados dos testes realizados. As taxas de desgaste são apresentadas como unidades adimensionais (mm de desgaste/mm de deslocamento do produto na superfície do material de teste).

Tabela III.5 – Resumo das taxas de desgaste dos materiais de revestimento.

Amostra	Material de revestimento	Pressão normal (kPa)	Taxa de desgaste	Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w)	
				Antes do teste de desgaste	Depois do teste de desgaste
IO-B	HARDOX 500	172	$6,7 \times 10^{-8}$	29° a 32°	19° a 21°
	CDP 4666	172	$7,3 \times 10^{-9}$	35° a 38°	15° a 16°
IO-C	HARDOX 500	172	$1,3 \times 10^{-8}$	36° a 39°	27° a 29°
	CDP 4666	172	$4,8 \times 10^{-9}$	36° a 43°	25° a 32°

Análise mineralógica

O resultado da análise mineralógica está apresentado na Tabela III.6.

Tabela III.6 – Análise mineralógica.

Amostra	Goethita FeO(OH)	Hematita Fe ₂ O ₃
IO-B	18%	82%
IO-C	61%	39%

Identificação das propriedades de fluxo trabalhadas nesta pesquisa

As indicações dos dados de entrada e saída para análises das propriedades de fluxo estão representadas na Tabela III.7.

Tabela III.7 – Informações sobre as tratativas das propriedades de fluxo.

Descrição	Entrada	Saída
Análise de tamanho de partículas	X	
Resistência coesiva (σ_c) e função fluxo (FF)	X	
Densidade aparente (ρ_b)	X	
Ângulo de atrito com a parede (σ_w)	X	
Efetivo ângulo de atrito interno (δ)	X	
Comparativo entre amostras por teor de umidade		X
Comparativo entre amostras por material de revestimento		X
Comparativo entre tempos de consolidação		X
Índice de fluxo		X
"Yield locus" comparativo		X
Taxa de desgaste por material de desgaste (para amostras IO-B e IO-C)	X	
Análise mineralógica	X	
Ângulo de repouso (φ_r)	X	

3.1.2 Recursos

Os recursos disponíveis para desenvolvimento do trabalho são:

- AutoCAD Mechanical: Autodesk, 2022.
- Microsoft 365 Business Standard: Microsoft Corporation, 2022.

3.1.3 Projeto exemplo

Como parte do desenvolvimento do projeto de fluxo e pressões, o arranjo da Figura 3.2 será utilizado como referência de sistema de carregador de vagões. Este será validado e verificado de acordo com a metodologia adotada neste trabalho.

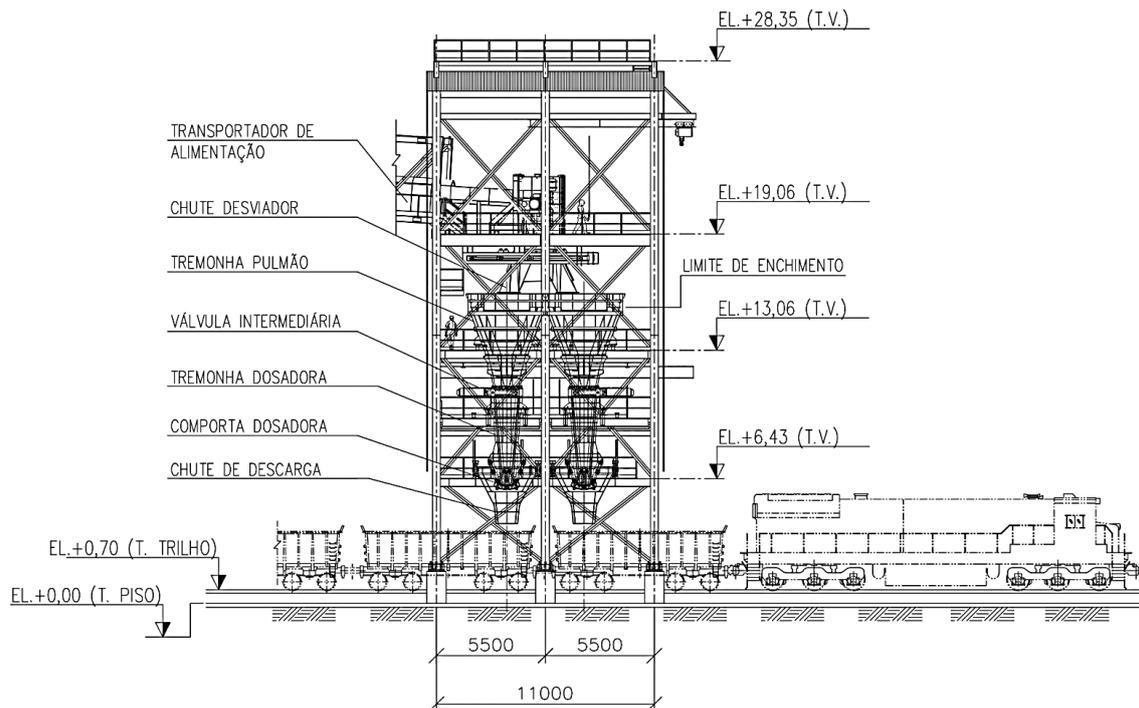


Figura 3.2 – Arranjo de um carregador de vagões.

O arranjo da Figura 3.2 é composto por um transportador de correia, responsável por alimentar o sistema. Na sequência um chute desviador é capaz de alimentar um lado do sistema por vez. A tremonha pulmão é responsável por cobrir algumas ineficiências da recuperação do produto no pátio de estocagem, mantendo a vazão de saída regular e previsível. As dimensões principais da tremonha pulmão estão apresentadas na Figura 3.3.

A tremonha dosadora, cuja dimensões estão na Figura 3.4, é responsável por armazenar a massa necessária no descarregamento, quando o controle de massa é exigido. Neste caso, a válvula intermediária corta o fluxo de produto e impossibilita a passagem de massa do minério de ferro acima do valor estabelecido, impedindo a interação do armazenamento entre as tremonhas durante o enchimento, este processo é conhecido como sistema gravimétrico.

Quando não há exigência do controle de massa, a válvula intermediária perde a função descrita e o produto armazenado preenche o volume total disponível no sistema, este é o

sistema volumétrico.

As duas formas de operação descritas foram avaliadas para o projeto de pressões.

A comporta dosadora controla os períodos de descarregamentos, assim como os tempos passagem da locomotiva e entre vagões.

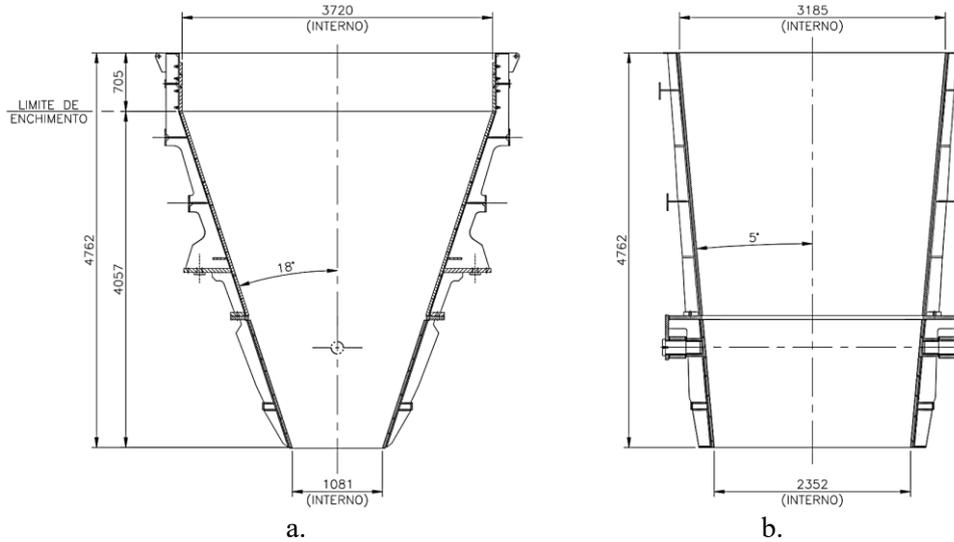


Figura 3.3 – Principais dimensões da tremonha pulmão: a. Vista frontal em seção; b. Vista lateral em seção.

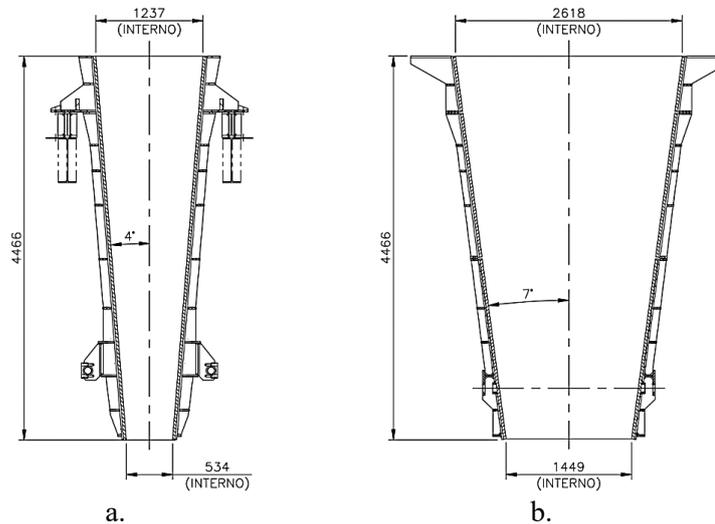


Figura 3.4 – Principais dimensões da tremonha dosadora: a. Vista frontal em seção; b. Vista lateral em seção.

3.2 Métodos

O procedimento metodológico passa pela definição das teorias e formulações, apresentadas na revisão bibliográfica, a serem implementadas no modelo numérico (ferramenta de trabalho), para tremonhas de fluxo de massa.

A ferramenta de trabalho será dividida em 3 etapas:

1. Análise do produto;
2. Projeto de tremonha para fluxo de massa;
3. Determinação de pressões nas paredes da tremonha.

3.2.1 Análise do produto

Esta etapa consiste em organizar, preparar e agrupar as entradas de dados sobre as propriedades de fluxo dos produtos na ferramenta de trabalho. Estas propriedades são necessárias para o projeto de fluxo e pressões e são disponibilizadas por testes como os descritos na revisão bibliográfica.

As informações dos produtos apresentados no item 3.1 serão utilizadas como dados de calibração e validação da ferramenta de trabalho.

3.2.2 Projeto de tremonha para fluxo de massa

Com o conhecimento das propriedades de fluxo do minério de ferro, é possível definir os parâmetros necessários para a execução de um correto projeto de tremonha.

O tipo de fluxo a ser abordado neste trabalho é o fluxo de massa, devido a busca por esta aplicação na indústria do minério de ferro e de produtos coesivos. O item 2.2.3 apresenta a vantagem e desvantagem de cada tipo de fluxo e Jenike (1964) destaca a importância da busca por este tipo de fluxo nos processos de descarregamento de silos e tremonhas.

As teorias e formulações a serem utilizadas nesta etapa são abordadas por:

- Jenike (1964)
- Roberts (2005)

A tabela Tabela III.8 identifica as metodologias utilizadas para determinação dos parâmetros necessários para o projeto de tremonhas para fluxo de massa.

Tabela III.8 – Metodologias para projeto de tremonha para fluxo de massa.

Descrição	Metodologia
Tensão de consolidação (σ_l) para dimensões críticas	Parametrização e iterações
Propriedades de fluxo para determinação de dimensões críticas	Parametrização e iterações
Ângulo da tremonha (α)	Gráficos de fator fluxo da tremonha Roberts (2005) e Jenike (1964)
Fator fluxo da tremonha (ff)	Gráficos de fator fluxo da tremonha Roberts (2005) e Jenike (1964)
Tensão crítica de arco (σ'_l)	Critério de fluxo e não fluxo Jenike (1964)
Parâmetro referente a espessura do arco $H(\alpha)$	Jenike (1964)
Dimensão crítica de saída (B_{cr})	Equação 2.19
Curvas limites de fluxo de massa	Parametrização e iterações

3.2.3 Determinação de pressões nas paredes de silos e tremonhas

As normas internacionais citadas na revisão bibliográfica relatam que as propriedades do produto armazenado em silos e tremonhas podem mudar de tempos em tempos. A combinação mais crítica dessas propriedades para cada caso depende dos efeitos de carregamento que estão sendo considerados, Tabela III.9. Portanto, é necessário definir valores inferiores e superiores para cada propriedade.

Tabela III.9 – Limites característicos de propriedades de fluxo a serem adotadas. Fonte: AS 3774-1996.

Aplicação	Limites característicos a serem adotados	
	Ângulo de atrito com a parede (φ_w)	Efetivo ângulo de atrito interno (δ)
Máxima pressão normal na parede vertical	Inferior	Inferior
Máxima tensão de cisalhamento na parede vertical	Superior	Inferior
Máxima tensão vertical na tremonha	Inferior	Superior
Máxima pressão normal na parede da tremonha	Inferior	Superior

Para a obtenção destes valores sugere-se que seja utilizado os valores dos quantis de 5% e 95%, respectivamente, e adota-se como função densidade de probabilidade a distribuição normal padrão, Figura 3.5. As equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 fornecem os valores que serão

adotados nas análises. Os coeficientes de variação, cov , adotados para o minério de ferro são os valores sugeridos pela EN 1991-4:2006 e apresentados na Tabela III.10 que corresponde a 11% para efetivo ângulo de atrito interno e 9% para o ângulo de atrito com a parede.

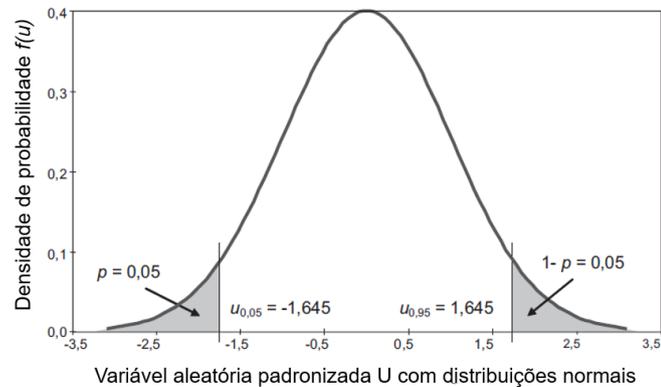


Figura 3.5 – Intervalos de confiança para distribuição normal.

$$\delta_{inf} = \delta_m \cdot (1 - 1,645 \cdot cov) \quad (3.1)$$

$$\delta_{sup} = \delta_m \cdot (1 + 1,645 \cdot cov) \quad (3.2)$$

$$\varphi_{w,inf} = \varphi_{w,m} \cdot (1 - 1,645 \cdot cov) \quad (3.3)$$

$$\varphi_{w,sup} = \varphi_{w,m} \cdot (1 + 1,645 \cdot cov) \quad (3.4)$$

Tabela III.10 – Valores usuais de coeficiente de variação das propriedades dos produtos. Fonte: EN 1991-4:2006.

Produto	Coeficiente de variação (cov)	
	Efetivo ângulo de atrito interno (δ)	Coeficiente de atrito com a parede (μ_w)
Minério de ferro (pellets)	0,11	0,09

O procedimento consiste na obtenção do valor médio do parâmetro a partir dos dados de cada tipo de minério de ferro. A sequência se dará pelos cálculos de pressões conforme AS 3774-1996 e demais considerações apresentadas no item 2.3.5.

3.3 Criação da ferramenta de trabalho

“Back-end”

1. Escrever e validar as equações do estudo teórico na ferramenta;
2. Preparação de tabelas para recebimento dos dados de entrada;
 - Propriedades de fluxo;
 - Informações de projeto;
 - Premissas de projeto.
3. Implantação do cálculo de fluxo e determinação das dimensões críticas para fluxo de massa;
4. Implantação do cálculo de pressões em silos e tremonhas;
5. Preparação dos resultados.

“Front-end”

1. Desenvolvimento das páginas de interface com os cálculos citados no *“back-end”*.

O modelo numérico será implementado em VBA no Microsoft Excel.

3.4 Fluxograma

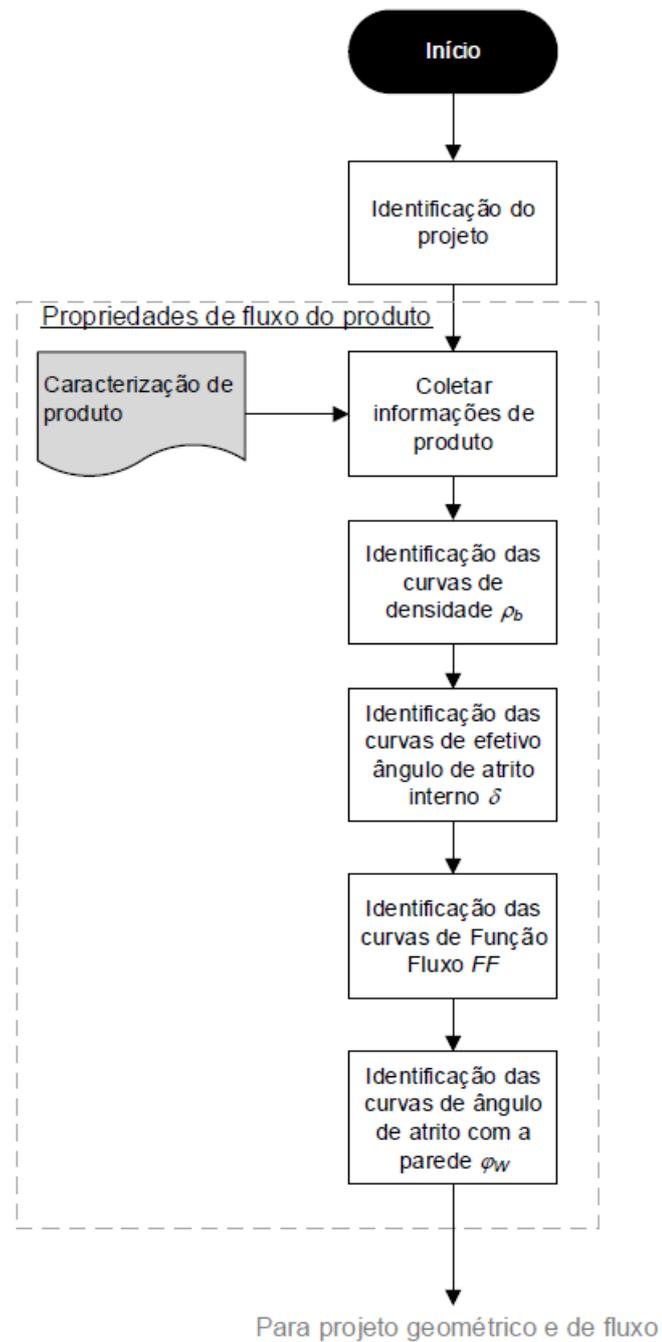


Figura 3.6 – Etapa 1: Agrupamento das informações de projeto e propriedade de fluxo do produto.

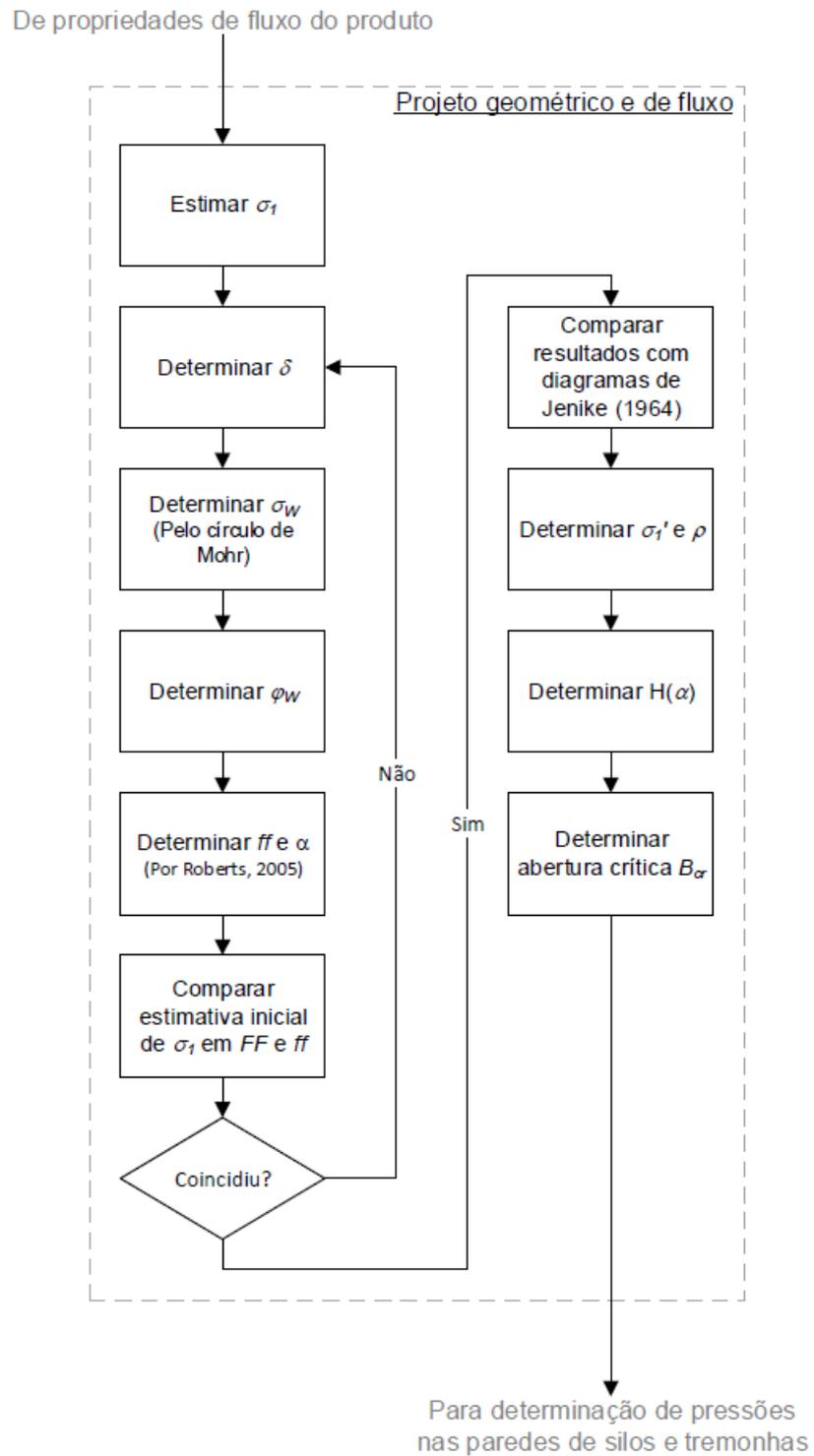


Figura 3.7 – Etapa 2: Projeto geométrico e de fluxo.

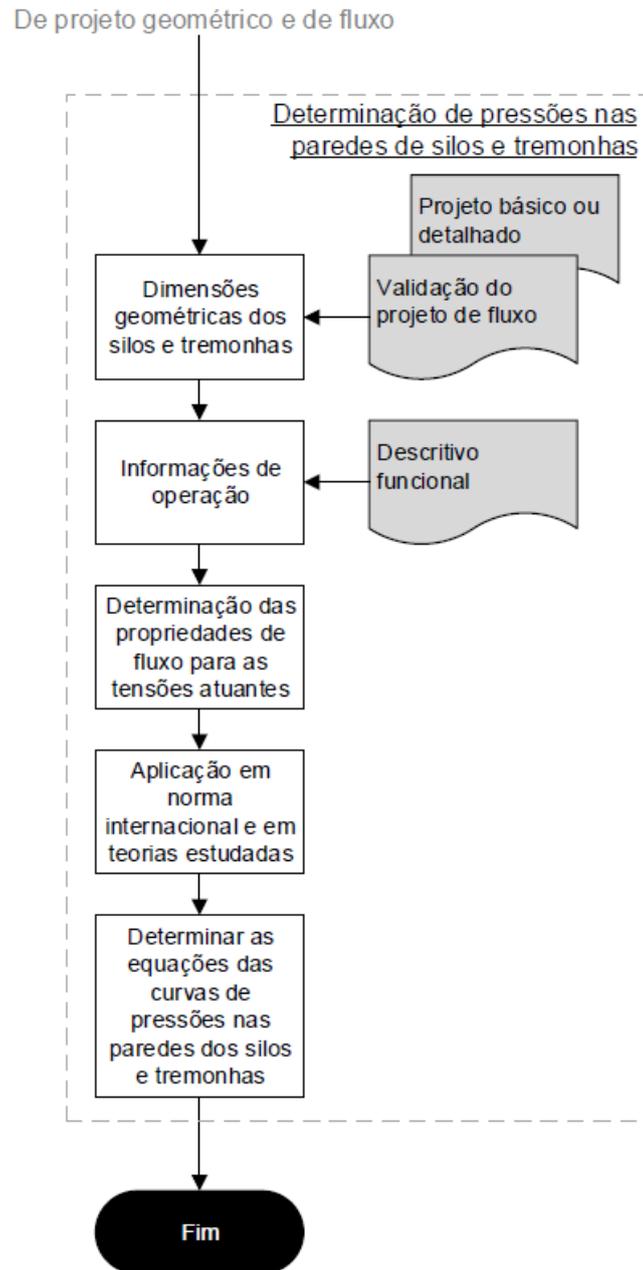


Figura 3.8 – Etapa 3: Determinação de pressões nas paredes de silos e tremonhas.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Discussões e ponderações dos resultados obtidos por meio de parametrizações das propriedades fluxo dos produtos armazenados, do projeto para fluxo de massa e determinação de pressões do minério de ferro nas paredes da tremonha são apresentadas neste capítulo. Os resultados estão apresentados em duas etapas:

1. Comprovação de conceitos teóricos por meio de validação numérica.

Nesta etapa, validações numéricas foram realizadas com a amostra de minério de ferro IO-A para entendimento do comportamento das propriedades de fluxo do produto sob influência de fatores como, variação do teor de umidade, tempo de consolidação e utilização de diferentes materiais de revestimento da parede da tremonha. Com a análise do comportamento realizada é possível fazer um comparativo com os conceitos teóricos apresentados na revisão bibliográfica.

Ainda nesta etapa, um estudo de fluxo para tremonhas de fluxo plano foi realizado, demonstrando os resultados obtidos de cada passo para determinação dos limites geométricos possíveis para garantir o fluxo de massa em função das propriedades de fluxo trabalhadas nesta etapa.

2. Projeto de fluxo e pressões em tremonhas piramidais industriais

Esta etapa é composta pela exposição das análises das propriedades de fluxo das amostras de minério de ferro IO-B e IO-C. Assim, como na etapa anterior, os resultados do estudo de fluxo são apresentados, adicionando a este as características geométricas das tremonhas do projeto exemplo apresentado no item 3.1.3. Este processo permite determinar as premissas e condições ideais para garantir o fluxo desejado sem obstruções.

As pressões atuantes nas paredes das tremonhas estão apresentadas nesta etapa, com análises realizadas para um sistema tipo gravimétrico e para um sistema volumétrico, como descrito no item 3.1.3, seguindo a norma AS 3774-1996.

Para as análises dos resultados foram desenvolvidas rotinas e uma ferramenta de trabalho para facilitar e otimizar as análises. Esta foi desenvolvida em linguagem VBA no Microsoft Excel, apresentado no **Apêndice I**.

4.1 Comprovação de conceitos teóricos por meio de validação numérica

Análises comparativas, interpretações e etapas de cálculo da validação numérica utilizando os dados extraídos de testes para a amostra de minério de ferro IO-A, estão apresentados neste item.

4.1.1 Propriedades de fluxo

Observa-se na Tabela IV.1, os dados disponíveis para análise do comportamento das propriedades de fluxo para o minério de ferro IO-A.

Tabela IV.1 – Dados disponíveis para análises da amostra IO-A.

Dados disponíveis	IO-A						Saturação
	0,99%	3,9%	6,9%	8,9%	11%	13%	
Densidade aparente (ρ_b)	X	X	X	X	X		
Resistência coesiva (σ_c) - 0h	X	X	X	X	X		
Resistência coesiva (σ_c) - 24h			X	X	X		
Ângulos de atrito com a parede (σ_w) 0h (UHMW)	X	X	X	X	X		Saturação
Ângulos de atrito com a parede (σ_w) 24h (UHMW)			X		X		
Ângulos de atrito com a parede (σ_w) 0h (HARDOX 600)	X	X	X	X	X		
Ângulos de atrito com a parede (σ_w) 24h (HARDOX 600)			X	X	X		

Os dados tratados nesta etapa servem para evidenciar a aplicabilidade das teorias estudadas.

4.1.1.1 Densidade aparente

Como enfatizado no item 2.1.1, o teor de umidade tem grande influência nas propriedades de fluxo do produto armazenado. O comportamento da densidade aparente, ρ_b , com a variação do teor de umidade está destacado na Figura 4.1. Quanto maior o teor de umidade presente no minério de ferro, maior será a densidade aparente para qualquer valor de tensão de consolidação, σ_l .

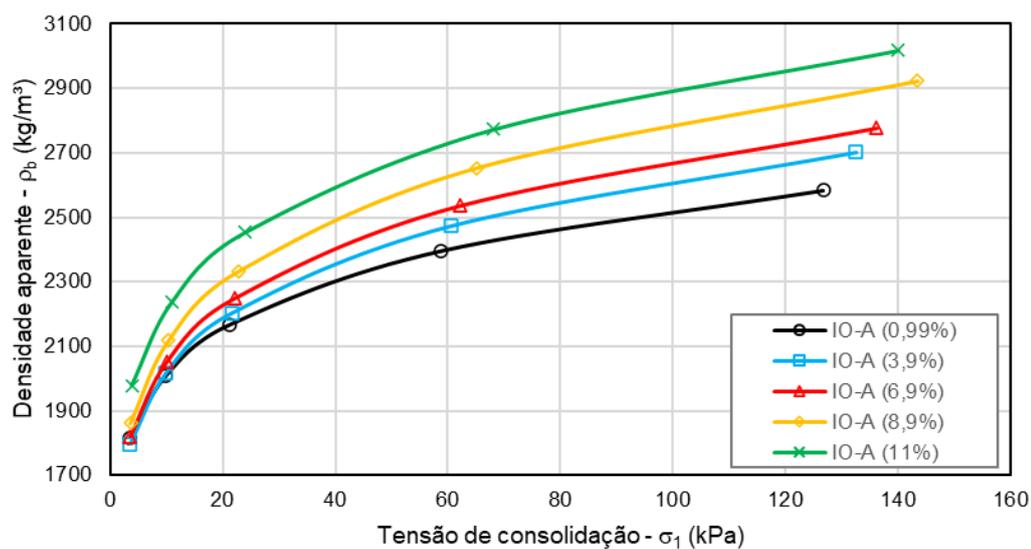
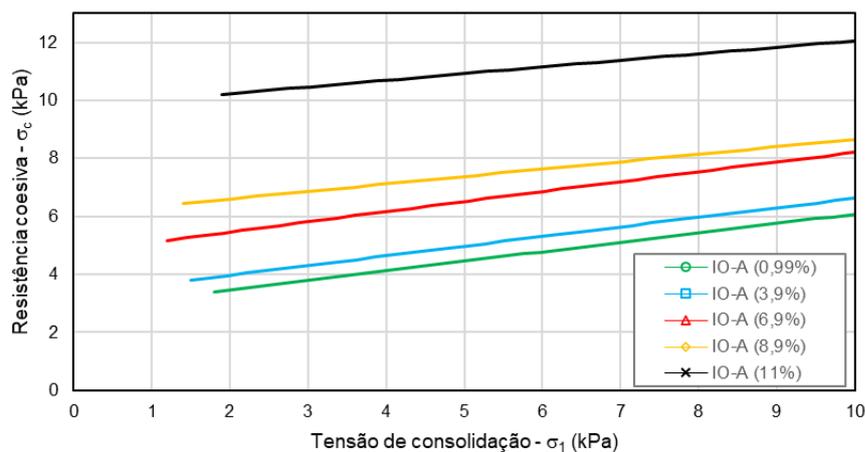


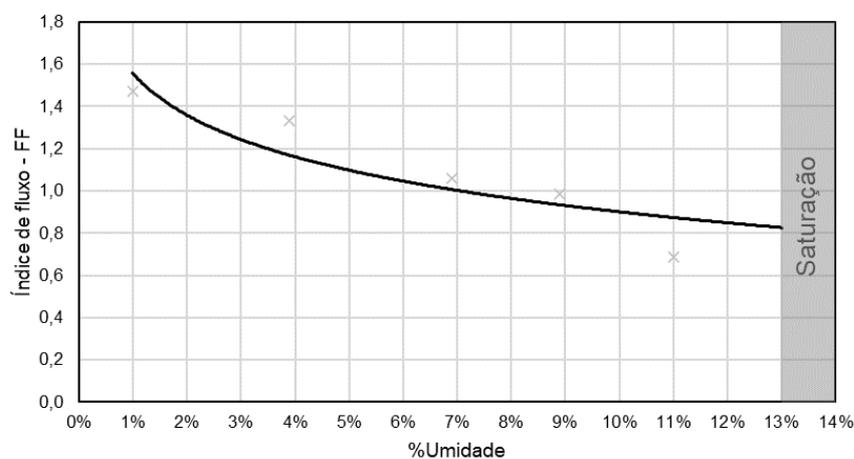
Figura 4.1 – Variação da densidade aparente para diferentes valores de teor de umidade.

4.1.1.2 Função fluxo (FF)

Como citado no item 2.1.1.2, a função fluxo, FF, é usada como uma medida de capacidade de fluir do produto a granel e que a resistência coesiva, σ_c , está em função da tensão de consolidação, σ_1 . É demonstrado na Figura 4.2a a influência do teor de umidade no comportamento da resistência coesiva do minério, que se compara ao comportamento apresentado na Figura 2.21. Desta forma, o aumento do teor de umidade leva a redução da capacidade de fluir, como apresentado na Figura 4.2b para uma tensão de consolidação de 8 kPa, comportamento similar ao apresentado na Figura 2.20.



a.



b.

Figura 4.2 – Comprovação do comportamento de fluxo em função do teor de umidade.

Além do teor de umidade, o tempo de consolidação também é um influenciador no comportamento do fluxo e de suas propriedades. Os dados dos testes apresentam valores para tempos e consolidação de 0 e 24 horas do IO-A com 11% de teor de umidade. O comportamento para cada tempo está apresentado na Figura 4.3, destacando uma maior resistência coesiva para o tempo de 24 horas, como destacado no item 2.1.1.11.

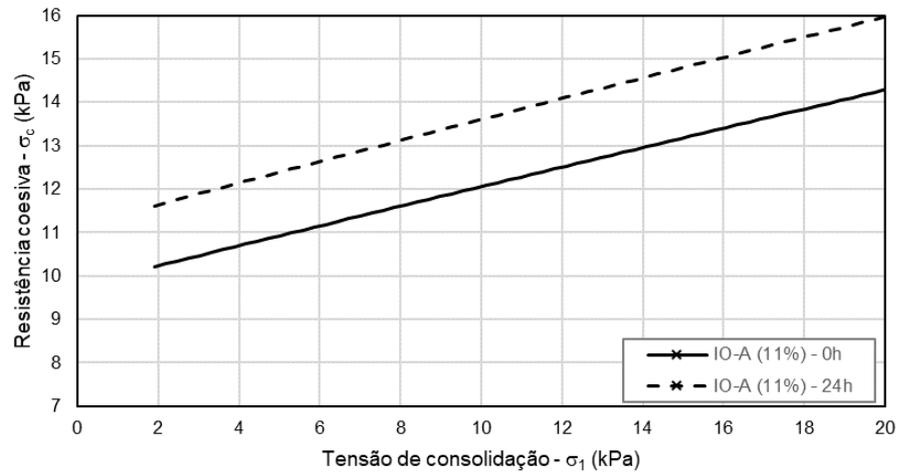


Figura 4.3 - Função fluxo influenciada pelo tempo de consolidação.

As amostras com teores de umidade 6,9% e 8,9% apresentaram comportamentos similares ao resultado da amostra de 11% da Figura 4.3.

4.1.1.3 “Yield Locus”

Avaliando o “yield locus” para o material UHMW como revestimento da parede, para teores de umidade 0,99% e 11% a uma tensão de consolidação de 10 kPa, observa-se na Figura 4.4 o aumento da tensão de cisalhamento, τ , com o aumento do teor de umidade.

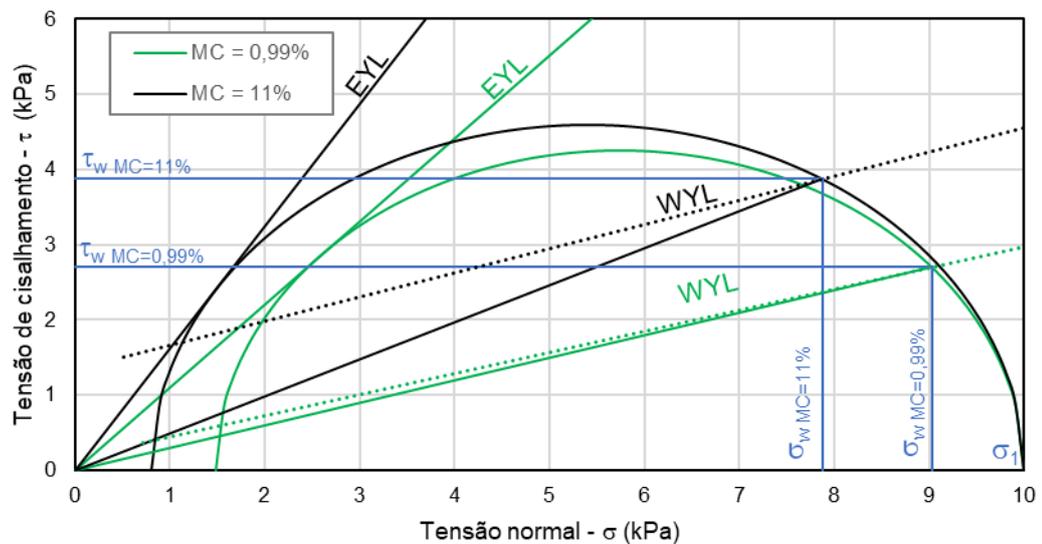


Figura 4.4 – “Yield Locus” para diferentes teores de umidade.

Porém, o comportamento da tensão de cisalhamento pode ser diferente para diferentes materiais de revestimento da parede com o produto de mesmo teor de umidade. Comparando o comportamento desta tensão utilizando os materiais UHMW e HARDOX 600, para o teor de umidade de 0,99% a uma tensão de consolidação de 10 kPa, observa-se na Figura 4.5 que a tensão de cisalhamento também é influenciada pela característica de cada material aplicado na parede.

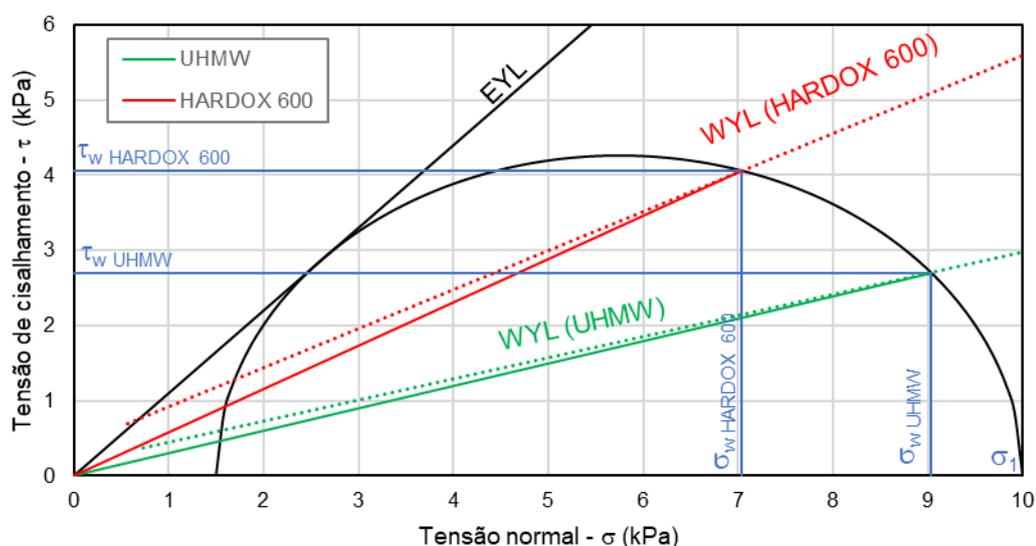


Figura 4.5 – “Yield Locus” para diferentes materiais de revestimento da parede.

Como citado no item 4.1.1.2, o tempo de consolidação também tem grande influência no comportamento das propriedades de fluxo. A influência do tempo de consolidação na interface produto/parede da tremonha está apresentada na Figura 4.6. A tensão de cisalhamento na parede, τ_w , tende a aumentar com o tempo armazenado.

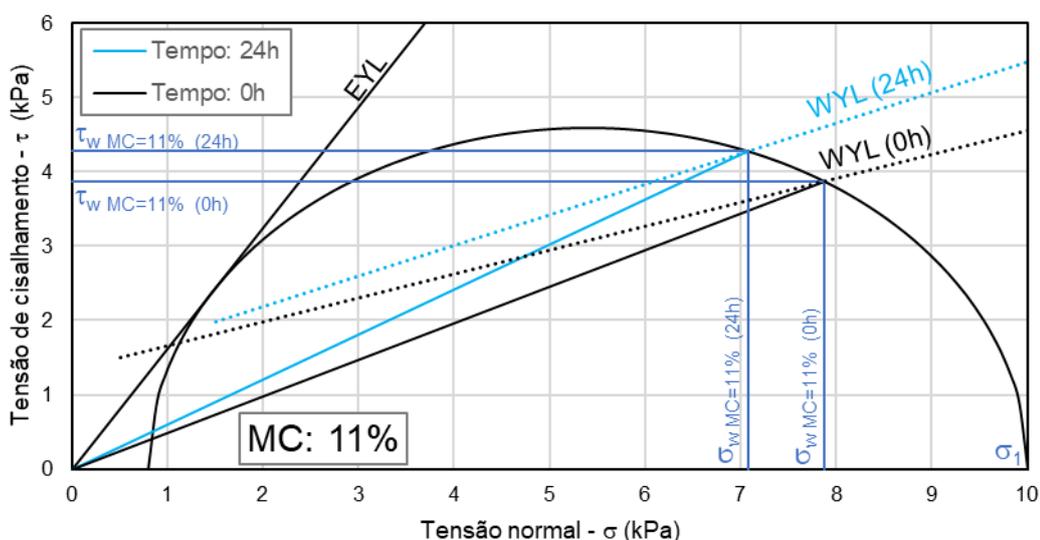


Figura 4.6 – “Yield Locus” para diferentes tempos de consolidação.

Percebe-se que a tensão de cisalhamento, τ_w , é influenciada pelo teor de umidade, características da superfície de revestimento da parede e pelo tempo de consolidação.

Os resultados obtidos da amostra com 6,9% de teor de umidade reiteram o comportamento apresentado para 11% de teor de umidade.

Os resultados das tensões atuantes na parede com a influência dos demais parâmetros estão apresentados na Tabela IV.2.

Tabela IV.2 – Tensões atuantes na parede a uma tensão de consolidação, σ_1 , de 10 kPa.

Tensão de consolidação, $\sigma_1 = 10$ kPa								
Material da parede	MC	δ (°)	ϕ_w (°)	σ_w (kPa)	τ_w (kPa)	ϕ_{wt} (°)	σ_{wt} (kPa)	τ_{wt} (kPa)
UHMW	0,99%	47,76	17,23	9,03	2,70	-	-	-
	3,90%	58,90	18,35	9,00	2,87	-	-	-
	6,90%	62,21	15,30	9,27	2,51	16,62	9,14	2,70
	8,90%	62,35	20,66	8,76	3,18	-	-	-
	11%	58,39	29,26	7,88	3,88	33,18	7,09	4,28
HARDOX 600	0,99%	47,76	31,46	7,04	4,05	-	-	-
	3,90%	58,90	30,70	7,34	4,18	-	-	-
	6,90%	62,21	29,80	7,51	4,14	34,09	6,79	4,45
	8,90%	62,35	29,48	7,54	4,13	45,66	4,80	4,67
	11%	58,39	32,78	7,03	4,30	51,87	3,43	4,16

Onde:

MC = Teor de umidade

δ = Efetivo ângulo de atrito interno

φ_w = Ângulo de atrito com a parede

σ_w = Tensão normal a parede

τ_w = Tensão de cisalhamento na parede

φ_{wt} = Ângulo de atrito com a parede para 24 horas de consolidação

σ_{wt} = Tensão normal a parede para 24 horas de consolidação

τ_{wt} = Tensão de cisalhamento na parede para 24 horas de consolidação

O gráfico “*Yield Locus*” também permite avaliar o comportamento da coesão, c , em função do teor de umidade e do tempo de consolidação.

Em uma avaliação do comportamento da coesão para os extremos valores de teor de umidade, 0,99% e 11%, obtêm-se o gráfico representado na Figura 4.7.

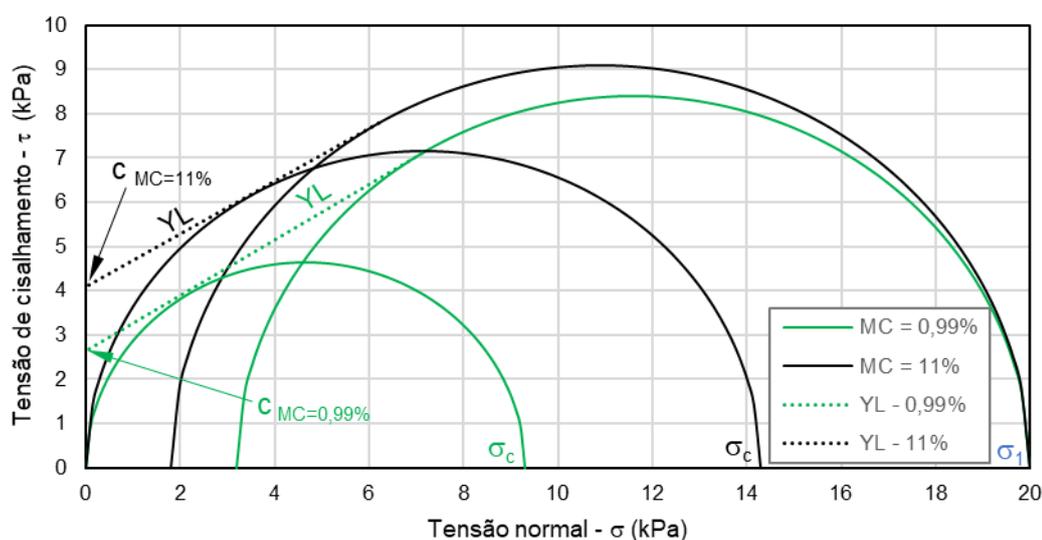


Figura 4.7 – Coesão no gráfico “*Yield Locus*” para diferentes teores de umidade.

A avaliação foi realizada para uma tensão de consolidação, σ_1 , de 20 kPa.

Percebe-se que o teor de umidade também tem influência na coesão, c . Nesta avaliação, a amostra com teor de umidade de 11% apresenta uma maior coesão quando comparado a amostra com teor de 0,99%.

Uma avaliação da influência do tempo de consolidação no comportamento da coesão, c , está

apresentada no gráfico da Figura 4.8. Esta é uma análise para a amostra IO-A com teor de umidade de 11% para 0 e 24 horas de consolidação.

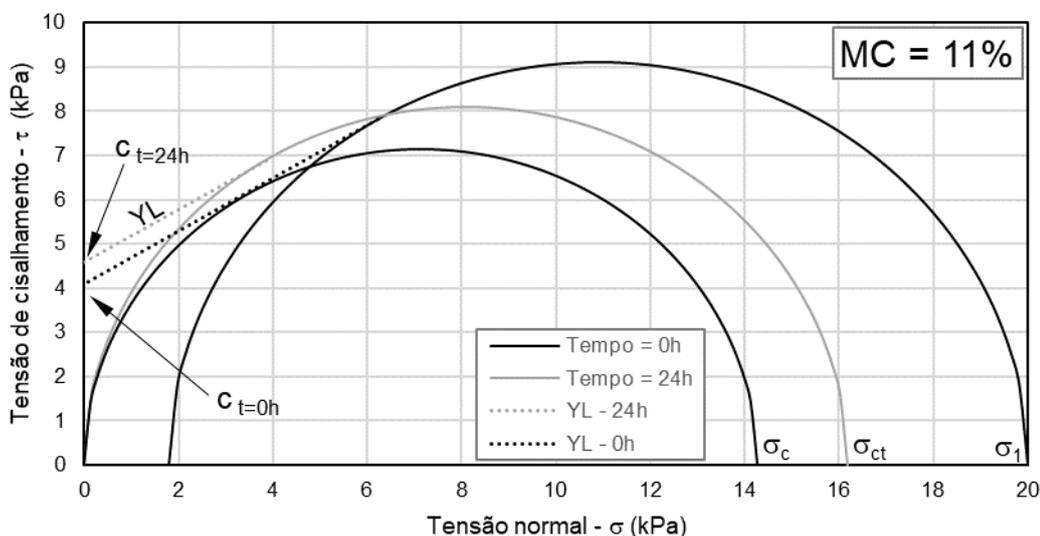


Figura 4.8 – Coesão no gráfico “Yield Locus” para diferentes tempos de consolidação.

Como demonstrado na Figura 2.24 do item 2.1.1.11, o tempo de consolidação tem influência no comportamento da coesão, c , onde com um tempo de 24 horas houve um aumento da coesão, c , para a mesma tensão de consolidação, σ_1 .

Os resultados obtidos para resistência coesiva, σ_c , e coesão, c , em função do teor de umidade e do tempo de consolidação estão apresentados na Tabela IV.3. Observa-se que os valores de coesão para os teores de umidade entre 0,99% e 8,9% são próximos com pequenas diferenças. Sobre o tempo de consolidação, quando sua influência é avaliada, percebe-se que a coesão sofre um aumento em todos os casos.

Tabela IV.3 – Resistência coesiva, σ_c , e coesão, c , em função do teor de umidade.

MC	Tensão de consolidação, $\sigma_1 = 20$ kPa			
	σ_c (kPa)	σ_{ct} (kPa)	c (kPa)	ct (kPa)
0,99%	9,56	-	2,64	-
3,90%	10,10	-	2,14	-
6,90%	12,03	13,12	2,58	2,82
8,90%	11,27	12,55	2,25	2,51
11%	14,40	16,17	4,09	4,59

Onde:

MC = Teor de umidade

σ_c = Resistência coesiva instantânea

σ_{ct} = Resistência coesiva para 24 horas de consolidação

c = coesão

ct = coesão para 24 horas de consolidação

4.1.2 Fluxo em tremonhas

A validação numérica para o estudo de fluxo em tremonhas está de acordo com as seguintes premissas:

- Tipo de tremonha analisada: Piramidal retangular
- Geometria da abertura de saída: Retangular
- Produto analisado: IO-A (MC: 0,99%)
- Material de revestimento da parede adotado: UHMW

O valor da tensão de consolidação, σ_1 , para a dimensão crítica foi determinado por meio de parametrização das propriedades de fluxo do produto com a geometria definida nas premissas supracitadas.

σ_1

8,0

 kPa Tensão de consolidação para dimensão crítica

Valores das propriedades de fluxo submetidas a tensão de consolidação de 8,0 kPa:

δ	53,1	°	Efetivo ângulo de atrito interno
φ_w	18	°	Ângulo de atrito com a parede
ρ_b	1975	kg/m ³	Densidade aparente

A partir da definição das propriedades de fluxo do produto, é possível determinar o limite do ângulo da tremonha, α , e o fator fluxo, ff , para o tipo de tremonha selecionado. O gráfico de Roberts (2005) para tremonhas de fluxo plano, Figura 4.9a, é utilizado para determinação destes parâmetros. De forma a verificar os resultados encontrados, utilizou-se o gráfico original apresentado por Jenike (1964), para o efetivo ângulo de atrito interno, δ , mais próximo do valor encontrado, Figura 4.9b, satisfazendo o primeiro resultado.

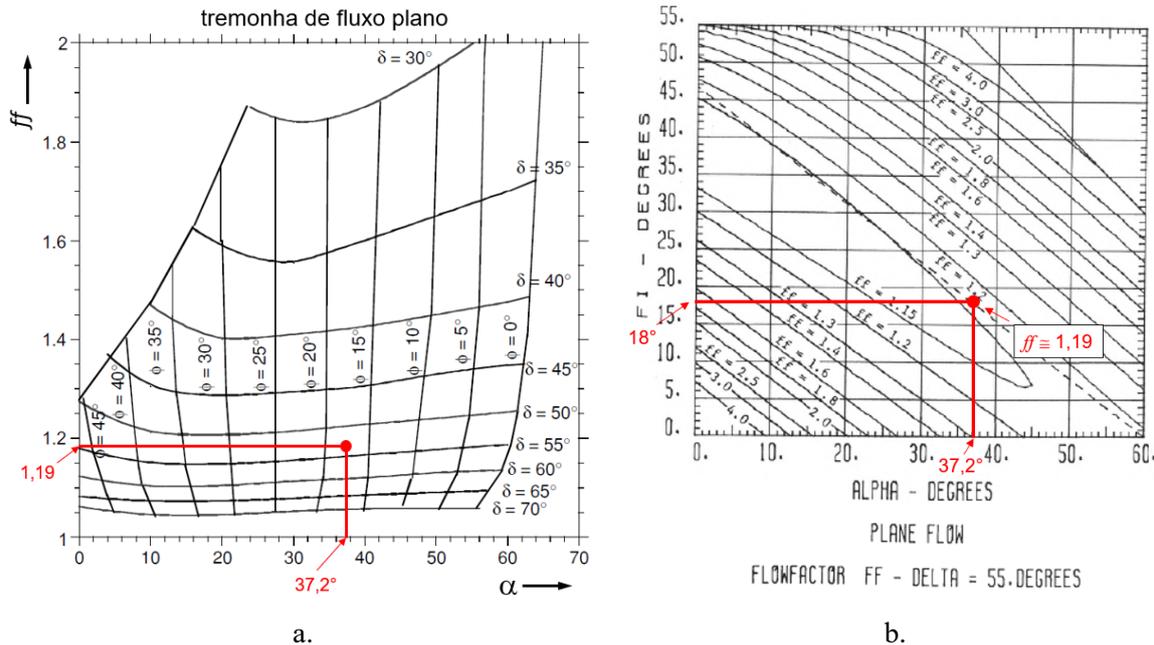


Figura 4.9 – Determinação do fator fluxo da tremonha, ff , e ângulo da tremonha, α : a. Gráfico de fator fluxo de Roberts (2005); b. Gráficos de fator fluxo para tremonhas com $\delta = 50^\circ$ de Jenike (1964).

Observa-se que os mesmos valores de ff e α foram obtidos em ambos os gráficos, comprovando a utilização dos estudos de Jenike (1964) como base técnica na construção dos gráficos por Roberts (2005).

Resultados:

$$\alpha \begin{array}{|c|} \hline 37,2 \\ \hline \end{array}^\circ \quad \begin{array}{l} \hat{\text{Ângulo da tremonha}} \\ \text{Fator fluxo da tremonha} \end{array}$$

$$ff \begin{array}{|c|} \hline 1,19 \\ \hline \end{array}$$

Obs.: O ângulo da tremonha apresentado é o limite para o ângulo de vale, conforme apresentado na Figura 2.40 do item 2.2.6.

Aplicando o critério de fluxo e não fluxo do item 2.2.6.1, obtém-se o ponto em que a resistência coesiva, σ_c , submetida a uma tensão de consolidação, σ_l , se iguala a tensão de arco, σ'_l . O ponto de intercessão entre a função fluxo, FF , e o fator fluxo da tremonha, ff , está apresentado na Figura 4.10.

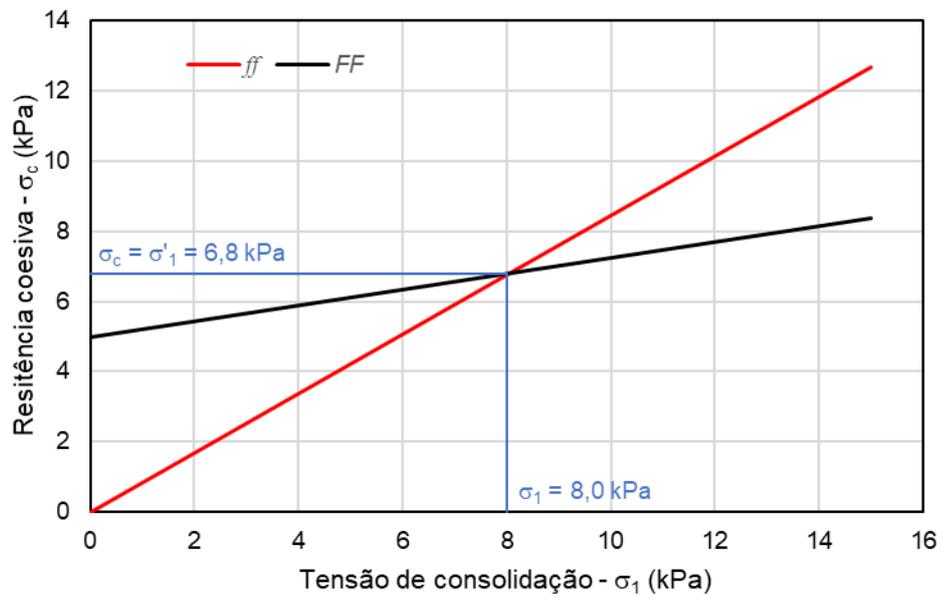


Figura 4.10 – Critério de fluxo e não fluxo com obtenção da tensão crítica de arco, σ'_1 .

O valor do parâmetro referente a espessura do arco, $H(\alpha)$, para o ângulo da tremonha, α , de $37,2^\circ$ resulta em 1,18, conforme apresentado na Figura 4.11.

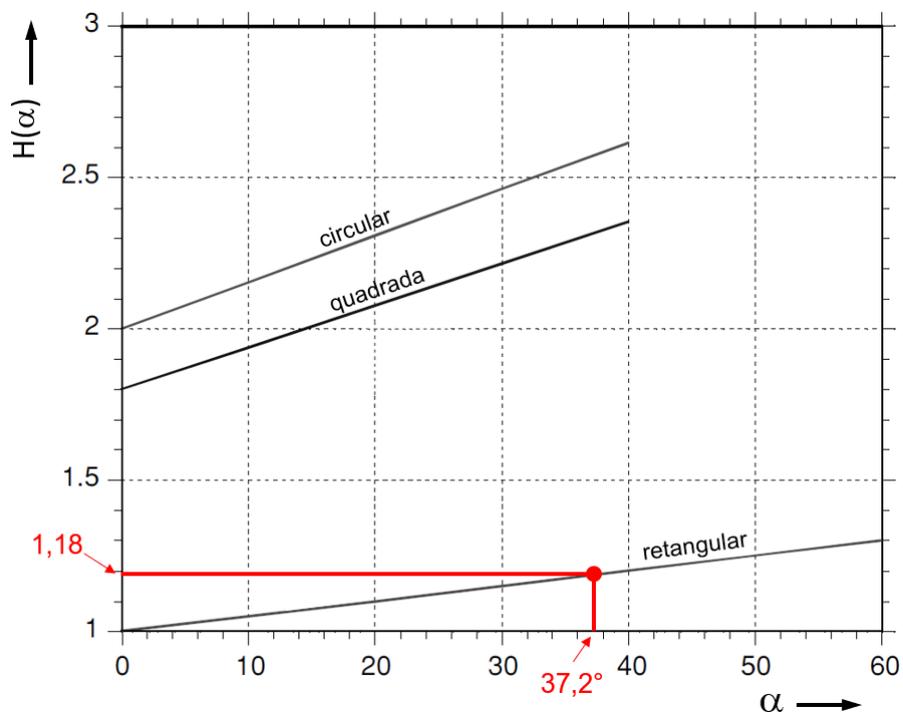


Figura 4.11 – Parâmetro referente a espessura do arco $H(\alpha)$.

Utilizando a equação 2.19, obtém-se:

Bcr	0,41	m	Dimensão crítica de saída
Bcrs	0,50	m	Dimensão de saída recomendada (adotado 20%)

As variações da tensão de consolidação, σ_c , influenciam diretamente nos valores das propriedades de fluxo. Desta forma, estabelecendo diferentes valores para a tensão de consolidação, superiores a tensão para a dimensão crítica de saída, é possível obter seus respectivos valores das propriedades de fluxo, Figura 4.12.

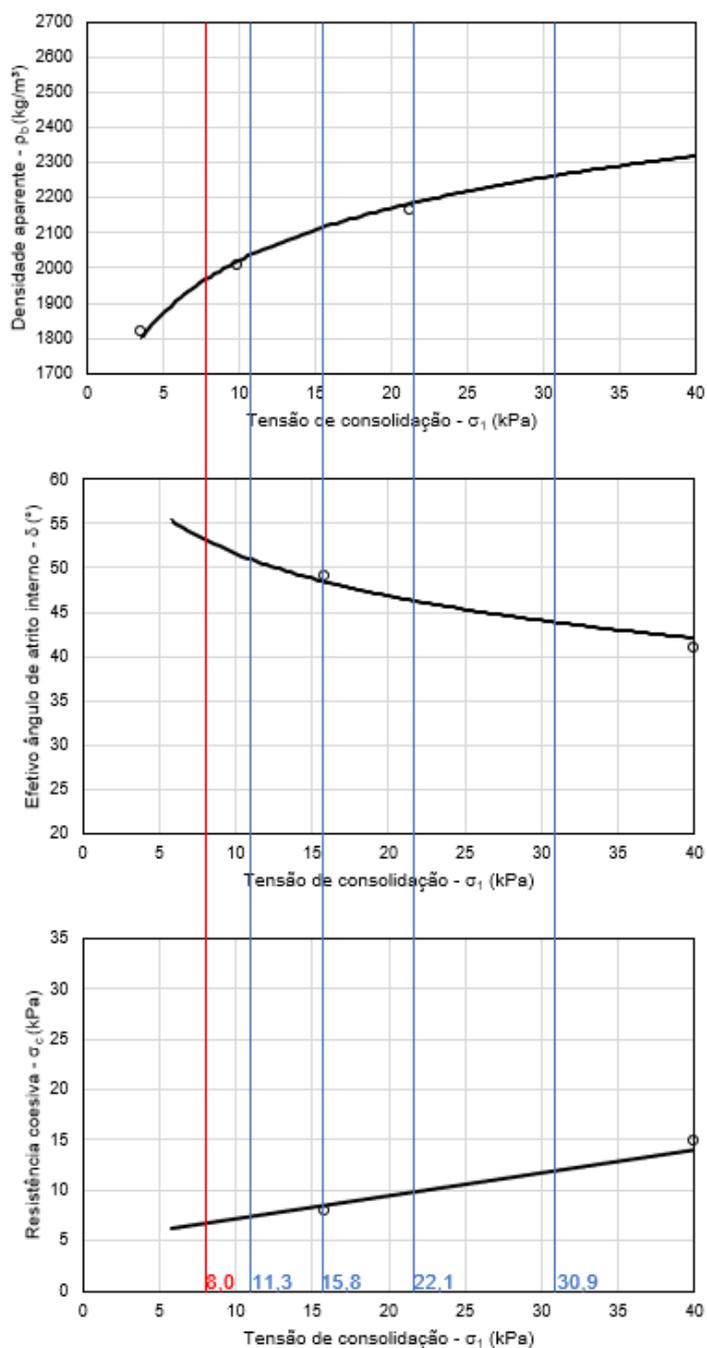


Figura 4.12 – Influência da variação da tensão de consolidação, σ_1 , nas propriedades de fluxo.

A repetição do processo descrito neste item, para as diferentes tensões de consolidação adotadas, permite determinar a curva para o máximo ângulo da tremonha, α , em função da dimensão da abertura de saída, B , para garantia de fluxo de massa, Figura 4.13. A Tabela IV.4 contém os valores resultantes para sua construção.

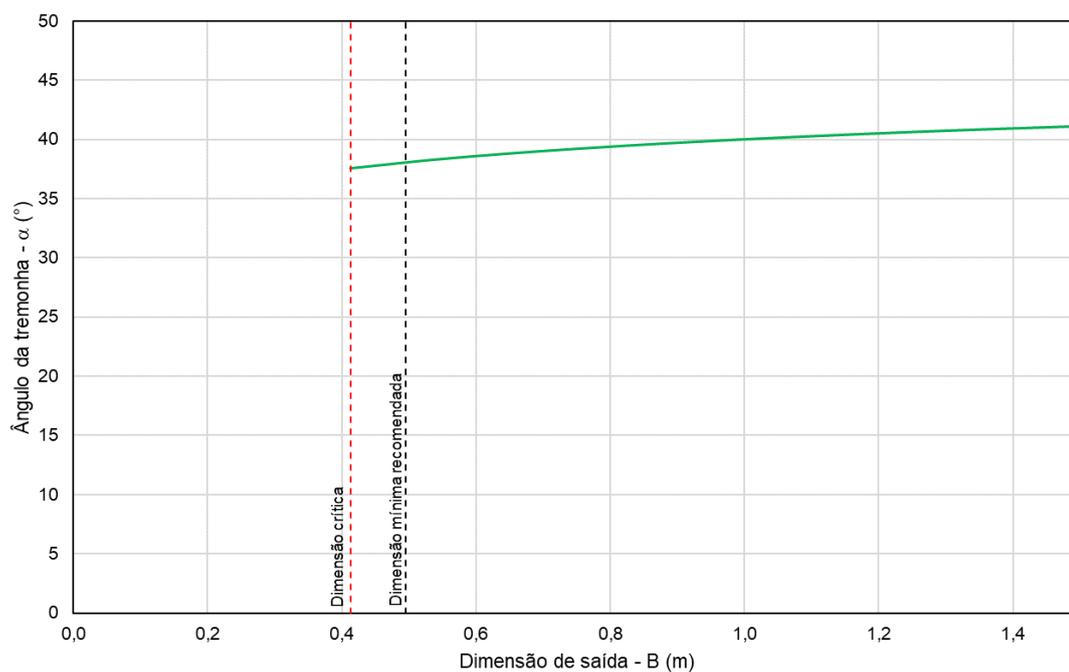


Figura 4.13 – Curva de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B.

A dimensão mínima recomendada representa o acréscimo de 20% no valor encontrado para dimensão crítica.

Tabela IV.4 – Resultado das propriedades de fluxo em função da variação da tensão de consolidação,

σ_1 .

σ_1 (kPa)	ρ_b (kg/m ³)	δ (°)	σ'_1 (kPa)	σ_w (kPa)	ϕ_w (°)	ff	α (°)	H(α)	B (m)
8,0	1975	53	6,8	7,2	18	1,19	37,2	1,18	0,41
11,3	2047	51	9,3	10,2	17	1,21	38,4	1,18	0,55
15,8	2119	48	12,5	14,3	16	1,26	39,6	1,19	0,72
22,1	2192	46	17,1	20,0	16	1,29	39,7	1,19	0,95
30,9	2264	44	23,3	28,0	15	1,33	40,9	1,20	1,26

Uma legenda das regiões contidas no gráfico apresentado na Figura 4.13 está apresentado na Figura 4.14.

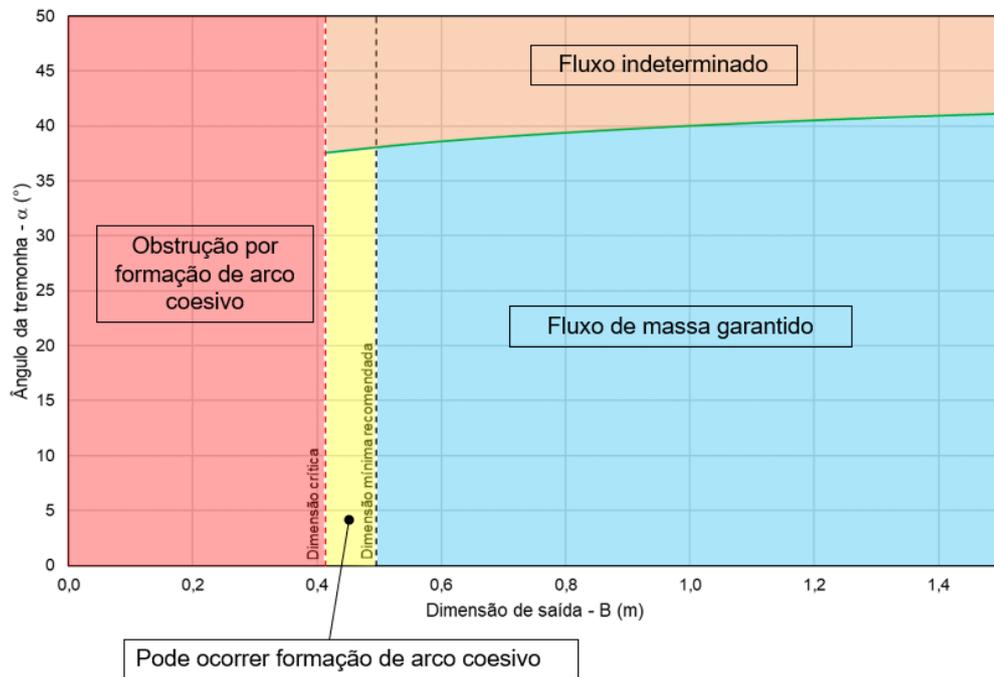


Figura 4.14 – Gráfico explicativo sobre a curva de valores máximos de ângulo da tremonha (α) em função da abertura de saída (B).

Um comparativo entre as curvas obtidas para UHMW e HARDOX 600 como materiais de revestimento da parede, com a amostra a 0,99% de teor de umidade é apresentado na Figura 4.15.

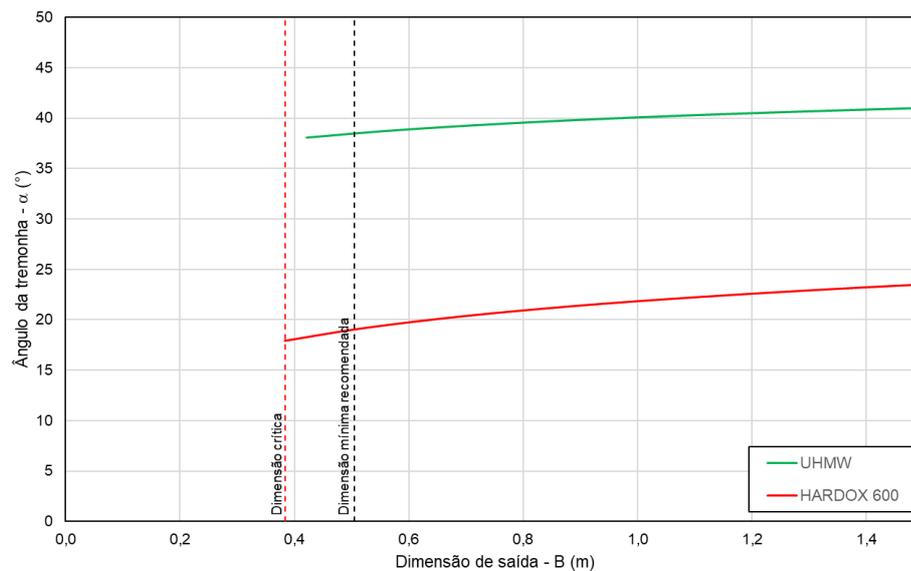


Figura 4.15 – Comparativo entre as curvas de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B , para diferentes materiais de revestimento da parede.

Observa-se a significativa redução dos limites máximos de ângulo da tremonha, α , com a utilização do HARDOX 600. Este resultado representa a influência de maiores ângulos de atrito com a parede, φ_w , entre o HARDOX 600 e o minério de ferro quando comparados com o UHMW, como abordado na Figura 4.5.

A variação do teor de umidade também é um comparativo importante possível de ser realizado. Mantendo o comparativo entre os mesmos materiais de revestimento da parede apresentados na Figura 4.15 e utilizando os extremos valores do teor de umidade (0,99% e 11%) para a amostra de minério de ferro selecionada, têm-se o resultado apresentado na Figura 4.16.

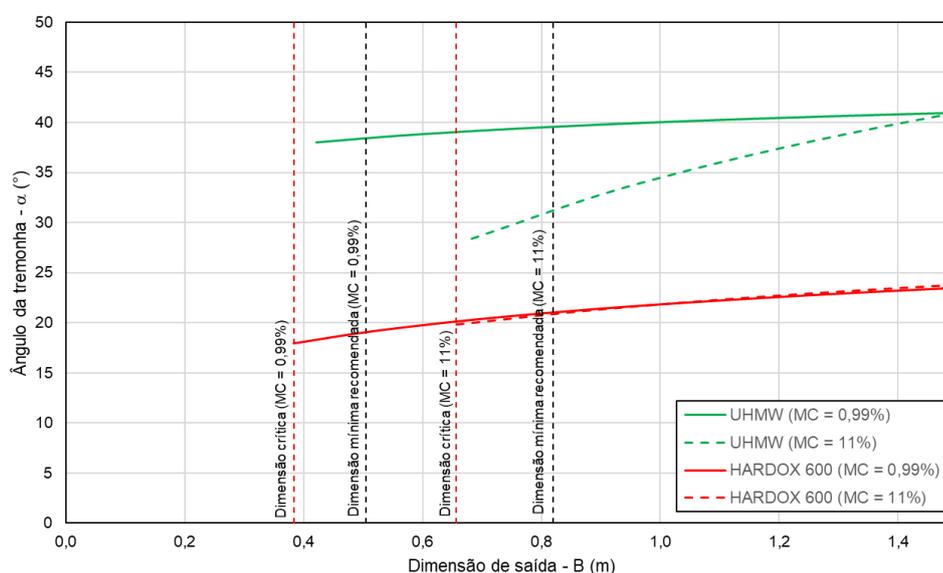


Figura 4.16 – Comparativo entre as curvas de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B , para diferentes materiais de revestimento da parede e diferentes teores de umidade da amostra.

Este resultado demonstra que a variação do teor de umidade do minério de ferro influencia também nos valores limites mínimos da abertura de saída da tremonha. O IO-A (11%) requer aberturas de saída mínimas 73% maiores que as requeridas para a amostra com teor de umidade de 0,99%. Isto ocorre pelo aumento dos ângulos de atrito com a parede, φ_w , gerado pelo aumento do teor de umidade, destacado na Figura 4.4.

Nesta análise observa-se variação nos limites dos ângulos da tremonha, α , para o UHMW, reduzindo a área de garantia de fluxo de massa.

4.2 Projeto de fluxo e pressões em tremonhas piramidais industriais

Este tópico apresenta o comportamento das propriedades de fluxo para as amostras IO-B e IO-C de minério de ferro, projeto de fluxo e pressões para as tremonhas do projeto exemplo apresentado no item 3.1.3.

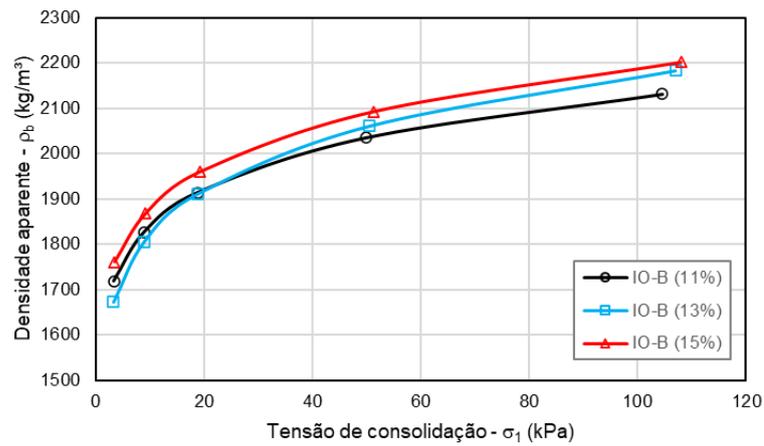
4.2.1 Propriedades de fluxo

A seguir, apresentam-se os resultados das análises das propriedades de fluxo. Os dados disponíveis referentes aos testes realizados com as amostras IO-B e IO-C estão apresentados na Tabela IV.5.

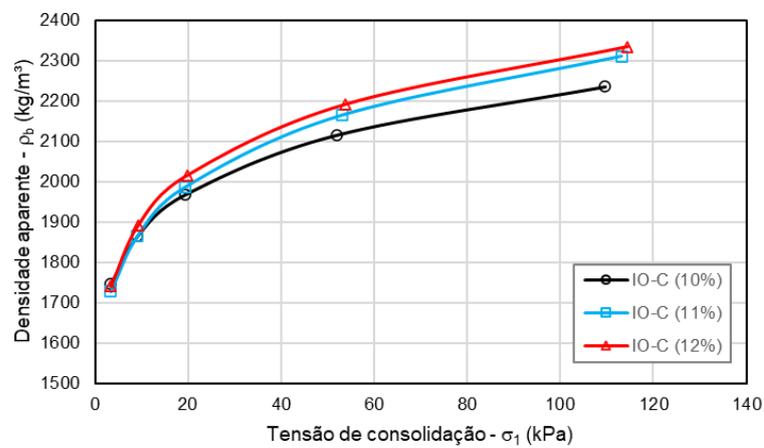
Tabela IV.5 – Dados disponíveis para análises das amostras IO-B e IO-C.

Dados disponíveis	IO-B				IO-C			
	11%	13%	15%	16,8%	10%	11%	12%	13,6%
Densidade aparente (ρ_b)	X	X	X		X	X	X	
Resistência coesiva (σ_c) - 0h	X	X	X		X	X	X	
Resistência coesiva (σ_c) - 72h	X	X	X		X	X	X	
Ângulos de atrito com a parede (σ_w) 0h (HARDOX 500)	X	X	X	Saturação	X	X	X	Saturação
Ângulos de atrito com a parede (σ_w) 72h (HARDOX 500)	X	X	X		X	X	X	
Ângulos de atrito com a parede (σ_w) 0h (CDP 4666)	X	X	X		X	X	X	
Ângulos de atrito com a parede (σ_w) 72h (CDP 4666)	X	X	X		X	X	X	

O teste de compressibilidade tem como objetivo determinar o comportamento da densidade aparente, ρ_b , em função da tensão de consolidação, σ_l . Uma comparação para este comportamento é apresentada na Figura 4.17a para três teores de umidades diferentes para a amostra IO-B. A Figura 4.17b tem o mesmo objetivo, porém para a amostra IO-C.



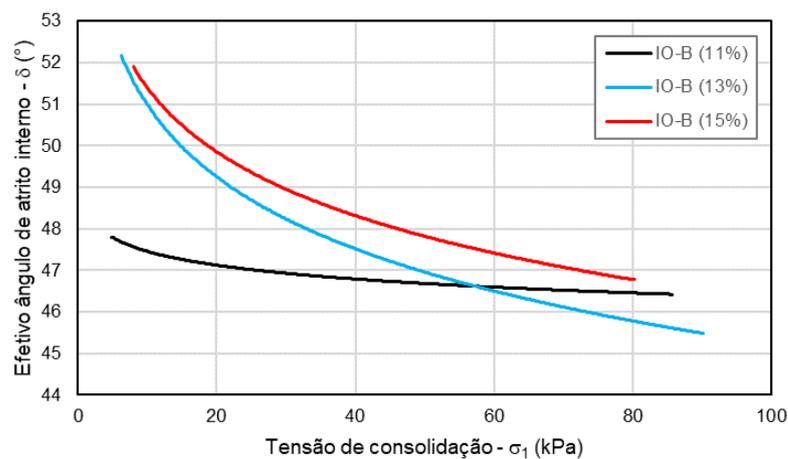
a.



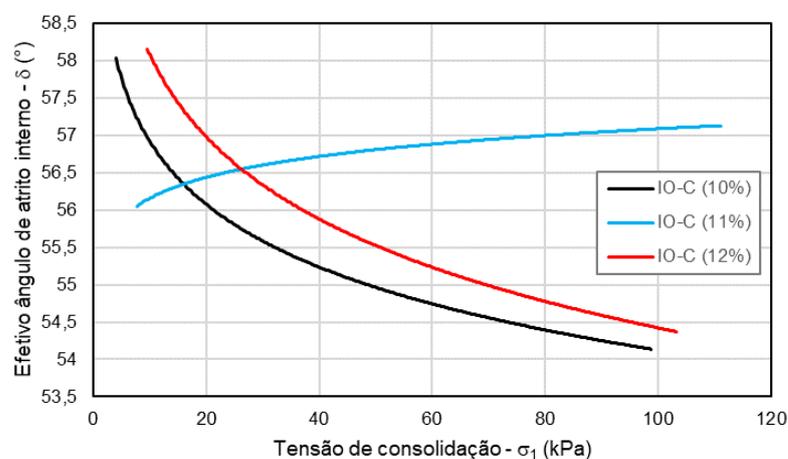
b.

Figura 4.17 – Densidade aparente, ρ_b : a. Amostra IO-B; b. Amostra IO-C.

O comparativo entre os efetivos ângulos de atrito interno, δ , em função da tensão de consolidação, σ_1 , são apresentados na Figura 4.18a para a amostra IO-B e Figura 4.18b para a amostra IO-C.



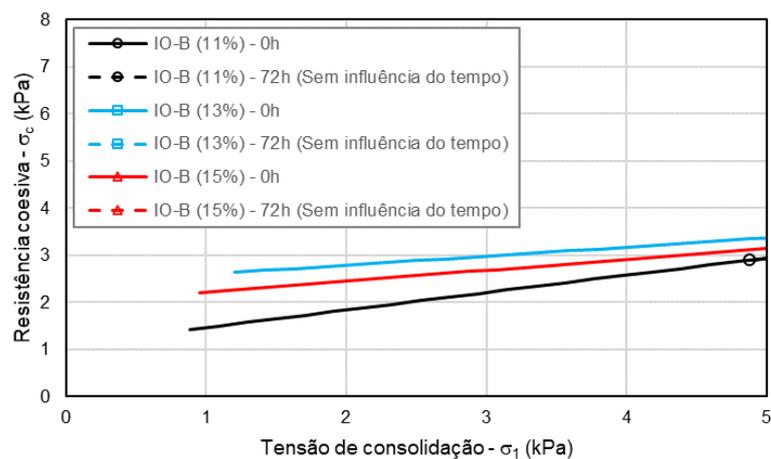
a.



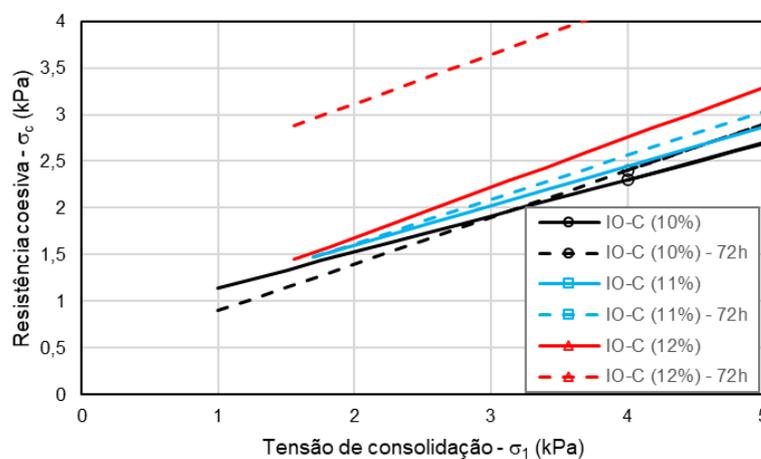
b.

Figura 4.18 – Efetivo ângulo de atrito interno, δ : a. Amostra IO-B; b. Amostra IO-C.

Os dados dos testes apresentam resultados para o tempo instantâneo (0 horas) e tempo de consolidação de 72 horas. Desta forma é possível identificar a influência do tempo de consolidação na resistência coesiva, σ_c , em cada amostra. Esta influência está apresentada na Figura 4.19a para a amostra do IO-B e a Figura 4.19b, para a amostra IO-C.



a.

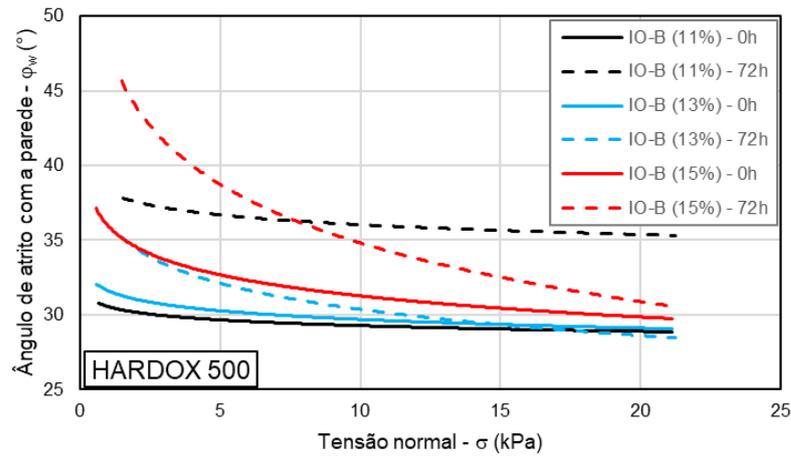


b.

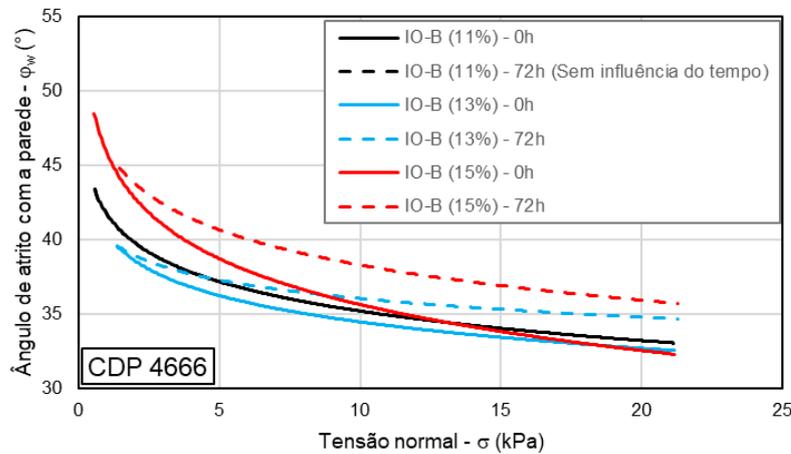
Figura 4.19 – Influência do tempo de consolidação na resistência coesiva, σ_c : a. Amostra IO-B; b. Amostra IO-C.

Observa-se que a resistência coesiva, σ_c , para a amostra IO-B não sofreu alteração pelo tempo de consolidação, porém a amostra IO-C mostrou-se sensível a esta variável.

O tempo de consolidação apresenta também influência no comportamento da interface minério de ferro e parede da tremonha. Estão apresentados nas Figura 4.20a e Figura 4.20b o comportamento da amostra IO-B com os materiais de revestimento da parede, HARDOX 500 e CDP 4666, respectivamente.



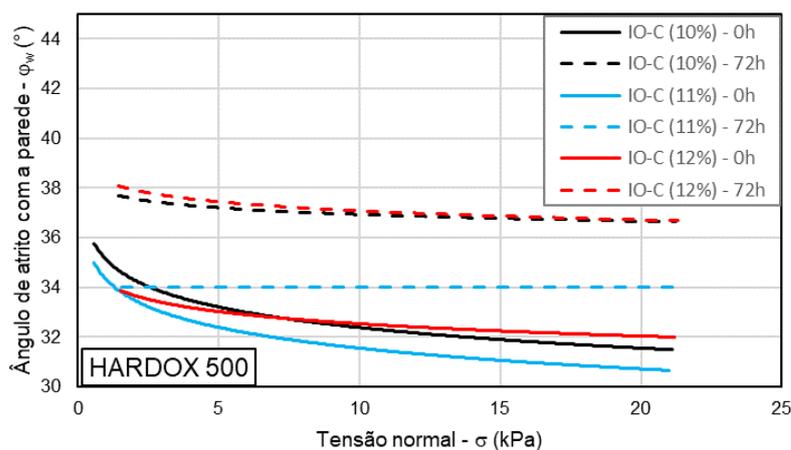
a.



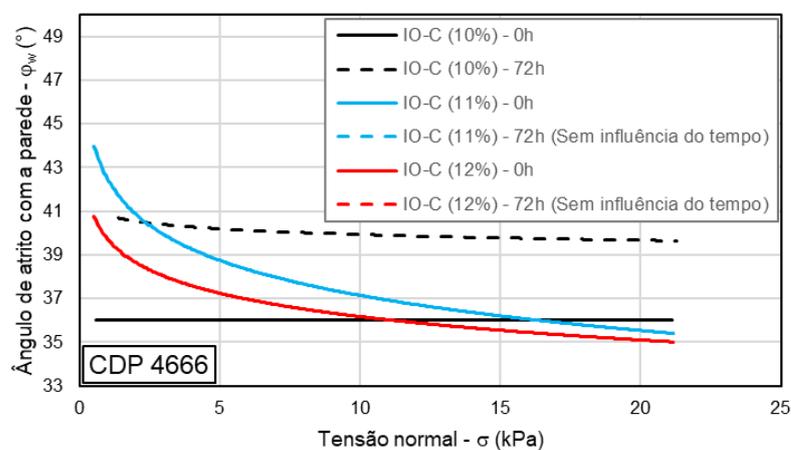
b.

Figura 4.20 – Influência do tempo de consolidação no ângulo de atrito com a parede, φ_w , para a amostra IO-B: a. HARDOX 500; b. CDP 4666.

Os comparativos para a amostra IO-C com os mesmos materiais de revestimento da parede são apresentados nas Figura 4.21a e Figura 4.21b, para HARDOX 500 e CDP 4666, respectivamente.



a.



b.

Figura 4.21 – Influência do tempo de consolidação no ângulo de atrito com a parede, ϕ_w , para a amostra IO-B: a. HARDOX 500; b. CDP 4666.

Outro importante ponto destacado por Wang (2015) também está evidenciado nestes resultados. A característica mineralógica tem influência no comportamento de fluxo e na resistência coesiva do minério de ferro, σ_c . O comparativo entre as amostras na Figura 4.22 apresenta a tendência do minério IO-C (61% Goethita | 39% Hematita) ter maiores valores de resistência coesiva, σ_c , quando comparado ao minério IO-B (18% Goethita | 82% Hematita), para os mesmos valores de tensão de consolidação, σ_l .

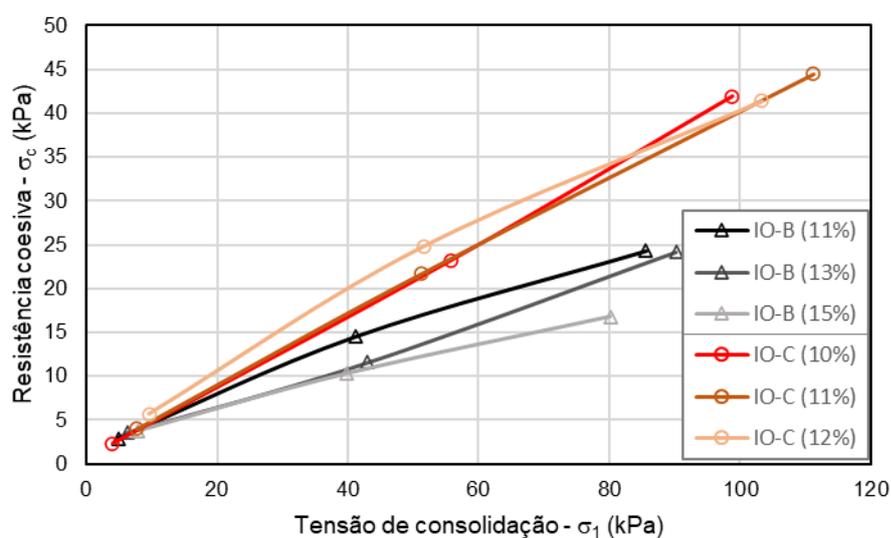


Figura 4.22 – Influência da característica mineralógica na resistência coesiva, σ_c .

O resumo dos resultados das tensões atuantes nas paredes para as amostras de minério de ferro IO-B e IO-C estão apresentados, respectivamente, na Tabela IV.6 e Tabela IV.7.

Tabela IV.6 – Tensões atuantes na parede para a amostra IO-B.

Tensão de consolidação, $\sigma_1 = 10$ kPa					
Material da parede	MC	δ (°)	φ_w (°)	σ_w (kPa)	τ_w (kPa)
HARDOX 500	11%	47,46	29,46	7,16	4,00
	13%	50,99	29,96	7,21	4,08
	15%	51,39	32,00	6,95	4,18
CDP 4666	11%	47,46	36,63	6,04	4,23
	13%	50,99	35,66	6,26	4,33
	15%	51,39	37,86	6,06	4,36

Condições

Produto: IO-B

Tempo de consolidação: 0h

Tabela IV.7 – Tensões atuantes na parede para a amostra IO-C.

Tensão de consolidação, $\sigma_1 = 10$ kPa					
Material da parede	MC	δ (°)	φ_w (°)	σ_w (kPa)	τ_w (kPa)
HARDOX 500	10%	56,92	32,83	6,89	4,32
	11%	56,16	31,99	6,99	4,27
	12%	58,08	32,80	6,84	4,36
CDP 4666	10%	56,92	36,00	6,19	4,50
	11%	56,16	38,48	5,98	4,51
	12%	58,08	36,90	6,23	4,52

Condições
 Produto: IO-C
 Tempo de consolidação: 0h

Como destacado por Calil Jr. e Cheung (2007), produtos granulares desconsolidados não possuem resistência coesiva, mas ganham resistência e coesão por meio de consolidação, ou seja, com o aumento da tensão de consolidação, σ_1 , como demonstrado na Tabela IV.8.

Tabela IV.8 – Coesão, c , das amostras IO-B e IO-C para diferentes tensões de consolidação, σ_1 .

Amostra	MC	Tensão de consolidação	
		$\sigma_1 = 5$ kPa c (kPa)	$\sigma_1 = 20$ kPa c (kPa)
IO-B	11%	0,89	2,07
	13%	0,99	1,45
	15%	0,86	1,42
IO-C	10%	0,57	1,73
	11%	0,67	1,86
	12%	0,77	2,40

Tempo de consolidação: 0h

4.2.2 Projeto de fluxo em tremonhas

4.2.2.1 Análise de resultados

Com a utilização dos passos descritos no item 4.1.2 para determinação da curva limite de fluxo de massa, para ângulos de tremonhas e dimensões críticas de abertura de saída, pôde-se gerar os gráficos, referentes as amostras IO-B e IO-C. Nestes mesmos gráficos, ao posicionar as coordenadas da geometria (dimensão de saída, B , e ângulo de vale da tremonha, α_v) de cada tremonha do projeto exemplo, foi possível identificar as limitações de fluxo em cada uma e auxiliar na escolha do material de revestimento da parede, assim como alertar para problemas causados por tempo de armazenamento.

O gráfico representado na Figura 4.23 reflete o estudo de fluxo para o comportamento do minério de ferro da amostra IO-B (MC=11%) para tempos de 0 e 72 horas com HARDOX 500 e CDP 4666 como material de revestimento da parede da tremonha. Ao posicionar as coordenadas de geometrias ($B \times \alpha_v$) das tremonhas pulmão e dosadora no gráfico, se identifica as possibilidades e limitações de fluxo para cada uma.

Percebe-se neste cenário que a geometria da tremonha dosadora permite a utilização de todos os materiais especificados para a parede, mesmo com 72 horas de armazenamento, garantindo o fluxo de massa. Porém a coordenada da tremonha pulmão, devido aos ângulos de vale das paredes, α_v , se encontra acima das curvas do CDP 4666 e do HARDOX 500 para 72 horas. Para garantir o fluxo de massa com este ângulo de vale, α_v , a tremonha pulmão deve ser operada para carregamento e descarregamento simultâneo e ser revestida com HARDOX 500. As dimensões necessárias para avaliação de fluxo das tremonhas pulmão e dosadora estão representadas na Tabela IV.9.

Tabela IV.9 – Dimensões das tremonhas avaliadas.

Parâmetros	Tremonha	
	Pulmão	Dosadora
B (m)	1,081	0,534
α_1 (°)	18	4
α_2 (°)	5	7
α_v (°)	18,6	8

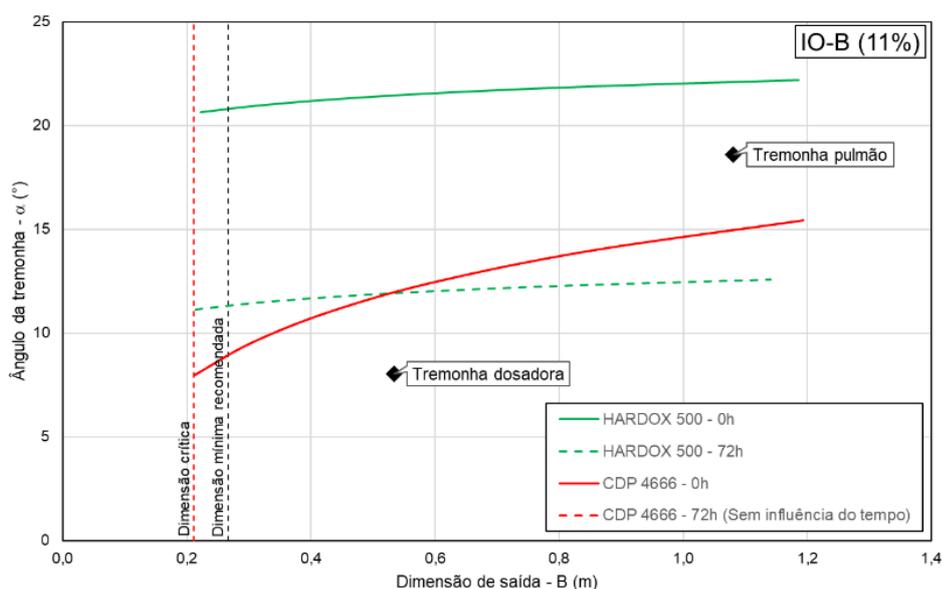


Figura 4.23 – Curva de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B, para amostra IO-B (11%).

O fluxo do minério de ferro referente a amostra IO-B para 13% e 15% de teor de umidade apresenta comportamento similar. Para a amostra IO-B (MC=13%), Figura 4.24, a geometria da tremonha pulmão permite o armazenamento do minério de ferro até 72 horas utilizando o HARDOX 500 nas paredes. A geometria da tremonha dosadora continua permitindo todas as condições neste cenário.

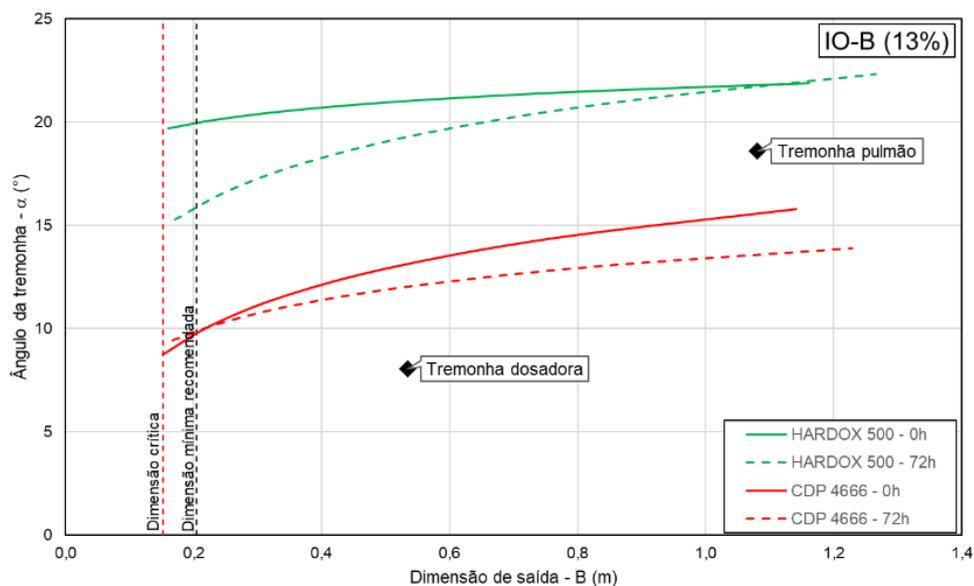


Figura 4.24 – Curva de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B , para amostra IO-B (13%).

A geometria da tremonha pulmão para a amostra IO-B (MC=15%), Figura 4.25, permite apenas condições instantâneas de fluxo do minério de ferro utilizando o HARDOX 500 nas paredes. A geometria da tremonha dosadora, neste caso, não permite armazenamento de 72 horas utilizando o CDP 4666 nas paredes.

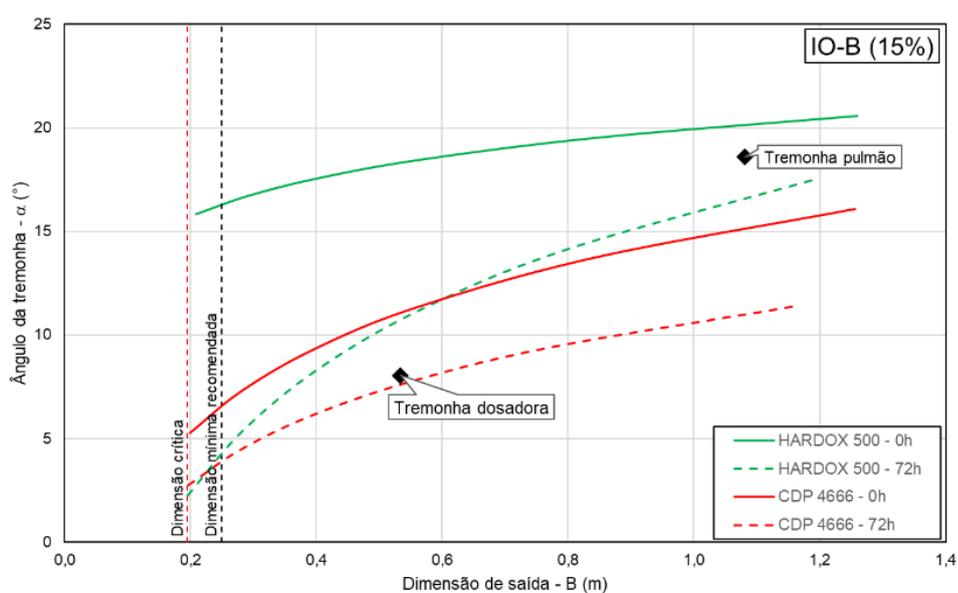


Figura 4.25 – Curva de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B , para amostra IO-B (15%).

No estudo de fluxo para o minério de amostra IO-C (MC=10% e 11%), Figura 4.26 e Figura 4.27, respectivamente, a geometria da tremonha pulmão permite apenas condições instantâneas de fluxo do minério de ferro utilizando o HARDOX 500 nas paredes. A geometria da tremonha dosadora permite todas as condições neste cenário.

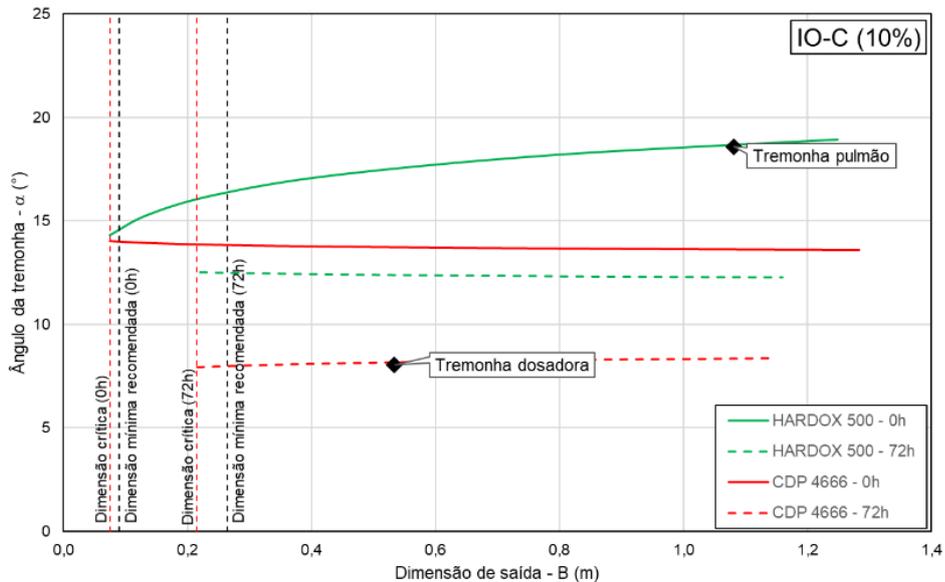


Figura 4.26 – Curva de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B, para amostra IO-C (10%).

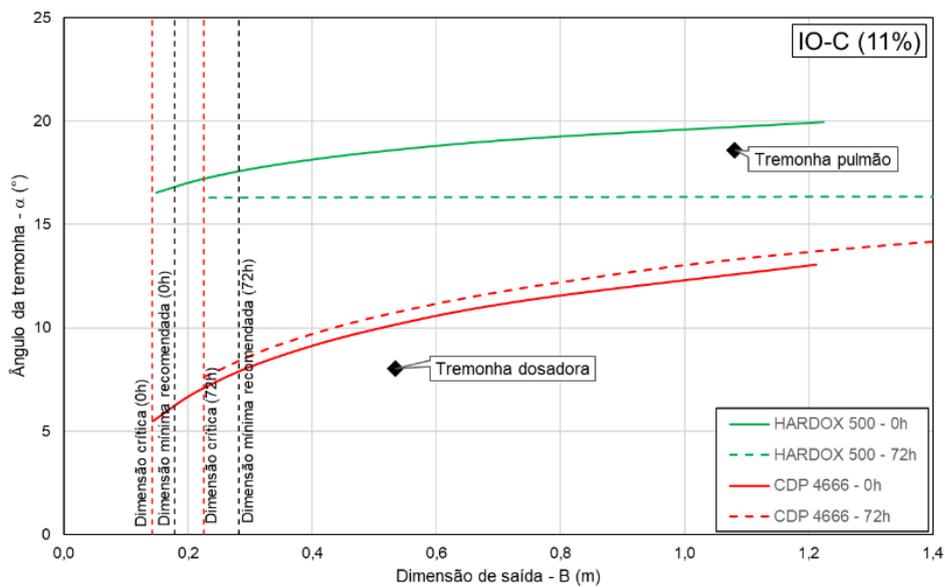


Figura 4.27 – Curva de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B, para amostra IO-C (11%).

A geometria da tremonha pulmão, para o minério de amostra IO-C (MC=12%), Figura 4.28, permite apenas condições instantâneas de fluxo utilizando o HARDOX 500 nas paredes. Porém a dimensão da abertura da saída, B, da tremonha dosadora tem seu valor inferior a dimensão mínima recomendada para armazenamento de 72 horas, o que pode ocasionar obstruções por arco coesivo. Nesta condição, para garantir o fluxo de massa nas tremonhas e sem obstruções, o armazenamento de 72 horas não é recomendado.

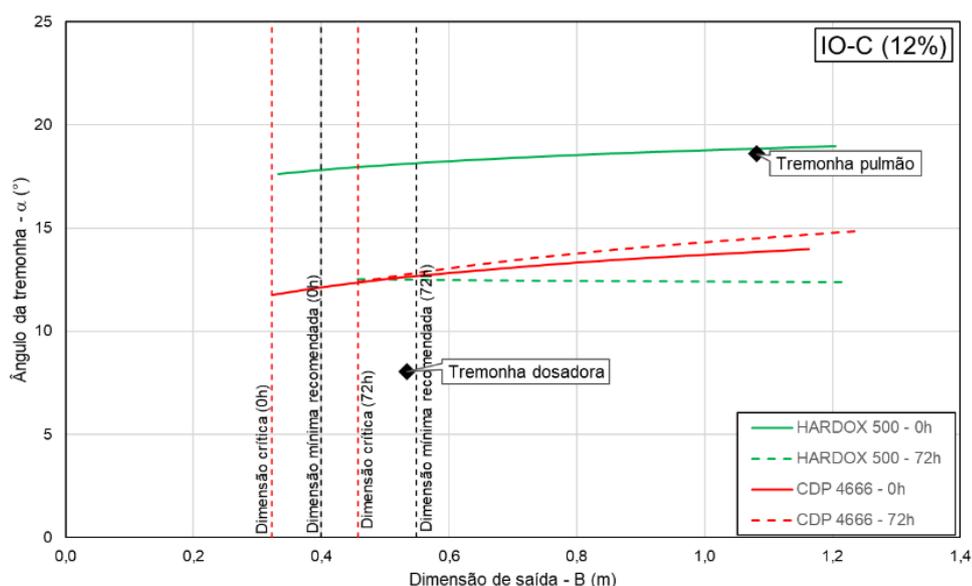


Figura 4.28 – Curva de valores máximos de ângulo da tremonha, α , em função da abertura de saída, B, para amostra IO-C (12%).

4.2.2.2 Discussão sobre os resultados do projeto de fluxo em tremonhas

Influência do tempo de consolidação

O minério de ferro referente a amostra IO-C tem maior sensibilidade ao tempo de armazenamento, exigindo maiores dimensões de saída da tremonha, para a condição crítica de 72 horas de armazenamento, para os três teores de umidade testados, Figura 4.26, Figura 4.27 e Figura 4.28. Este comportamento está descrito no item 2.2.7 da revisão bibliográfica pela Figura 2.48 e Figura 2.49.

Este fato se dá pelo aumento da resistência coesiva, σ_c , com o aumento do tempo e consolidação para a amostra IO-C, demonstrado na Figura 4.19b.

A influência do tempo de consolidação de 72 horas não é observada na amostra de minério de

ferro IO-B, Figura 4.19a. Desta forma, as aberturas críticas de saída da tremonha para 0 e 72 horas de armazenamento tem as mesmas dimensões, Figura 4.23, Figura 4.24 e Figura 4.25.

Além da resistência coesiva, σ_c , a tensão de cisalhamento na parede, τ_w , necessária para garantir o fluxo na interface produto/parede tende a aumentar com o tempo de consolidação, o que leva a limites menores dos ângulos da tremonha, α , como observado em todas as figuras. A explicação para este comportamento está apresentada na Figura 4.6, onde pelo “*Yield Locus*” é possível analisar a influência do tempo de consolidação nesta interface.

Material de revestimento da parede

Os resultados dos testes apresentados na Tabela III.5 indicam que o minério de ferro IO-B é mais abrasivo sobre os materiais de parede apresentados, o que tenderão a polir a superfície do revestimento da parede em maior grau. Observado pela taxa de desgaste, este recurso resultou em menores ângulos de atrito, ϕ_w , da parede após polimento.

Uma nova análise pode ser realizada caso o polimento de fábrica destes revestimentos seja uma solicitação do fornecimento. Este processo levaria a redução da tensão de cisalhamento na parede, τ_w , e uma elevação das curvas limites dos ângulos da tremonha, α .

Esta é uma nova condição e deve ser testada para obtenção de novos valores das propriedades de fluxo na interface do minério de ferro e a parede da tremonha.

Influência do teor de umidade

O teor de umidade é um parâmetro de grande influência no comportamento de fluxo do produto armazenado. Observa-se a tendência de aumento das dimensões críticas quando se compara os gráficos da Figura 4.23 a Figura 4.28. O maior teor de umidade do minério de ferro IO-C apresentado no último gráfico, Figura 4.28, levou a um aumento da dimensão de abertura mínima recomendada na tremonha. Esta influência conduziu a reprovação da dimensão de abertura, B , da tremonha dosadora estabelecida em projeto para armazenamento de 72 horas.

Definições para garantia de fluxo de massa do projeto exemplo

O projeto exemplo, utilizado para carregamento de vagões, foi concebido para manusear os

dois tipos de minério de ferro apresentados (IO-B e IO-C). Desta forma, se faz necessário uma análise do conjunto de resultados e discussões deste item.

O HARDOX 500 se mostra como o material de revestimento mais indicado para se operar sempre com fluxo de massa. No entanto, a sua condição de desgaste, principalmente para regiões de alta velocidade é mais desfavorável que a aplicação do CDP 4666, conforme descrito na Tabela III.5, no resumo das taxas de desgaste dos materiais de revestimento. Com os resultados e as análises apresentadas é possível estabelecer as seguintes premissas de projeto:

- Devido a inclinações desfavoráveis das paredes da tremonha pulmão, o CDP 4666 não deve ser utilizado neste componente;
- A tremonha dosadora apresenta melhores ângulos de parede, permitindo a utilização de ambos os materiais de revestimento analisados;
- Ainda de forma a garantir o fluxo de massa sem obstruções a operação deve ser contínua, com carregamento e descarregamento simultâneo.

Estas premissas estão resumidas na Tabela IV.10.

Tabela IV.10 – Premissas de projeto de fluxo.

	Tremonha pulmão	Tremonha dosadora
Material de revestimento	HARDOX 500	HARDOX 500 CDP 4666
Operação	Carregamento e descarregamento simultâneo.	

O carregamento de vagões exige uma operação dinâmica e de movimentos rápidos de abertura e fechamento das comportas, o que caracteriza uma condição para fluxo instantâneo. Falhas no sistema, impedindo o fluxo do produto, devem ser imediatamente relatadas e resolvidas de forma a evitar obstruções.

Arredondamentos e chanfros de arestas e vales são recomendados para otimização no fluxo do produto.

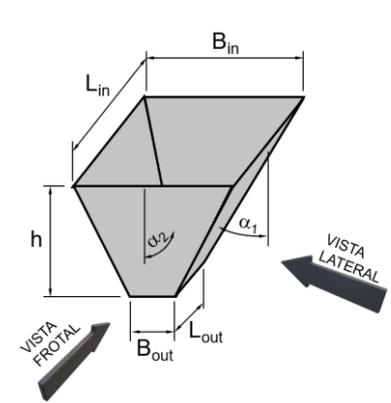
4.2.3 Projeto de pressões em tremonhas

Com o devido entendimento de operação do sistema, propriedades de fluxo do minério de ferro e as condições de fluxo a garantir o padrão de fluxo de massa, este item do capítulo trata

do desenvolvimento do projeto de pressões nas tremonhas analisadas.

As dimensões das tremonhas pulmão e dosadora estão na Tabela IV.11.

Tabela IV.11 – Dimensões das tremonhas pulmão e dosadora para o projeto de pressões.



	Parâmetros	Tremonha Pulmão	Tremonha Dosadora
Vista Frontal	B_{in} (m)	3,72	1,237
	α_1 (°)	18	4
	B_{out} (m)	1,081	0,534
Vista Lateral	L_{in} (m)	3,185	2,618
	α_2 (°)	5	7
	L_{out} (m)	2,352	1,449
	h (m)	4,057	4,466

4.2.3.1 Premissas adotadas

O projeto de pressões foi realizado para os dois sistemas descritos no item 3.1.3:

- Sistema gravimétrico
- Sistema volumétrico

Devido ao limite de enchimento da tremonha pulmão e de forma a representar o cenário mais desfavorável aos cálculos de pressões, adotou-se o ângulo de repouso de 35° para as duas amostras em análise.

Os materiais adotados como revestimento das paredes, após análise dos resultados do projeto de fluxo, estão apresentados na Tabela IV.12.

Tabela IV.12 – Materiais de revestimento da parede das tremonhas.

	Tremonha pulmão	Tremonha dosadora
Material de revestimento	HARDOX 500	CDP 4666

Outra premissa adotada foi em relação a densidade aparente, ρ_b , que nesta fase passa a representar o valor máximo obtido nos testes de cada amostra. Desta forma, o resultado apresenta as condições de pressões mais desfavoráveis nos componentes.

Os limites característicos adotados para as propriedades de fluxo estão conforme metodologia

descrita no item 3.2.3, apresentados na Tabela IV.13.

Tabela IV.13 – Limites característicos adotados para as propriedades de fluxo.

Componente	Propriedade	Limite	IO-B			IO-C		
			11%	13%	15%	10%	11%	12%
Tremonha pulmão	δ (°)	Sup.	55,22	55,87	56,82	65,08	67,05	65,71
		Inf.	38,30	38,75	39,41	45,14	46,50	45,57
	φ_w (°) HARDOX 500	Sup.	33,29	33,29	34,44	35,59	35,59	36,74
		Inf.	24,71	24,71	25,56	26,41	26,41	27,26
Gravimétrico Tremonha dosadora	δ (°)	Sup.	55,17	55,27	56,29	64,79	67,14	65,33
		Inf.	38,26	38,33	39,04	44,93	46,57	45,31
	φ_w (°) CDP 4666	Sup.	36,74	36,74	39,03	41,33	40,18	39,03
		Inf.	27,26	27,26	28,97	30,67	29,82	28,97
Volumétrico Tremonha dosadora	δ (°)	Sup.	54,32	53,14	55,50	63,77	66,13	63,77
		Inf.	37,68	36,86	38,50	44,23	45,87	44,23
	φ_w (°) CDP 4666	Sup.	36,74	36,74	39,03	41,33	40,18	39,03
		Inf.	27,26	27,26	28,97	30,67	29,82	28,97

4.2.3.2 Análise de resultados do projeto de pressões

Os comportamentos de pressões exibidos nos gráficos deste item representam as condições mais desfavoráveis para o dimensionamento estrutural das tremonhas. Uma seleção dos valores máximos de pressões foi realizada, dentre os resultados obtidos para cada amostra. Após cada gráfico, as equações referentes às pressões estão apresentadas em tabelas e devem ser utilizadas para definição do projeto estrutural das tremonhas. Estas são equações de pressão em função da altura da tremonha.

Sistema gravimétrico

O projeto de pressões em um sistema gravimétrico pode ser identificado pela intervenção de uma válvula intermediária, entre tremonhas. Sua operação durante enchimento e descarregamento tem influência no comportamento das pressões na interface entre as tremonhas.

Os resultados referentes a condição de enchimento nas tremonhas estão apresentados na Figura 4.29 e as equações na Tabela IV.14.

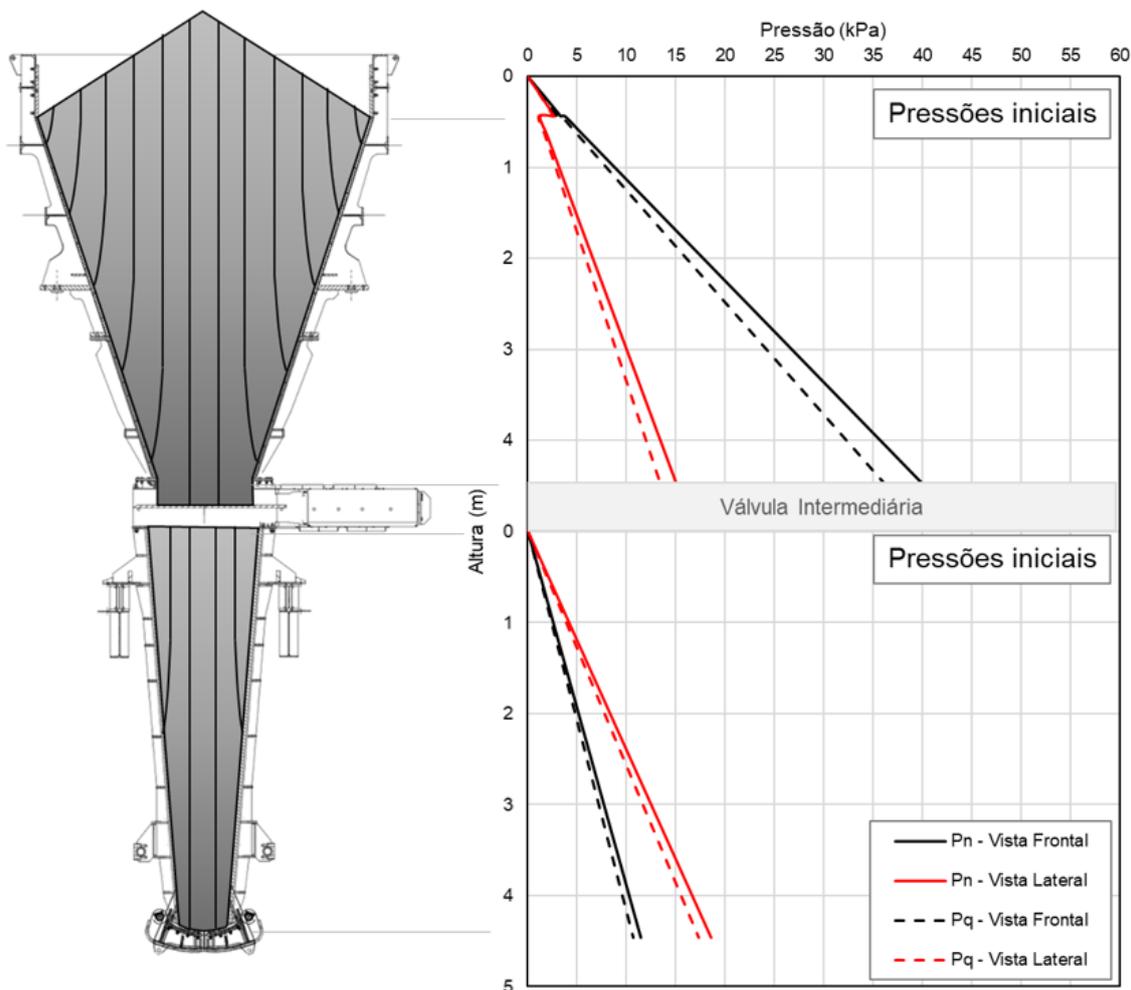


Figura 4.29 – Condição inicial nas tremonhas pulmão e dosadora para sistema gravimétrico.

Tabela IV.14 – Equações de pressões normais e cisalhantes em condição inicial nas tremonhas pulmão e dosadora para sistema gravimétrico.

Componente	Vista	Equação
Tremonha pulmão	Frontal	$P_{nhi} = 8,9624h - 0,135$
		$P_{qhi} = 8,1071h - 0,1266$
	Lateral	$P_{nhi} = 3,4216h - 0,0352$
		$P_{qhi} = 3,0428h - 0,035$
Tremonha dosadora	Frontal	$P_{nhi} = 2,568h$
		$P_{qhi} = 2,3882h$
	Lateral	$P_{nhi} = 4,1568h$
		$P_{qhi} = 3,8838h$

Quando a comporta dosadora é aberta para carregamento dos vagões, o campo de tensões na tremonha dosadora é alterado imediatamente. Onde havia pressões iniciais, neste momento aparecem as pressões de fluxo.

Os resultados estão apresentados na Figura 4.30 e as equações na Tabela IV.15.

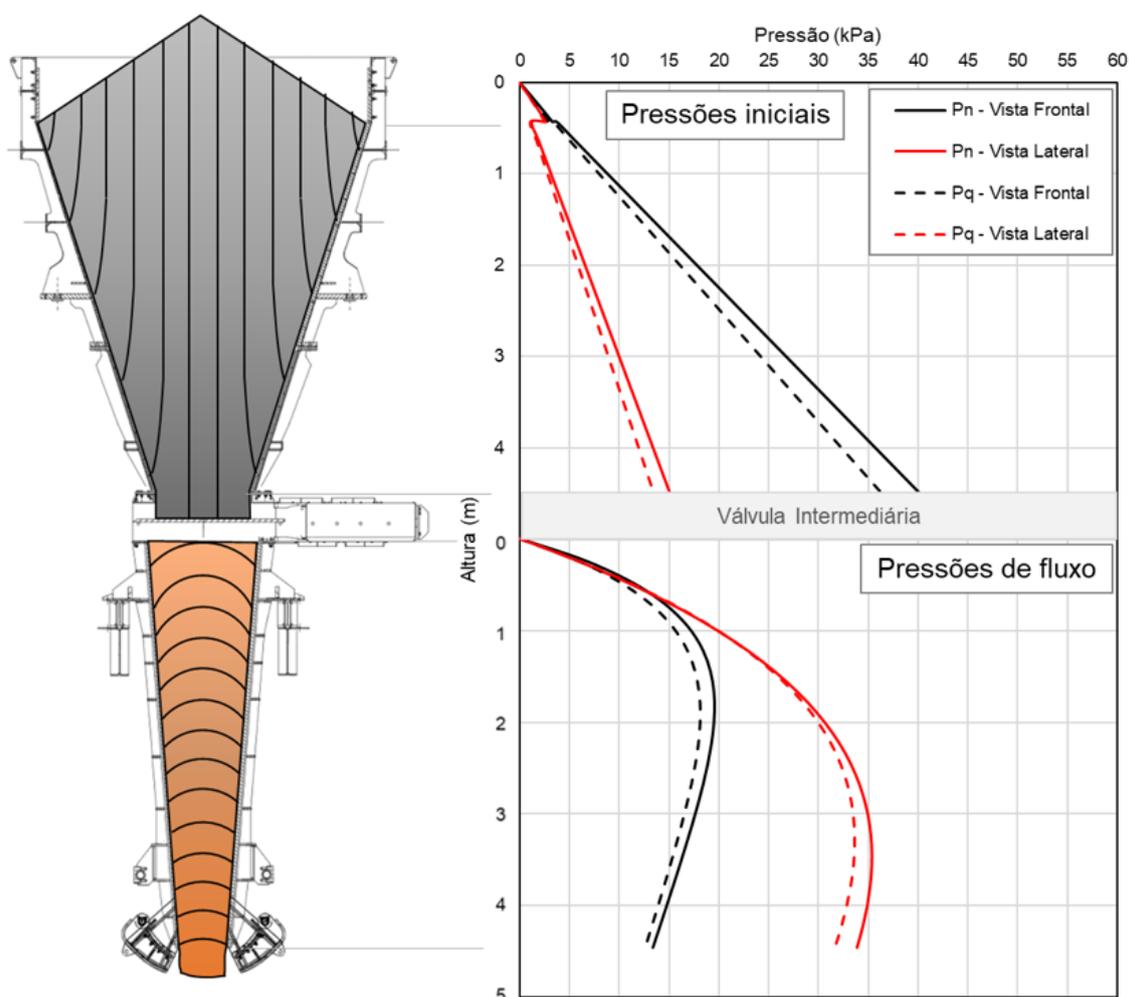


Figura 4.30 – Condição inicial e fluxo nas tremonhas pulmão e dosadora.

Tabela IV.15 – Equações de pressões normais e cisalhantes em condição inicial e fluxo nas tremonhas pulmão e dosadora.

Componente	Vista	Equação
Tremonha pulmão	Frontal	$P_{nhi} = 8,9624h - 0,135$ $P_{qhi} = 8,1071h - 0,1266$
	Lateral	$P_{nhi} = 3,4216h - 0,0352$ $P_{qhi} = 3,0428h - 0,035$
Tremonha dosadora	Frontal	$P_{nhf} = 0,933h^3 - 8,6765h^2 + 23,0366h + 1,327$ $P_{qhf} = 0,8196h^3 - 7,7455h^2 + 20,9874h + 1,065$
	Lateral	$P_{nhf} = 0,3239h^3 - 4,8341h^2 + 21,7946h + 0,087$ $P_{qhf} = 0,4221h^3 - 5,808h^2 + 24,3725h + 0,1434$

Após o descarregamento da tremonha dosadora, sua comporta é fechada para um novo enchimento, que ocorre quando a válvula intermediária é aberta, invertendo as condições

supracitadas.

Os resultados estão apresentados na Figura 4.30 e as equações na Tabela IV.16.

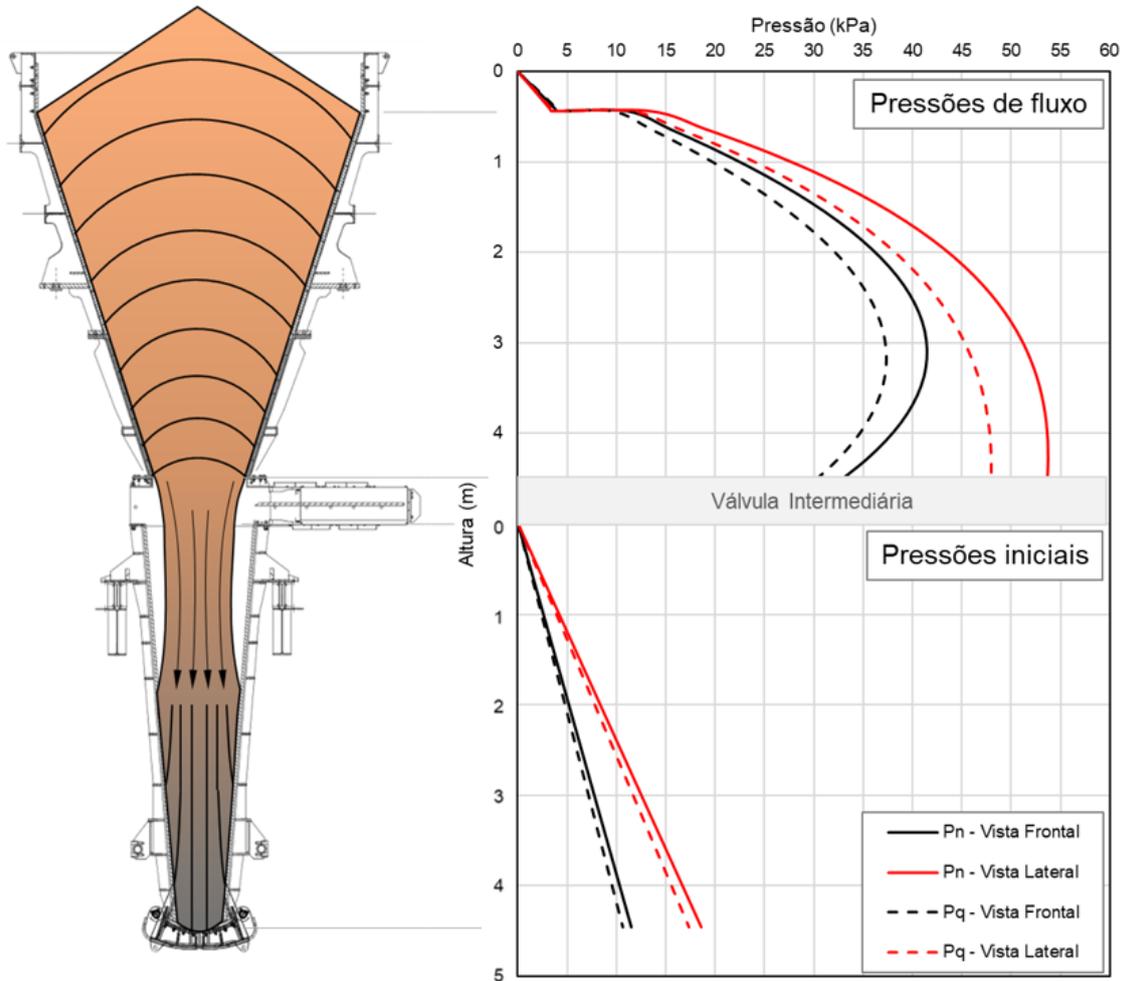


Figura 4.31 – Condição de fluxo e inicial nas tremonhas pulmão e dosadora.

Tabela IV.16 – Equações de pressões normais e cisalhantes em condição de fluxo e inicial nas tremonhas pulmão e dosadora.

Componente	Vista	Equação
Tremonha pulmão	Frontal	$P_{nhf} = -0,0216h^3 - 4,1233h^2 + 26,211h + 0,47$ $P_{qhf} = -0,0562h^3 - 3,3283h^2 + 22,783h + 0,391$
	Lateral	$P_{nhf} = 0,5551h^3 - 7,4856h^2 + 33,981h + 1,94$ $P_{qhf} = 0,4532h^3 - 6,2861h^2 + 29,472h + 1,488$
Tremonha dosadora	Frontal	$P_{nhi} = 2,568h$ $P_{qhi} = 2,3882h$
	Lateral	$P_{nhi} = 4,1568h$ $P_{qhi} = 3,8838h$

Sistema volumétrico

Com um funcionamento diferente, o projeto de pressões em um sistema volumétrico pode ser identificado pela válvula intermediária estar inoperante durante carregamento e descarregamento, permitindo a influência das sobrepressões resultantes da tremonha pulmão na tremonha dosadora.

Os resultados referentes a condição de enchimento nas tremonhas estão apresentados na Figura 4.32 e as equações na Tabela IV.17.

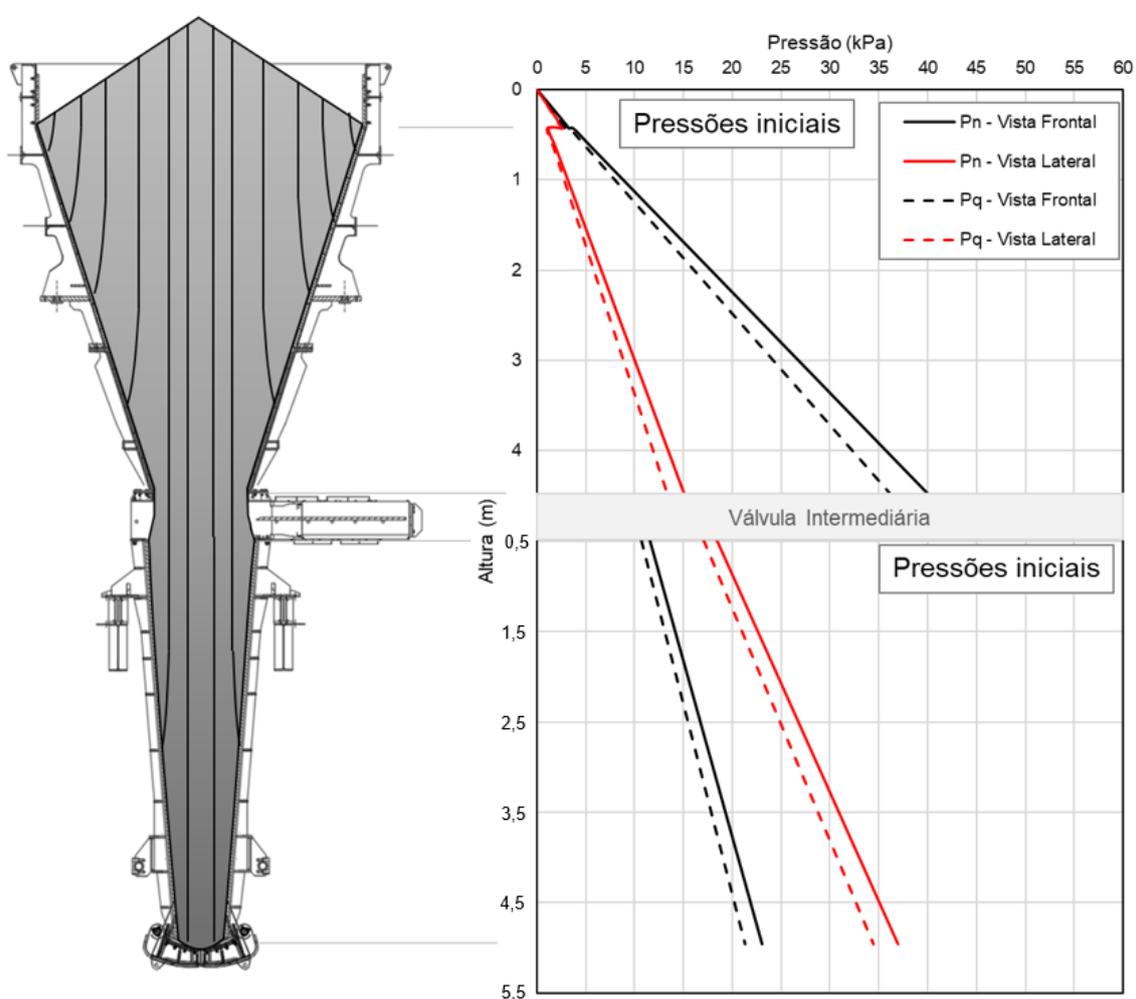


Figura 4.32 – Condição inicial nas tremonhas pulmão e dosadora para sistema volumétrico.

Tabela IV.17 – Equações de pressões normais e cisalhantes em condição inicial nas tremonhas pulmão e dosadora para sistema volumétrico.

Componente	Vista	Equação
Tremonha pulmão	Frontal	$P_{nhi} = 8,9624h - 0,135$ $P_{qhi} = 8,1071h - 0,1266$
	Lateral	$P_{nhi} = 3,4216h - 0,0352$ $P_{qhi} = 3,0428h - 0,035$
Tremonha dosadora	Frontal	$P_{nhi} = 2,568h + 10,2535$ $P_{qhi} = 2,3882h + 9,4554$
	Lateral	$P_{nhi} = 4,1568h + 16,3648$ $P_{qhi} = 3,8838h + 15,1614$

Com o objetivo de fazer um carregamento mais preciso em questão de volume, a automação do sistema garante que a comporta dosadora seja aberta e fechada no tempo correto, colocando o máximo de volume possível no vagão. Por este motivo o fluxo ocorre em todo o sistema.

Os resultados referentes a condição de fluxo simultâneo nas duas tremonhas estão apresentados na Figura 4.33 e as equações na Tabela IV.18.

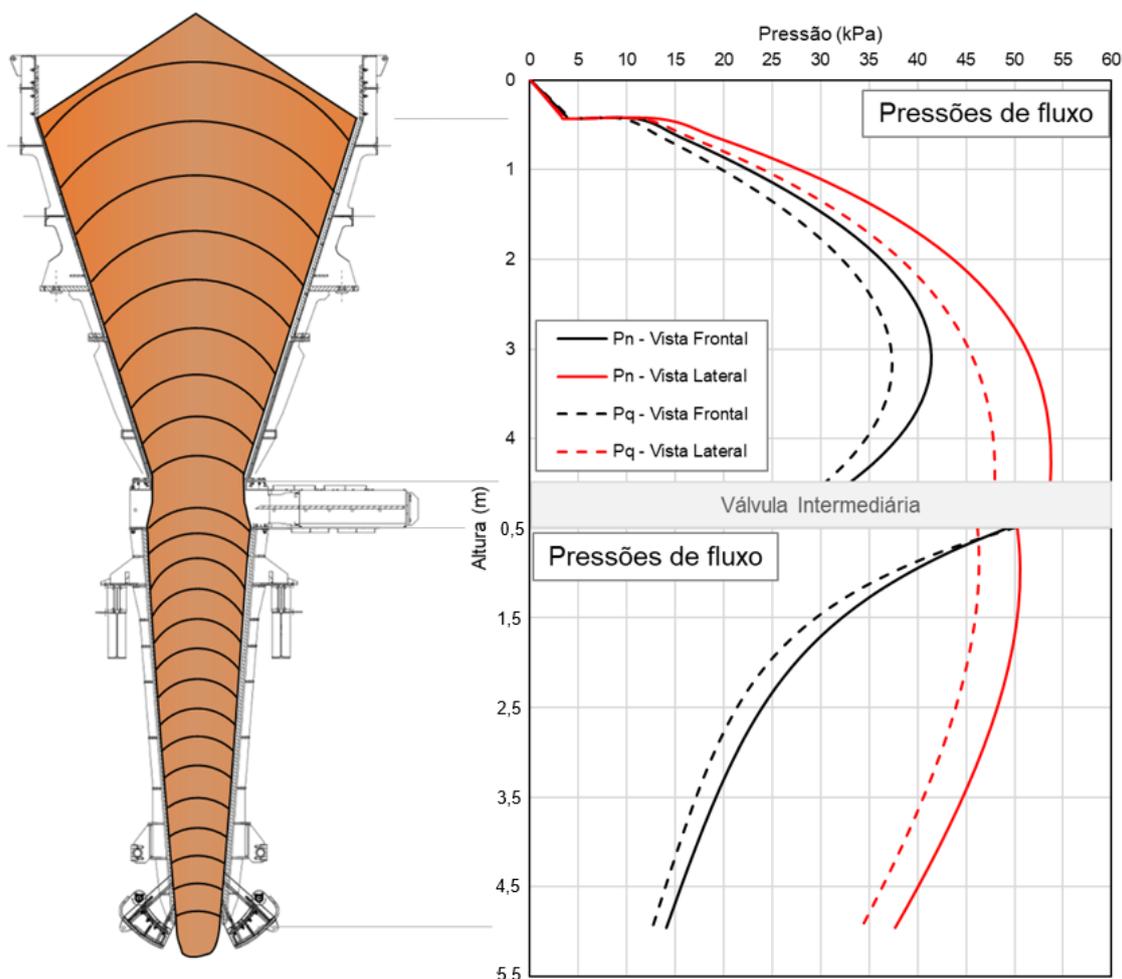


Figura 4.33 – Condição de fluxo nas tremonhas pulmão e dosadora.

Tabela IV.18 – Equações de pressões normais e cisalhantes em condição de fluxo nas tremonhas pulmão e dosadora.

Componente	Vista	Equação
Tremonha pulmão	Frontal	$P_{nhf} = -0,0216h^3 - 4,1233h^2 + 26,211h + 0,47$ $P_{qhf} = -0,0562h^3 - 3,3283h^2 + 22,783h + 0,391$
	Lateral	$P_{nhf} = 0,5551h^3 - 7,4856h^2 + 33,981h + 1,94$ $P_{qhf} = 0,4532h^3 - 6,2861h^2 + 29,472h + 1,488$
Tremonha dosadora	Frontal	$P_{nhf} = -0,5463h^3 + 6,263h^2 - 27,175h + 61,044$ $P_{qhf} = -0,7713h^3 + 8,495h^2 - 33,644h + 64,043$
	Lateral	$P_{nhf} = 0,0784h^3 - 1,3576h^2 + 2,4516h + 49,374$ $P_{qhf} = 0,0685h^3 - 1,1844h^2 + 1,9092h + 45,517$

Onde:

P_n : Pressão normal à parede

P_q : Pressão de cisalhamento na parede

P_{nhi} : Pressão normal à parede na condição inicial

P_{qhi} : Pressão de cisalhamento na parede na condição inicial

P_{nhf} : Pressão normal à parede na condição de fluxo

P_{qhi} : Pressão de cisalhamento na parede na condição de fluxo

4.2.3.3 Discussão sobre os resultados do projeto de pressões em tremonhas

A partir dos dados analisados, o minério de ferro IO-C se destaca por apresentar os maiores valores de pressões nos resultados. Este fato ocorre pela sua maior densidade aparente, ρ_b , em relação ao minério de ferro IO-B, como demonstrado na Figura 4.17. A densidade aparente é diretamente proporcional as pressões atuantes na tremonha, conforme apresentado nas equações 2.47, 2.48 e 2.51.

Devido a operação da válvula intermediária no sistema gravimétrico, as pressões atuantes na transição, válvula intermediária/silo dosador, apresentam valores próximos de zero. Quando o sistema volumétrico é analisado, observa-se que esta região é a mais afetada para condição de fluxo, isto é causado pela sobrepressão atuante.

5 – CONCLUSÕES

Alguns dos maiores desafios no campo de manuseio de produtos a granel é conciliar os critérios e restrições de projeto, os requisitos operacionais do sistema e ao mesmo tempo garantir o fluxo desejado.

Existem poucas pesquisas nesta área de atuação e foi observado que o entendimento sobre o comportamento do produto armazenado por meio de uma apropriada caracterização é o primeiro passo para o correto desenvolvimento de um projeto de fluxo e pressões em tremonhas. Uma análise computacional por meio de uma ferramenta de trabalho é indispensável para a visualização do comportamento de fluxo e identificação de pontos críticos.

Vale ressaltar, que atender todos os critérios de projeto simultaneamente não é sempre possível e que ponderações e novas análises são muitas vezes necessárias para tomar a decisão final.

5.1 Em relação ao minério de ferro para armazenamento

Como relatado, o minério de ferro possui características peculiares quando comparado a outros produtos de armazenamento. Observa-se que o alto valor de densidade aparente é benéfico ao projeto de fluxo, o que permite dimensões limites de abertura de saída da tremonha menores dentro desta comparação. Porém, as pressões na parede do componente são maiores, por serem diretamente proporcionais a densidade aparente, levando a estruturas mais robustas e reforçadas.

O produto de minério de ferro tem diferentes distribuições granulométricas e diferentes características em relação a mineralogia. Foi observado que estas variações têm grande influência no comportamento de fluxo.

Outra característica do minério de ferro está relacionada a sua abrasividade e uma análise do material de desgaste da parede deve ser realizada com foco na taxa de desgaste e sua influência no comportamento do fluxo.

5.2 Em relação ao projeto de fluxo em tremonhas piramidais

Foi evidenciado que os testes de caracterização medem a capacidade de reação do produto a granel submetido a uma determinada tensão de consolidação. E que as propriedades de fluxo, obtidas por meio destes testes, são análogas a resistência de falha ao cisalhamento, que foi chamada de resistência coesiva.

As verificações e comparativos dos resultados obtidos apresentam similaridades com as teorias existentes apresentadas na revisão bibliográfica. Desta forma, conclui-se que os principais fatores, estudados neste trabalho, que influenciam no fluxo do minério de ferro em tremonhas são:

- Teor de umidade;
- Tempo de armazenamento;
- Maiores ângulos de atrito com a parede em função do material selecionado;
- Distribuição granulométrica;
- Características mineralógicas.

A partir das análises dos resultados, pode-se concluir também que o atrito com a parede pode ser reduzido com a redução do teor de umidade. E observou-se que a pressão normal à parede da tremonha, σ_w , é reduzida à medida que os sólidos a granel fluem em direção a saída.

5.3 Em relação ao projeto de pressões em tremonhas piramidais

O entendimento dos campos de tensões atuantes nas tremonhas é de extrema importância para o correto projeto de pressões. Analisando o comportamento, as pressões atuantes nas paredes da tremonha, para condição de enchimento, tendem a serem maiores nas proximidades da boca de descarga. O comportamento é oposto para a condição de fluxo.

Fica evidente, no projeto de pressões apresentado, que, a escolha do sistema e sua forma de operação ocasiona significantes mudanças de pressões normais iniciais e de fluxo nas paredes das tremonhas, bem como a forma de operar as válvulas do sistema. Por este motivo as propriedades de fluxo do produto armazenado, a garantia de fluxo desejado para as geometrias propostas, o tipo de sistema e como operá-lo devem ser muito bem detalhados e conhecidos antes da realização de um projeto de pressões.

5.4 Sugestão para trabalhos futuros

Como continuidade do trabalho, recomenda-se um trabalho experimental de tremonhas-piloto subsequentes, instrumentadas para avaliação real em operação do comportamento de fluxo do minério de ferro.

Sugere-se pesquisar o comportamento do fluxo obtido nas tremonhas durante abertura e fechamento de comportas. Cabe avaliar os diferentes tipos de comportas e válvulas aplicáveis. Considera-se relevante, também, um estudo sobre a influência da diferença de granulometria dos produtos de minério de ferro sobre as pressões nas paredes de tremonhas e compará-las aos resultados obtidos pelas normas internacionais.

Sugere-se também um estudo aprofundado das melhores formas de definição dos coeficientes de variação das propriedades do minério de ferro em função da granulometria.

Por fim, um estudo da influência do polimento da superfície do revestimento da parede de tremonhas e avaliação de vida útil.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, E. C. **Estudo teórico e experimental de tremonhas piramidais para silos metálicos elevados**. 1997. 318f. Tese (Doutorado) – Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
- ARNOLD, P. C.; McLEAN, A. G. An analytical solution for stress function at the wall of converging channel. **Powder Technology**, Wollongong, v. 13, p. 255-260, 1976.
- ARNOLD, P. C.; McLEAN, A. G.; ROBERTS, A. W. Determination of flow properties of bulk solids. In: ROBERTS, A. W. **Storage, flow and handling of bulk solids**. 1. Ed. Newcastle, The University of Newcastle, 1987. Cap 3, p.13-41.
- AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3774**: Loads on bulk solids containers. Homebush: Standards association of Australia, 1996. 81p.
- BHAGAT, R. P. **Agglomeration of iron ores**. 1. Ed. Boca Raton: CRC Press, 2019. 416p. ISBN 978-1-138-03508-9
- BENINK, E. J. **Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes**. 1989. 162f. Tese (Doutorado) – Engenharia Civil, The University of Twente, Enschede, 1989.
- CALIL Jr., C.; CHEUNG, A. B. **Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo**. 1. Ed. São Carlos: EESC – USP, 2007. 232p. ISBN 978-85-85205-71-3
- CALIL Jr., C. **Recomendações de fluxo e cargas para projeto em silos verticais**. São Carlos: EESC – USP, 1990. 199p.
- CALIL Jr., C. **Sobrepresiones em las paredes de los silos para almacenamiento de 147rodutos pulverulentos cohesivos**. 1982. 315f. Tese (Doutorado) – Engenharia Industrial, Universidade Politecnica de Barcelona, Barcelona, 1982.
- CHEN, W.; ROBERTS, A. W. A modified flowability classification model for moist and cohesive bulk solids. **Powder Technology**, Callaghan, v. 325, p. 639-650, 2017.
- CHEUNG, A. B. **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos**. 2007. 333f. Tese (Doutorado) – Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- CONVEYOR EQUIPMENT MANUFACTURERS ASSOCIATION. **CEMA STANDARD 550**: Classification and definitions of bulk materials. Naples: Conveyor Equipment Manufacturers Association, 2003. 80p.
- DUARTE, R. A. **Aplicação de simulação dinâmica para suporte à decisão de alterações físicas e de controle em processos de cominuição**. 2021. 120f. Dissertação (Mestrado) –

Engenharia de Controle e Automação de Processos Mineraiis, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

ENSTAD, G. On the theory of arching in mass flow hoppers. **Chemical Engineering Science**, Bergen, v. 30, p. 1273-1283, 1975.

EUROPEAN STANDARD. **EN 1991-4**: Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks. Brussels: European Committee for Standardization, 2006. 107p.

FELICETTI, M. A. **Determinação da força de adesão entre partículas e uma superfície aplicando a técnica centrífuga**. 2004. 174f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

GAYLORD Jr., E. H.; GAYLORD, C. N. **Design of steel bins for storage of bulk solids**. New Jersey: Prentice-Hall, INC., 1984, 359p. ISBN 0-13-201368-1

GELDART, D.; ABDULLAH, E. C.; HASSANPOUR, A.; NWOKE, L. C.; WOUTERS, I. Characterization of powder flowability using measurement of angle of repose. **China particuology**, Kuala Lumpur, v. 4, no. 3-4, p. 104-107, 2006.

GUO, J.; ROBERTS, A. W.; WILLIAMS, K.; JONES, M.; CHEN, B.; GUO, J. Y. Simulation investigation of flow patterns and feeder loads at hopper/feeder interface. **Conference Proceedings Iron Ore 2017**, Perth, 2017, paper n. 56, 21p.

HAAKER, G. **An introduction to the storage of bulk solids in silos**. Netherland: University of Twente, 1999, 46p.

JANSSEN, H. A. Versuche über Getreidedruck in Silozellen. **Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure**, Bremen, v. 39, p. 1045-1049, 1895.

JENIKE, A. W.; JOHANSON J. R.; CARSON J. W. Bin loads – Part 2: Concepts. **Journal of engineering for industry**, ASME, Burlington, v. 95, p. 6-12, 1973a.

JENIKE, A. W.; JOHANSON J. R.; CARSON J. W. Bin loads – Part 3: Mass-flow bins. **Journal of engineering for industry**, ASME, Burlington, v. 95, p. 13-20, 1973b.

JENIKE, A. W. **Gravity flow of bulk solid**, Bulletin No. 108, v. 52, no. 29, Salt Lake, University of Utah, 1961.

JENIKE, A. W. **Storage and flow of solids**, Bulletin No. 123, v. 53, no. 26, Salt Lake, University of Utah, 1964.

KETCHUM, M. S. **The design of walls, bins and grain elevators**. 2. Ed. New York: The engineering news publishing company, 1911. 580p.

KRULL, T.; WILLIAMS, K.; DONOHUE, T.; ILIC D. The importance of iron ore characterization and DEM modelling in materials handling applications with a focus on wear. In: **Ironmaking and raw mineral technology seminar**, 44, 2014, Belo Horizonte. Redução

- de Minério de ferro & Tecnologia Mineral, Belo Horizonte, 2014. P.91-102.
- LU, L. **Iron Ore: Mineralogy, processing and environmental sustainability**. 2. Ed. Brisbane: Woodhead Publishing, 2022. 822p. ISBN: 978-0-12-820226-5
- McGLINCHEY, D. Bulk property characterization. In: _____. **Characterization of bulk solids**. 1. Ed. Glasgow, Blackwell Publishing, 2005. Cap 2, p. 48-84.
- McLEAN, A. G. Initial stress fields on converging channels. **Bulk solids handling**, Wollongong, v. 5, p. 431-436, 1985.
- MICHALOWSKI, R. L. Flow of granular material through a plane hopper. **Powder technology**, Minneapolis, v. 36, p. 29-40, 1984.
- MICHALOWSKI, R. L. Strain localization and periodic fluctuations in granular flow process form hoppers. **Geotechnique**, Baltimore, v. 40, no. 3, p. 389-403, 1990.
- MOHAJERI, M. J.; BOS, M. J.; RHEE, C. SCHOTT, D. L. Bulk properties variability and interdependency determination for cohesive iron ore. **Powder Technology**, Delft, v. 367, p. 539-557, 2020.
- MOORE, B. A.; ARNOLD, P. C. An alternative presentation of design parameters for mass flow hoppers. **Powder Technology**, Wollongong, v. 42, p. 79-89, 1985.
- O'SHEA J. **Introduction to materials testing: Flow properties end other tests**. Newcastle: TUNRA Bulk Solids, 2022, 70 slides, color.
- PALMA, G. **Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d \geq 1,5$)**. 2005. 109f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- ROBERTS, A. W. **Bins wall loads**. Newcastle: Lectures Note. Centre for Bulk Solids and Particulate Technologies, 2022, 38f.
- ROBERTS, A. W. **Bulk solids handling – Recent developments and future directions**, Newcastle: The institution of engineers Australia, 1991, 78p.
- ROBERTS, A. W. Characterization for hopper and stockpile design. In: McGLINCHEY, D. **Characterization of bulk solids**. 1. Ed. Glasgow, Blackwell Publishing, 2005. Cap 3, p. 85-131.
- ROBERTS, A. W. Developments in silo design for the safe and efficient storage and handling of grain. In: PROCEEDINGS OF THE 6th INTERNATIONAL WORKING CONFERENCE ON STORED-PRODUCT PROTECTION. **Proceedings**. Camberra, v.1, p.259-280, 1994.
- ROBERTS, A. W. Review of mass-flow hopper design with respect to stress fields and surcharge loads, **Particuology**, Newcastle, v. 8, p. 591-594, 2010.
- ROBERTS, A. W.; SHEN, J.; BEH, B.; CHEN, B.; DONOHUE, T. Study of gate loads related to stress states in mass-flow bins during bulk solids filling and settlement. **Advanced**

- Powder Technology**, Callaghan, v. 32, p. 683-692, 2021.
- SCHULZE, D. **Powders and Bulk Solids: behavior, characterization, storage and flow**. 2.ed. Cham: Springer. 2021, 625p. ISBN 978-3-030-76719-8
- SCHWEDES, J. Consolidation and flow of cohesive bulk solids. **Chemical Engineering Science**, Braunschweig, v. 57, p. 287-294, 2002.
- TEJCHMAN J. **Confined granular flow in silos: Experimental and numerical investigations**. 1.ed. Gdansk: Springer, 2013. 502p. ISBN 978-3-319-00317-7
- THOMSON, F. M. Storage of particulate solids. In: FAYED, M. E.; OTTEN L. **Handbook of powder science & technology**. 2. Ed. New York, Chapman & Hall, 1997. Cap 8, p. 389-486. ISBN 0-412-99621-9
- WALKER, D. M. An approximate theory for pressures and arching in hoppers, **Chemical Engineering Science**, Portishead, v. 21, p. 975-997, 1966.
- WALTERS, J. K. A theoretical analysis of stresses in axially-symmetric hoppers and bunkers. **Chemical Engineering Science**, Nottingham, v. 28, p. 779-789, 1973b.
- WALTERS, J. K. A theoretical analysis of stresses in silos with vertical walls. **Chemical Engineering Science**, Nottingham, v. 28, p. 13-219, 1973a.
- WANG, Z. **An investigation of flowability and compaction of iron ore fines**. 2015. 103f. Dissertação (Mestrado) – Materials Science and Engineering, The University of South Wales, Sydney, 2015.
- WORDSTEEL ASSOCIATION. **Statistical reports**. 2021. Disponível em: <<https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook/>>. Acesso em: 10 maio 2022.

APÊNDICE I – FERRAMENTA DE TRABALHO M. HOPPER

Uma ferramenta de trabalho, denominada M. Hopper, foi desenvolvida, neste trabalho para realizar os seguintes procedimentos:

- Organizar e parametrizar as propriedades de fluxo do minério de ferro armazenado;
- Definir os limites máximos de ângulo da tremonha, α , em função das dimensões mínimas de saída da tremonha, B, para garantia de fluxo de massa, por meio de representação gráfica;
- Avaliar o padrão de fluxo para um projeto de tremonha existente;
- Determinar a distribuição das pressões normais e cisalhantes na parede da tremonha e do corpo do silo, informando a equação $P(h)$ para cada estado de tensão existente;
- Determinação da distribuição das pressões para até 4 tremonhas subsequentes.

A ferramenta de trabalho foi implementada na linguagem de programação VBA no Microsoft Excel. A vantagem da utilização deste software é a utilização de componentes visuais em conjunto com a programação. Desta forma, o manuseio da ferramenta é simplificado, sendo de fácil interpretação.

As principais telas da ferramenta de trabalho serão apresentadas a seguir. A página inicial, para inserção de informações gerais do projeto, está apresentada na Figura A.1.

Figura A.1 – Página inicial.

O desenvolvimento da ferramenta de trabalho seguiu a mesma sequência descrita na revisão bibliográfica, métodos e resultados, iniciando com as propriedades de fluxo, posteriormente o

projeto de fluxo e por fim o projeto de pressões.

Os dados de entrada das propriedades de fluxo são inseridos na tela “Produto”, conforme apresentado na Figura A.2.

Observa-se a disposição das demais páginas, para inserção das demais propriedades, na parte superior desta tela.

Figura A.2 – Propriedades de fluxo.

Por meio dos limites de ângulos da tremonha, α , e dimensão de abertura de saída, B, o padrão de fluxo pode ser definido como apresentado na Figura A.3.

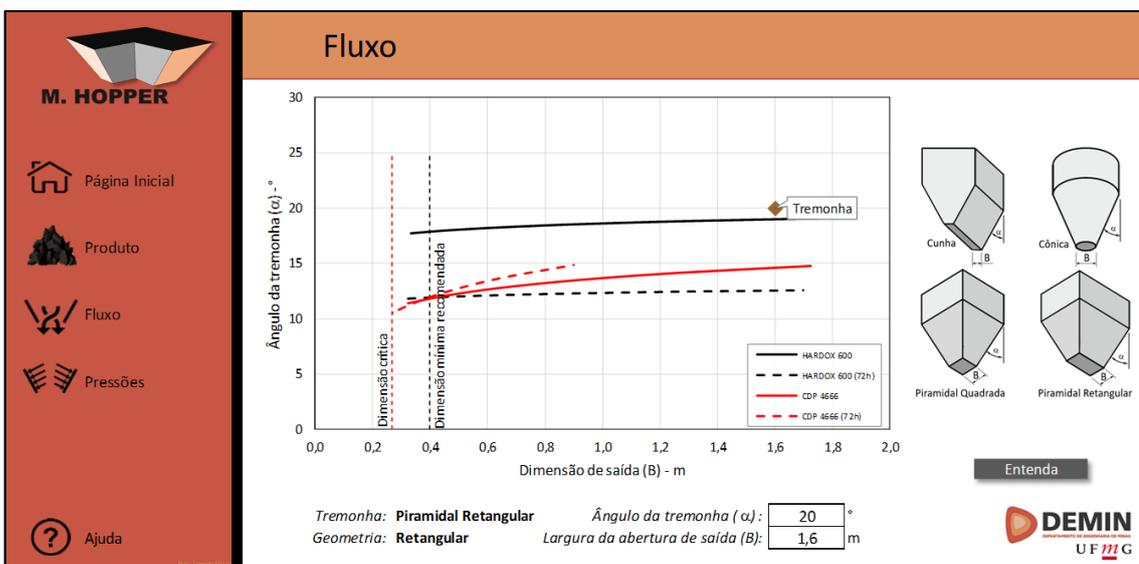


Figura A.3 – Projeto de fluxo.

Como destacado anteriormente, a análise de pressões permite uma avaliação de até 4 tremonhas subsequentes, na tela de “Pressões – Informações Gerais” é possível definir a quantidade de seções (silos/tremonhas) a serem avaliadas, conforme apresentado na Figura A.4.

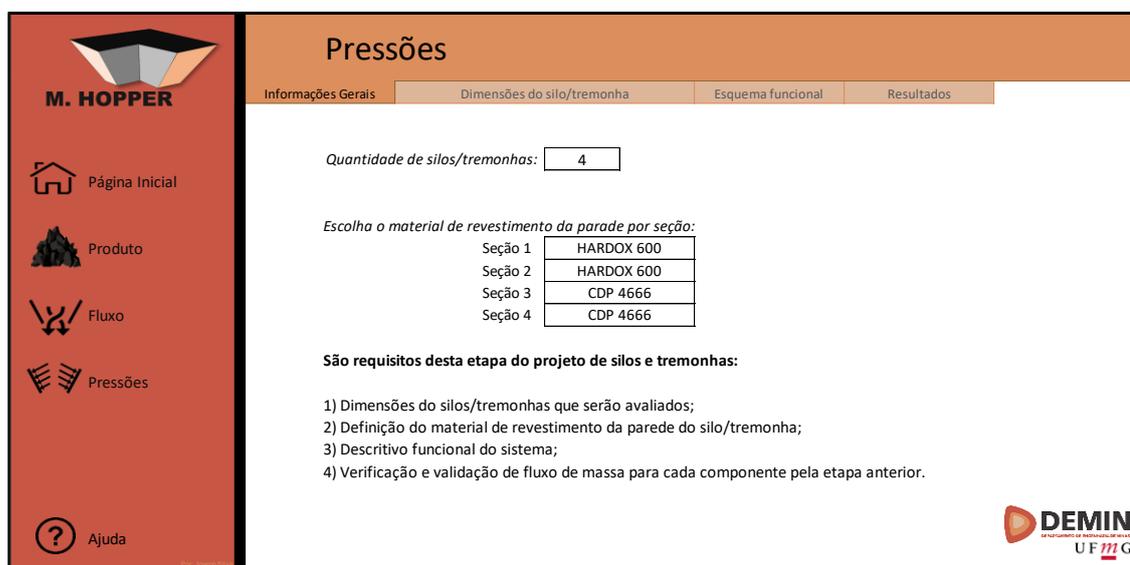


Figura A.4 – Projeto de pressões – Informações Gerais.

As dimensões referentes ao silo/tremonha são inseridas na tela apresentada na Figura A.5.

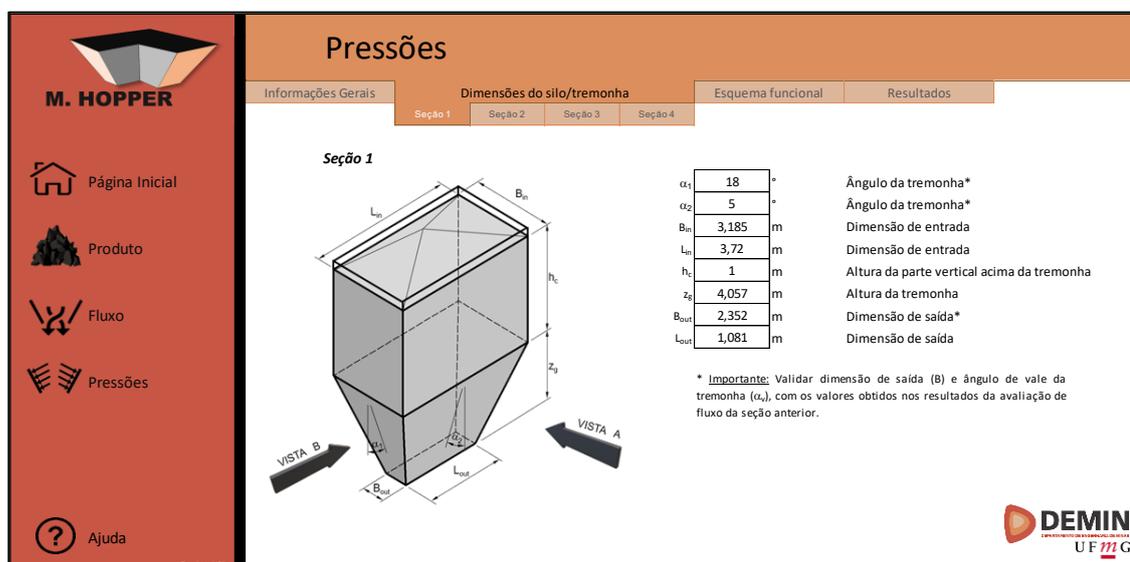


Figura A.5 – Projeto de pressões – Dimensões.

Um esquema funcional, com representação da geometria definida por seção, é apresentado na Figura A.6. Nesta mesma tela, é possível definir as posições de válvulas ou comportas operacionais entre seções.

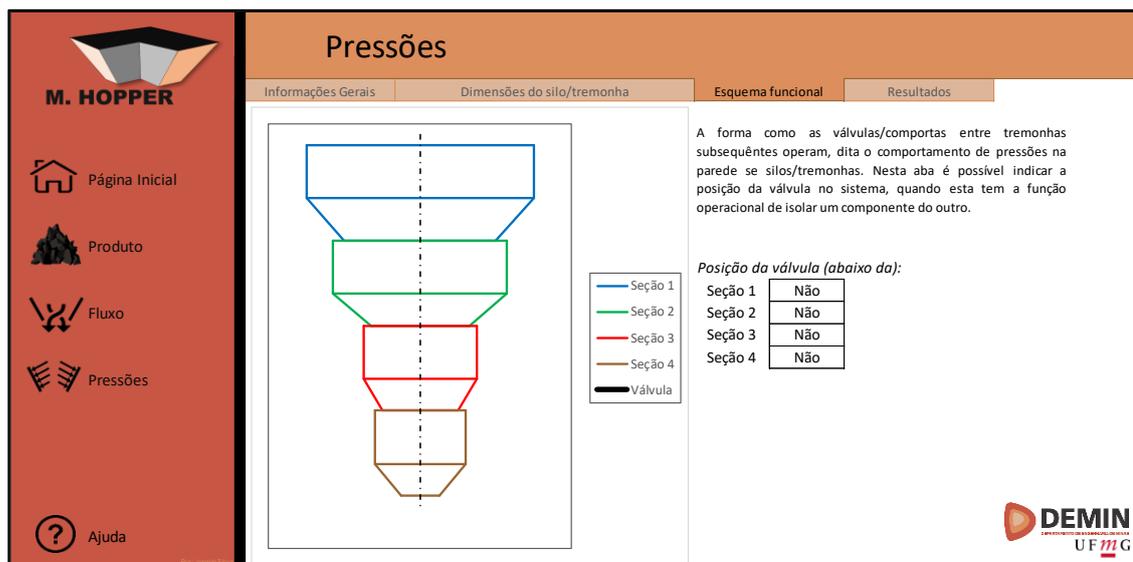


Figura A.6 – Projeto de pressões – Esquema Funcional.

Por fim, após parametrização das propriedades de fluxo, garantia de fluxo de massa por meio do projeto de fluxo e condições operacionais do sistema definidas, as equações das pressões atuantes nas paredes dos componentes em função da altura são apresentadas, como na Figura A.7.

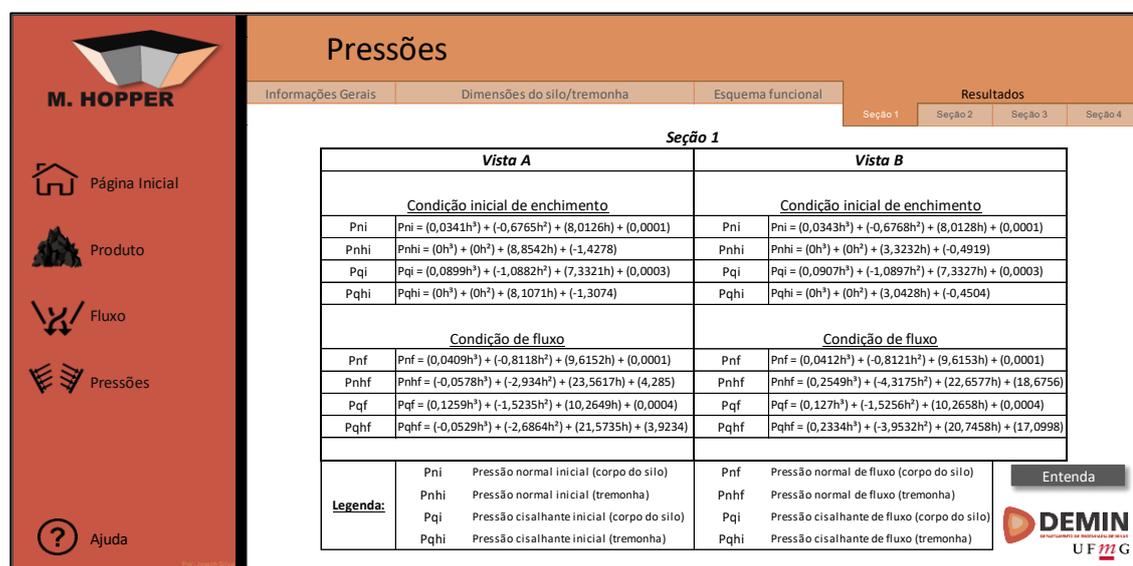


Figura A.7 – Projeto de pressões – Resultados.