



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FLUXO DA
LAMA VERMELHA PARA FINS DE DIMENSIONAMENTO DE
SILOS – APLICAÇÃO PARA TREMONHAS CÔNICAS**

UFPA / CT / PPGEM

Belém

2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FLUXO DA
LAMA VERMELHA PARA FINS DE DIMENSIONAMENTO DE
SILOS – APLICAÇÃO PARA TREMONHAS CÔNICAS**

JÚLIO CÉSAR MENDES LOBATO

Trabalho submetido à banca examinadora aprovada pelo colegiado do curso de mestrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

UFPA / CT / PPGEM

Belém

2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Lobato, Júlio César Mendes, 1971-
Caracterização das propriedades de fluxo da
lama vermelha para fins de dimensionamento de
silos aplicação para tremonhas cônicas /
Júlio César Mendes Lobato. - 2013.

Orientador: André Luiz Amarante Mesquita.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belém,
2013.

1. Silos. 2. Cerâmica - Indústria. I. Título.
CDD 23. ed. 633.20868

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FLUXO DA
LAMA VERMELHA PARA FINS DE DIMENSIONAMENTO DE
SILOS – APLICAÇÃO PARA TREMONHAS CÔNICAS**

JÚLIO CÉSAR MENDES LOBATO

Orientador:

Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita (UFPA)

UFPA / CT / PPGEM

Belém

2013

Júlio César Mendes Lobato

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FLUXO DA LAMA VERMELHA
PARA FINS DE DIMENSIONAMENTO DE SILOS – APLICAÇÃO PARA
TREMONHAS CÔNICAS**

Dissertação apresentada para a
obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica do Instituto de
Tecnologia da Universidade Federal
do Pará. Área de Concentração em
Térmicas e Fluidos.

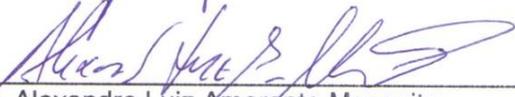
Data de aprovação: 07 de outubro de 2013.

Banca examinadora:



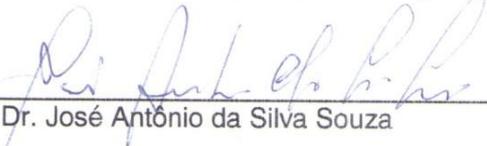
Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita

-- Orientador
PPGEM/ITEC/UFPA



Prof. Dr. Alexandre Luiz Amarante Mesquita

-- Membro Interno
PPGEM/ITEC/UFPA



Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza

-- Membro Externo ao PPGEM
FEQ/ITEC/UFPA



Prof.ª Dr.ª Maria Lúcia Pereira Antunes

-- Membro Externo ao Programa
UNESP-Sorocaba/SP

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que sem ele nada seria possível, a minha mãe e a todos os meus irmãos que nos momentos mais difíceis de minha vida sempre estiveram ao meu lado dando orientação e apoio. A todos os meus amigos do curso de pós - graduação que me ajudaram na elaboração deste trabalho, e ao professor e amigo André Mesquita pela benevolência que mostrou para comigo. E em especial ao meu velho pai que de acordo com a vontade de Deus não está mais ao meu lado para compartilhar essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado oportunidade, inteligência e sabedoria para sair vitorioso desse desafio.

Aos meus familiares que compartilham dos meus sucessos e estão sempre dispostos a me ajudar e um agradecimento especial a minha mãe pela educação que me proporcionou.

Aos professores André Mesquita e Alexandre Mesquita pela contribuição que me deram para o desenvolvimento desse trabalho e pela motivação nos momentos difíceis da elaboração deste trabalho.

A empresa SOLVE Engenharia pela estrutura do laboratório concedido para realização dos ensaios de cisalhamento, controle de úmida e vazão de massa do produto Lama vermelha.

A meus colegas, todos de suma importância no decorrer do curso, que se eu não citar pelo menos alguns com certeza serei injusto. Não poderia deixar de me lembrar do Charles, Kate, Hugo, Rita, Husen e Jonni colegas pra lá de gente boa, que sempre compartilharam as emoções e as atividades do curso juntos comigo.

A todos os professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica dos quais tive oportunidade de ser aluno, em especial ao professor Alexandre Mesquita e a professora Danielle, enfim todos são muito especiais, para quem não citei os nomes, por favor, me perdoem. Saibam que todos têm um lugar garantido no meu coração e que levarei todos comigo para sempre.

“É um paradoxo a terra se mover ao redor do sol e a água, ser constituída por dois gases altamente inflamáveis. A verdade científica é sempre um paradoxo, se julgada pela experiência cotidiana que se agarra à aparência efêmera das coisas”.

Karl Marx (1818 – 1883).

RESUMO

Um dos fatores que afetam o fluxo de produtos sólidos em silos é o teor de umidade, o qual se destaca por favorecer a formação de arcos coesivos. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho focou a determinação das propriedades de fluxo do produto lama vermelha e sua classificação quanto à sua escoabilidade em função da variação do teor de umidade. Tendo os teores de umidade influência no escoamento em tremonhas cônicas revestidas de chapas metálicas lisas e UHMW (Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular). Nesse intuito se utilizou o aparelho de cisalhamento direto “Jenike Shear Cell”, juntamente com três superfícies (acrílico, metálica e de UHMW) de parede. Para determinar o fator de fluxo da tremonha e o ângulo de inclinação com a horizontal, recorreu-se a metodologia gráfica proposta por Jenike para fluxo mássico. E na determinação do diâmetro mínimo da moega, aplicaram-se as equações propostas por Jenike e Enstad. Verificou-se que a lama vermelha é coesiva e possui fluxo do tipo difícil, com pouca variação para os teores de umidades estudados. A rugosidade das paredes testadas teve uma suave influência na inclinação da tremonha. Enquanto os resultados do diâmetro da moega sofreram variação em relação aos níveis de umidade analisados para a lama vermelha. A partir das observações feitas para o escoamento no silo modelo de acrílico se verificou que a medida que se eleva o teor de umidade mais difícil se torna o fluxo do produto lama vermelha.

Palavras-chave: Propriedades de Fluxo, Silos, Lama Vermelha.

ABSTRACT

One of the factors that affect the flow of bulk solids in silos is the moisture content, which stands out by favoring the formation of cohesive arches. In this sense, the aim of this work focused on determining the flow properties of the product red mud and its classification as to its flowability due to the variation of moisture content. Having the moisture influence on the flow in conical hoppers lined with smooth metal plates and UHMW (Ultra High Weight Polyethylene molecular). To that end we used the direct shear apparatus "Jenike Shear Cell", along with the two wall surfaces. To determine the factor flow from the hopper and the angle of inclination to the horizontal, we used the graphics methodology proposed by Jenike for mass flow. And in determining the minimum diameter of the hopper, we applied the equations proposed by Jenike and Enstad. It was found that red mud is cohesive and has flow type hard with little variation for levels of moisture studied. The roughness of parades tested had a mild influence on the slope of the hopper. While the results of diameter variation experienced hopper relative moisture levels analyzed for red mud. From the observations made to flow in the silo acrylic model has been found that it rises to the level of moisture becomes more difficult the flow of red mud product.

Keywords: Flow Properties, Silo, Red Mud.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS E QUADROS.....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 Objetivo geral.....	4
1.2.2 Objetivo específico.....	4
1.3 METODOLOGIA.....	4
1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	5
CAPÍTULO 2.....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 LAMA VERMELHA	7
2.2 SILOS.....	9
2.3 CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO EM TREMONHAS – CÔNICAS.....	10
2.4 PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS DE SÓLIDOS GRANULARES.....	13
2.4.1 Massa específica (ρ) e Peso específico (γ).....	14
2.4.2 Granulometria.....	15
2.4.3 Ângulo de atrito interno (ϕ_i) e Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e).....	16
2.4.4 Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w).....	20
2.4.5 Ângulo de repouso (δ_r)	21
2.4.6 Umidade (w%).....	22
2.4.7 Função de Fluxo (FF).....	23
2.4.8 Índice de escoabilidade (ff).....	24
2.4.9 Fator de fluxo da tremonha (ff_c).....	25
2.5 VAZÃO DE SÓLIDOS PARTICULADOS EM SILOS.....	27

CAPÍTULO 3	29
3. DIMENSIONAMENTO DE TREMONHAS CÔNICAS - FLUXO MÁSSICO.....	29
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	29
3.2 TIPOS DE FLUXO.....	29
3.2.1 Fluxo de massa	30
a) Como ocorre o fluxo de massa.....	30
b) Condição necessária para obtenção do fluxo de massa.....	31
3.2.2 Fluxo de funil	32
3.2.3 Fluxo misto	33
3.3 TEORIAS DO ARQUEAMENTO EM TREMONHAS.....	33
3.4 DIMENSIONAMENTO DE TREMONHAS.....	35
3.4.1 Abordagem de Jenike	35
3.4.2 Abordagem de Enstad	38
CAPÍTULO 4	41
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	41
4.1 PROPRIEDADES DE FLUXO E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	41
4.1.1 Determinação da massa específica aparente e ângulo de repouso	41
4.1.2 Determinação da umidade e granulometria	42
4.1.3 Ensaios em célula de cisalhamento do tipo Jenike	43
4.1.3.1 Metodologia de ensaio	45
4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA O ESCOAMENTO NO SILO MODELO	48
4.2.1 Procedimento para determinação do diâmetro de descarga - silo modelo	48
4.3 PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS EM UM RESULTADO.....	52
CAPÍTULO 5	53
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1 MASSA ESPECÍFICA, ÂNGULO DE REPOUSO E GRANULOMETRIA DAS AMOSTRAS DE LV.....	53
5.2 ENSAIOS DE CISALHAMENTO MATERIAL/MATERIAL COM A CÉLULA JENIKE.....	56
5.3 ENSAIOS DE CISALHAMENTO MATERIAL/PAREDE COM A CÉLULA JENIKE.....	66
5.4 RESULTADOS PELA ABORDAGEM DE JENIKE.....	68

5.5 RESULTADOS PELA ABORDAGEM DE ENSTAD.....	72
5.6 ESCOAMENTO DA LV NO SILO MODELO DE ACRÍLICO COM TREMONHAS DIFERENTES.....	75
5.7 DIMENSIONAMENTO DE UM SILO INDUSTRIAL.....	78
CAPÍTULO 6.....	81
6. CONCLUSÃO.....	81
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	83
APÊNDICE I.....	88
APÊNDICE II.....	96
APÊNDICE III.....	103

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 - Foto aérea da fábrica da ALUNORTE em Barcarena, PA destacando o depósito de rejeitos sólidos (DRS) onde é estocada a lama vermelha.....	1
--	---

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Evolução cronológica e esquemas dos métodos de produção de alumina.....	6
Figura 2.2 - Fluxograma e Esquema do Processo Bayer.....	7
Figura 2.3 - Amostra de LV com 13% de umidade.....	7
Figura 2.4 - Obstruções do fluxo em silos.....	11
Figura 2.5 - Formas de tremonha: a) cônica; b) em forma de cunha.....	12
Figura 2.6 - Curva característica de (YL) e (EYL)	17
Figura 2.7 - Célula Jenike de cisalhamento.....	20
Figura 2.8 - Comparação da YL para teste de compressão uniaxial.....	19
Figura 2.9 - Ângulo de atrito material/parede.....	20
Figura 2.10 - Tipos de ângulos de repouso.....	21
Figura 2.11 - Função de Fluxo.....	23
Figura 2.12 - Classificação da fluidez de acordo com o ff	24
Figura 2.13 - Representação da tensão σ_{1a} atuando em um arco estável.....	25
Figura 2.14 - Modelo para determinação do tamanho mínimo de saída, b_{min} , para evitar o arqueamento	26
Figura 2.15 - Imagens da descarga do silo com fluxo mássico.....	28

CAPÍTULO 3 30

Figura 3.1 - Padrões de Fluxo para produtos sólidos	30
Figura 3.2 - Análise para a não formação de arcos	32
Figura 3.3 - (a) Abordagem pela deformação cisalhante; (b) Abordagem para massa única.....	34
Figura 3.4 - Diagramas para determinação de fatores de fluxo para tremonhas cônicas com ângulo de atrito interno efetivo de 30°, 40°, 50° e 60°.....	36
Figura 3.5 - Diagrama de fluxo de massa - tremonha cônica.....	36
Figura 3.6 - Determinação da função $H(\theta)$ para tremonhas cônicas e em cunha.....	37
Figura 3.7 - Critério de fluxo e não fluxo (não formação ou formação de arco coesivo).....	38

CAPÍTULO 4.....	41
Figura 4.1 – Aparelho de cisalhamento direto.....	41
Figura 4.2 - Metodologia de ensaio proposta por Jenike.....	42
Figura 4.3 - Representação do ângulo de repouso.....	42
Figura 4.4 - (a) Amostra a 1,0% de umidade. (b) Amostra a 13,0% de umidade.....	43
Figura 4.5 - Célula carregada e consolidada.....	44
Figura 4.6 - Cisalhamento direto do produto.....	44
Figura 4.7 - Ensaio de cisalhamento material/material. (a) Célula Jénike; (b) Célula Jenike preenchida com LV.....	45
Figura 4.7 - Ensaio de cisalhamento material/material. (c) Amostra preparada para consolidação; (d) Consolidação da amostra.....	46
Figura 4.7 - Ensaio de cisalhamento material/material. (e) Cisalhamento da amostra; (f) Cisalhamento da amostra com carga reduzida.....	46
Figura 4.8 - Ensaio de cisalhamento material/parede. (a) Começo da análise, 5 kg; (b) Célula agora submetida a 4 kg.....	47
Figura 4.8 - Ensaio de cisalhamento material/parede. (c) Com 3 kg; (d) Com 2kg.....	47
Figura 4.8 - Ensaio de cisalhamento material/parede. (e) 1kg e (f) Agora com 0,5 kg é feita a última leitura.....	47
Figura 5.9 - Parâmetros de dimensionamento do silo protótipo de acrílico.....	49
Figura 4.10 - Curva de FF e a sua interseção com a reta do $ff_c = 1,3$ fornecendo a tensão crítica de consolidação.....	50
Figura 4.11 - Parâmetros de dimensionamento do silo protótipo de acrílico.....	51
CAPÍTULO 5.....	53
Figura 5.1 - Dimensões que geram incertezas nas medições.....	54
Figura 5.2 - Distribuição granulométrica (relação entre a percentagem de massa acumulada e massa passante).....	56
Figura 5.3 - Círculos de tensões de Mohr ($\sigma_{pré} = 0,2$ kPa).....	57
Figura 5.4 - Círculos de tensões de Mohr ($\sigma_{pré} = 2,1$ kPa).....	58
Figura 5.5 - Círculos de tensões de Mohr ($\sigma_{pré} = 4,1$ kPa).....	59
Figura 5.6 - Círculos de tensões de Mohr ($\sigma_{pré} = 8,3$ kPa).....	60
Figura 5.7 - Comportamento do ângulo de atrito interno em função do teor de umidade.....	61
Figura 5.8 - Comportamento do ângulo de atrito interno efetivo em função do teor de umidade.....	61

Figura 5.9 - Comportamento do ângulo de atrito interno em função da tensão de consolidação maior.....	62
Figura 5.10 - Comportamento do ângulo de atrito interno efetivo em função da tensão de consolidação maior.....	62
Figura 5.11 - Comportamento da coesão em função do teor de umidade.....	63
Figura 5.12 - Comportamento da tensão não confinada em função do teor de umidade.....	63
Figura 5.13 - Comportamento do índice de escoabilidade em função do teor de umidade....	64
Figura 5.14 - Funções de fluxo da LV.....	64
Figura 5.15 - Relação linear entre a tensão normal de consolidação e tensão cisalhante da LV para quatro teores e umidade.....	65
Figura 5.16 - Relação linear simples entre a tensão normal e tensão cisalhante do Latossolo Vermelho distrófico, sob cerradão (CE), submetido a diferentes teores de água.....	66
Figura 5.17 - Resultado do atrito material/parede para o aço liso, UHMW e acrílico.....	67
Figura 5.18 - Tensões críticas de consolidação para ($\sigma_{pré} = 0,2$ kPa).....	69
Figura 5.19 - Tensões críticas de consolidação para ($\sigma_{pré} = 8,3$ kPa).....	69
Figura 5.20 - Diâmetros mínimos de descarga para o Aço e UHMW (amostras inicialmente consolidadas a 0,3 KPa).....	74
Figura 5.21 - Diâmetros mínimos de descarga para o Aço e UHMW (amostras inicialmente consolidadas a 8,1 KPa).....	74
Figura 5.22 - Comportamento experimental e teórico de vazão de massa ($\theta = 45^\circ$).....	75
Figura 5.23 - Comportamento experimental e teórico de vazão de massa ($b = 40$ mm).....	76
Figura 5.24 - Escoamento da LV em silos modelos.....	78
Figura 5.25 – Curva de FF e a sua interseção com a reta da inversa de $ff_c = 2$	79
Figura 5.26 – Silo industrial.....	79

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1- Classificação dos silos segundo a relação altura/diâmetro (h/d).....	10
Tabela 2.2 - Classificação do produto armazenado quanto à granulometria.....	16
Tabela 2.3 - Relação entre massa específica aparente e tensão de consolidação inicial.....	18
Tabela 2.4 - Relações entre tensões de pré-consolidação.....	19
Tabela 2.5 - Classificação do escoamento pelo ângulo de repouso.....	22
Tabela 2.6 - Classificação da ff dos produtos.....	24
Tabela 4.1 - Dimensões do silo protótipo de acrílico.....	51
Tabela 5.1 - Densidades aparentes médias e ângulos de repouso.....	53
Tabela 5.2 - Resultado médio dos ensaios granulométricos da LV.....	55
Tabela 5.3 - Resultados dos parâmetros para mostras consolidadas com $\sigma_{pré} = 0,2$ kPa.....	57
Tabela 5.4 - Resultados dos parâmetros para mostras consolidadas com $\sigma_{pré} = 2,1$ kPa.....	58
Tabela 5.5 - Resultados dos parâmetros para mostras consolidadas com $\sigma_{pré} = 4,1$ kPa.....	59
Tabela 5.6 - Resultados dos parâmetros para mostras consolidadas com $\sigma_{pré} = 8,3$ kPa.....	60
Tabela 5.7 - Ângulos de atrito material/parede.....	68
Tabela 5.8 - Ângulos de inclinação da tremonha com a vertical.....	68
Tabela 5.9 - Resultados dos parâmetros e diâmetro mínimo de descarga obtidos pela teoria de Jenike para o material Aço ($\sigma_{pré} = 0,2$ kPa).....	70
Tabela 5.10 - Resultados dos parâmetros e diâmetro mínimo de descarga obtidos pela teoria de Jenike para o material Aço ($\sigma_{pré} = 8,3$ kPa).....	70
Tabela 5.11 - Resultados dos parâmetros e diâmetro mínimo de descarga obtidos pela teoria de Jenike para o material UHMW ($\sigma_{pré} = 0,2$ kPa).....	70
Tabela 5.12 - Resultados dos parâmetros e diâmetro mínimo de descarga obtido pela teoria de Jenike para o material UHMW ($\sigma_{pré} = 8,3$ kPa).....	71
Tabela 5.13 - Resultados dos parâmetros e diâmetro mínimo de descarga obtidos pela teoria de Jenike para o material Acrílico a $\sigma_{pré} = 0,2$ kPa.....	71
Tabela 5.14 - Resultados dos parâmetros e diâmetro mínimo de descarga obtidos pela teoria de Jenike para o material Acrílico a $\sigma_{pré} = 8,3$ kPa.....	71
Tabela 5.15 - Resultados obtidos para o material Aço ($\sigma_{pré} = 0,2$ kPa).....	72
Tabela 5.16 - Resultados obtidos para o material Aço ($\sigma_{pré} = 8,3$ kPa).....	72
Tabela 5.17 - Resultados obtidos para o material UHMW ($\sigma_{pré} = 0,2$ kPa).....	72
Tabela 5.18 - Resultados obtidos para o material UHMW ($\sigma_{pré} = 8,3$ kPa).....	73
Tabela 5.19 - Resultados obtidos para o material Acrílico ($\sigma_{pré} = 0,2$ kPa).....	73
Tabela 5.20 - Resultados obtidos para o material Acrílico ($\sigma_{pré} = 8,3$ kPa).....	73

Tabela 5.21 - Resultados experimentais das vazões de massa no silo piloto de acrílico.....	76
Tabela 5.22 - Resultados teóricos das vazões de massa no silo piloto de acrílico.....	77
Quadro 5.1 - Análise experimental da vazão de massa em relação aos parâmetros teor de umidade, diâmetro mínimo de descarga e ângulo de inclinação da tremonha.....	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LV	Lama vermelha
UHMW	Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular
FEM	Faculdade de Engenharia Mecânica
ITEC	Instituto de Tecnologia
UFPA	Universidade Federal do Pará
YL	Lugar geométrico de deslizamento
ASTM	American Society for Testing and Materials

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ_s	Massa específica real do sólido (m^{-3})
ρ_b	Massa específica aparente do sólido (m^{-3})
φ_i	Ângulo de atrito interno do produto (graus)
φ_e	Efetivo ângulo de atrito interno do produto (graus)
φ_w	Ângulo de atrito do produto com a parede (graus)
δ	Ângulo de repouso (graus)
w	Úmidade (%)
ff	Índice de escoabilidade
FF	Função de fluxo
ff _c	Fator de fluxo da tremonha
\dot{m}	Vazão de massa (kg/s)
M_t	Massa total do material (g)
V_t	Volume total do material (m^3)
M_f	Massa do fluido (kg)
V_f	Volume do fluido (m^3)
M_s	Massa das partículas sólidas (kg)
V_s	Volume das partículas sólidas (m^3)
ε	Fração volumétrica do meio intersticial
CI	Índice de compressibilidade (%)
D	Diâmetro das partículas sólidas (mm)
d_s	Diâmetro médio de Sauter (mm)
x_i	Fração mássica retida
d_{pi}	Diâmetro médio para cada partícula (mm)
τ	Tensão cisalhante ($N.m^{-2}$)
σ	Tensão normal ($N.m^{-2}$)
$\sigma_{p,1}$	Primeira tensão normal ($N.m^{-2}$)
c	Tensão de coesão ($N.m^{-2}$)
σ_c	Tensão não confinada ($N.m^{-2}$)
σ_1	Maior tensão principal ($N.m^{-2}$)
σ_1	Menor tensão principal ($N.m^{-2}$)
μ_w	Coefficiente de atrito com a parede
φ_w	Ângulo de atrito com a parede (graus)

m	Massa de água presente na amostra (kg)
M	Massa total da amostra
σ_{1a}	Tensão necessária para suportar um arco estável da massa ($N.m^{-2}$)
h^*	Distância mínima que deve estar o b_{min} do vértice virtual da tremonha (m)
θ	Ângulo de inclinação da parede da tremonha com vertical (graus)
b_{min}	Diâmetro mínimo de saída (m)
r	Distância do ápice do funil até o ponto de apoio do arco (m)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
n	Parâmetro de descrição de tremonha cônica pela abordagem de Jenike
γ	Peso específico do produto (N)
G_f	Fator de correção
b	Diâmetro da boca de descarga (m)
d_{pm}	Diâmetro médio das partículas (mm)
k_s	Constante de forma das partículas
H^*	Altura do silo (m)
D^*	Diâmetro do silo (m)
H_{cr}	Altura crítica do silo (m)
σ_{cri}	Tensão crítica ($N.m^{-2}$)
$H(\theta)$	Função do ângulo da tremonha
A e B	Constantes
c'	Consolidação independente da coesão ($N.m^{-2}$)
φ_e'	Ângulo de atrito efetivo associado a c' (graus)
K e L	Parâmetros
β	Parâmetro para moegas íngremes com fluxo mássico
m	Parâmetro que descreve a forma da tremonha pela abordagem de Enstad
k	Função derivada da teoria de Enstad
h	Função derivada da teoria de Enstad
h_r	Medida da distância da base até o topo da amostra
D_r	Diâmetro médio da base do cone formado com a queda do produto
d_r	Diâmetro interno de saída do funil
H	Altura do silo
H_C	Altura do corpo do silo
H_F	Altura da tremonha
H_T	Altura do telhado do silo
σ_{sh}	Tensão normal no ponto de cisalhamento ($N.m^{-2}$)

τ_{sh}	Tensão de cisalhamento no ponto de cisalhamento ($N.m^{-2}$)
σ_{pre}	Tensão normal no ponto de pré-cisalhamento ($N.m^{-2}$)
τ_x	Tensão de cisalhamento no eixo x ($N.m^{-2}$)
τ_y	Tensão de cisalhamento no eixo y ($N.m^{-2}$)
R	Raio do círculo de Mohr (m)
σ_θ	Tensão principal ($N.m^{-2}$)
τ_θ	Tensão cisalhante ($N.m^{-2}$)
σ_m	Tensão média ($N.m^{-2}$)
σ_2	Tensão principal menor ($N.m^{-2}$)
σ_3	Tensão principal intermediária ($N.m^{-2}$)
σ_v	Tensão vertical ($N.m^{-2}$)
σ_h	Tensão horizontal ($N.m^{-2}$)
σ_w	Tensão normal de consolidação material parede ($N.m^{-2}$)
τ_w	Tensão cisalhante material parede ($N.m^{-2}$)

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O Brasil é um dos grandes produtores de Alumínio do mundo. Entretanto a elevada extração de substâncias minerais ocasiona problemas no que diz respeito aos rejeitos gerados nos processos de tratamento dos minérios para obtenção dos produtos finais. No estado do Pará, especificamente na região do município de Barcarena, localiza-se a fábrica Alunorte de produção de alumina (processo Bayer), a partir da bauxita, que gera em seu processo industrial, um rejeito conhecido como Lama Vermelha (LV) o qual é armazenado em depósitos, conforme ilustra a Figura 1.1.



Figura 1.1 - Foto aérea da fábrica da Alunorte em Barcarena - PA destacando o depósito de rejeitos sólidos (DRS) onde é estocada a lama vermelha. Fonte: GOOGLE, (2009).

Um dos maiores problemas ambientais com relação à indústria de alumínio é a LV. A LV é um resíduo insolúvel gerado durante a etapa de clarificação do processo Bayer de produção de alumina, a qual é constituída por partículas muito finas tendo como principal característica uma elevada alcalinidade e alta área superficial (SILVA FILHO *et al.*, 2008).

A má disposição ou alocação da LV pode ocasionar diversos problemas, como: a contaminação da água de superfície e subterrânea por NaOH, ferro, alumínio ou outro agente químico; o contato direto com animais, plantas e seres humanos; formação de

nuvens de poeira alcalina devido a LV seca; impacto visual sobre uma extensa área (SILVA *et al.*, 2007).

Alguns casos de acidentes ambientais decorrentes da má disposição da lama vermelha são relatados na literatura. Por exemplo, no Brasil, houve no município de Barcarena (PA) um vazamento de lama vermelha, atingindo as nascentes do rio Murucupi. Da nascente a foz do rio houve mudança na tonalidade das águas, com o aumento nos teores de alumínio e sódio e possível contaminação do aquífero. Outro acidente ocorreu na cidade húngara de Ajka, inundada por um líquido espesso, vermelho e altamente cáustico. A destruição foi causada pelo rompimento de um reservatório de LV, que chegou a alcançar o rio Danúbio (DE JESUS *et al.*, 2004).

Entretanto, o problema é a LV continuar ocupando espaço no planeta, sempre correndo o risco de contaminar o ambiente. Por isso, pesquisas envolvendo o uso do resíduo estão em desenvolvimento, como por exemplo, o uso da LV na confecção do concreto, na fabricação tijolos e até em filtros. No caso do concreto, a ideia é substituir uma fração da areia por lama vermelha. Para os tijolos, a situação é mais delicada, pois este artefato envolve queima e conseqüentemente fumaça com resíduos, os quais devem ser bem analisados, quanto ao teor tóxico, senão o que poderia ser uma solução ambiental pode se tornar um problema ambiental.

Atualmente as empresas produtoras de alumínio demonstram interesse nas pesquisas com a lama vermelha. Isso vem ocorrendo em função do custo de manter um reservatório ser alto, o que se deve a necessidade de um monitoramento contínuo, além das questões ambientais. Nesse sentido, com o intuito de colaborar com as pesquisas sobre a LV, o presente trabalho objetiva o dimensionamento de tremonhas cônicas para silos verticais visando o armazenamento da LV tratada e apropriada para fins de aplicação na indústria cerâmica.

De acordo com Palma (2005), silos são construções cuja finalidade é de armazenar produtos sólidos, granulares ou pulverulentos, a granel. Os silos podem ser dimensionados e edificados em diversas formas e tamanhos, dependendo da finalidade para os quais são requeridos. Segundo Nascimento (2005), para que o dimensionamento de um silo seja seguro e viável economicamente, alguns aspectos devem ser considerados, a saber:

a) ações das pressões que atuam sobre a estrutura do silo, causadas pelo contato do produto armazenado com as paredes;

- b) forma geométrica relacionando altura/diâmetro (ou altura/lado);
- c) capacidade efetiva de armazenamento;
- d) a espessura das paredes deve ser determinada de modo a ter um dimensionamento ótimo do ponto de vista estrutural;
- e) as propriedades físicas do produto a ser armazenado;
- f) os estágios de operação, carregamento, armazenamento e descarga.

É importante ressaltar que na geometria do silo, considerações e restrições podem influenciar na escolha das dimensões. Por exemplo, para silos a céu aberto, teoricamente não há limitação na escolha da altura. Contudo, restrições econômicas e construtivas podem impor limites práticos. Já para o diâmetro os limites são estabelecidos em função da forma geométrica e das propriedades físicas do produto armazenado.

Para Teixeira (2006), o dimensionamento de um silo pode ser sistematizado através de um procedimento que congregue as informações e cálculos necessários, cujo principal foco é garantir um fluxo mássico do produto armazenado. Sendo que neste tipo de fluxo o escoamento do produto particulado permanece uniforme, sem que ocorra a existência de uma zona de estagnação devido à formação de obstrução por arcos. Fato este que implica na dimensão da abertura de descarga de um silo, a qual deve ter uma dimensão suficiente para que não ocorram obstruções durante a descarga do produto armazenado.

No dimensionamento de tremonha para silo, os parâmetros que devem ser levados em consideração são as propriedades de fluxo dos produtos armazenados. Um dos pioneiros no estudo do comportamento de sólidos foi Jenike (1964), que estabeleceu uma teoria para a análise do escoamento de sólidos e uma metodologia para projeto de silos. A abordagem baseada na teoria de Jenike, juntamente com a abordagem proposta por Enstad (1981) para previsão teórica do fluxo de massa, são apresentadas neste trabalho com o intuito de dimensionar o diâmetro mínimo de descarga da tremonha para silos.

Quanto à metodologia definida para determinar as propriedades de fluxo da LV se utilizou como referencial teórico a norma AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM (1997). Por meio dos ensaios de cisalhamento material/material e material/parede com o Aço liso, UHMW (Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular) e Acrílico determina-se as variáveis que influenciam no escoamento do produto LV.

Os resultados numéricos teóricos determinados pelas teorias de Jenike e Enstad para a previsão do diâmetro mínimo de descarga em silos com fluxo mássico são parâmetros de

previsão para o experimento da vazão de massa. Sendo o experimento da vazão de LV desenvolvido num silo modelo de acrílico. É importante mencionar que o experimento da vazão de LV tem intuito de verificar se o dimensionamento da tremonha está de acordo para a obtenção do fluxo de massa. Levando em consideração a influência dos teores de umidade.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por finalidade o dimensionamento de tremonhas cônicas para fluxo de massa do produto LV em silos. Levando-se em consideração amostra de LV em diferentes teores de umidade e tipos diferentes de materiais para o revestimento da tremonha.

1.2.2 Objetivo Específico

- Desenvolver ensaios com a célula de cisalhamento, visando determinar as propriedades de fluxo do produto LV em função de sua umidade.
- Analisar o comportamento das propriedades de fluxo do produto LV quando se modifica os teores de umidade das amostras.
- Determina-se o coeficiente de atrito existente entre a LV e o material utilizado como revestimento para o silo, por meio dos ensaios de cisalhamento material/parede.
- Verificar experimentalmente o comportamento do fluxo da LV por meio de um silo protótipo de acrílico vertical, cilíndrico e com tremonhas cônicas.
- Realizar um estudo comparativo dos resultados obtidos pelas abordagens de Jenike e de Enstad, para o diâmetro de descarga.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho consiste primeiramente consiste em pesquisar sobre a determinação das propriedades de fluxo dos produtos armazenáveis em silos, por meio das principais recomendações propostas por especialistas e das literaturas existentes para o cálculo do diâmetro de descarga da tremonha. Para isso se faz necessário à realização de ensaios de cisalhamento direto, utilizando o aparelho Jenike Shear Tester (célula de cisalhamento), para a obtenção das propriedades físicas do produto.

A sequência se dá com a análise da influência da umidade no comportamento das propriedades de fluxo do produto LV a partir dos ensaios de cisalhamento. Tendo como propósito o dimensionamento de tremonhas cônicas para silos verticais pelas teorias de Jenike

e Enstade e análise do escoamento do produto LV no silo protótipo de acrílico com variações de ângulo de inclinação da tremonha e do diâmetro de descarga.

Por final, comparam-se os resultados dos diâmetros de descarga encontrados para os materiais de parede (Aço liso, UHMW). A partir das observações feitas para o escoamento do produto LV nos experimentos com o silo modelo de acrílico, tiram-se as conclusões referentes aos melhores parâmetros de dimensionamento da tremonha cônica, cujo objetivo se resume a obtenção de um fluxo de massa.

1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho apresenta-se disposto em 7 capítulos. Estando o conteúdo de cada capítulo apresentado na seguinte ordem:

Capítulo 1: expõe a introdução ao tema, apresentando o propósito do trabalho, o qual se define em abordagens teóricas e resultados experimentais.

Capítulo 2: apresenta uma fundamentação teórica para dimensionamento de tremonha cônica para fluxo de massa, juntamente com a origem e problemas da LV, e estudos sobre as aplicações do produto LV, em sua maioria na indústria cerâmica. Descreve as propriedades de fluxo para produtos sólidos granulados e os parâmetros para dimensiona tremonhas.

Capítulo 3: mostra as características do fluxo de produtos granulados em silos, dando ênfase ao fluxo de massa e faz uma abordagem sobre à teoria do arqueamento em tremonhas cônicas.

Capítulo 4: descreve toda a metodologia dos ensaios com a célula de cisalhamento do tipo Jenike para determinação das propriedades de fluxo do produto LV, apresentando os instrumentos e equipamentos utilizados no laboratório.

Capítulo 5: se apresentam os resultados obtidos para as propriedades de fluxo do produto LV, os resultados obtidos para a geometria da tremonha, juntamente com uma análise a respeito desses resultados e as conclusões sobre a influência da umidade nas propriedades de fluxo fazendo referência ao material mais indicado para revestimento do silo.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo visa à apresentação da origem do produto lama vermelha, juntamente com possíveis aplicações deste produto na indústria. Abordando também um estudo teórico dos silos verticais com ênfase no dimensionamento de tremonhas cônicas, juntamente com a caracterização dos produtos granulados, mostrando um estudo teórico das propriedades de fluxo.

2.1 LAMA VERMELHA

Em 1888, Karl Josef Bayer desenvolveu e patenteou um processo, o qual hoje é internacionalmente conhecido como “Processo Bayer” (FILHO *et al.* 2007). Este processo é utilizado para o refino da bauxita na produção de alumina (Al_2O_3). Anteriormente ao surgimento do processo Bayer, o beneficiamento da bauxita era realizado através do processo Le Chatelier, (Figura 2.1) o qual consiste: no aquecimento da bauxita com Na_2CO_3 a 1200°C , remoção dos aluminatos formados com água, precipitação do $\text{Al}(\text{OH})_3$ através da ação do CO_2 e, finalmente, o $\text{Al}(\text{OH})_3$ formado é filtrado, seco e limpo (FILHO *et al.* 2007).

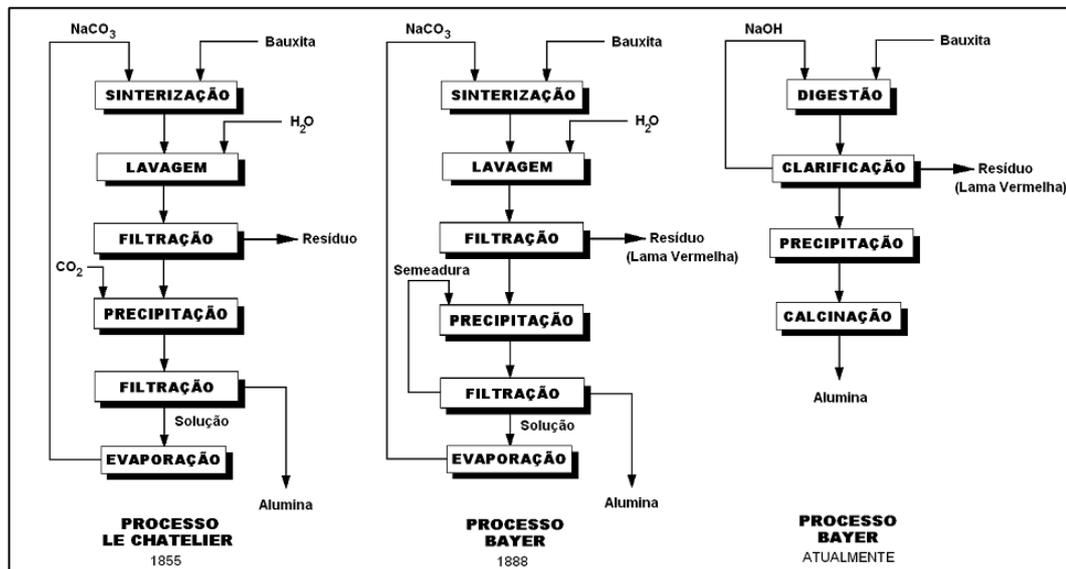


Figura 2.1 - Evolução cronológica e esquemas dos métodos de produção de alumina. Fonte: HIBASHI (2005) *apud* FILHO *et al.* (2007).

Durante o processo Bayer (Figura 2.2) para a obtenção da alumina, a partir da bauxita, obtém-se o rejeito chamado de Lama Vermelha (LV), produto mostrado na Figura 2.3. Sabe-

se que esse resíduo é produzido em grande escala e seu acúmulo degrada o meio ambiente (FILHO *et al.* (2007).

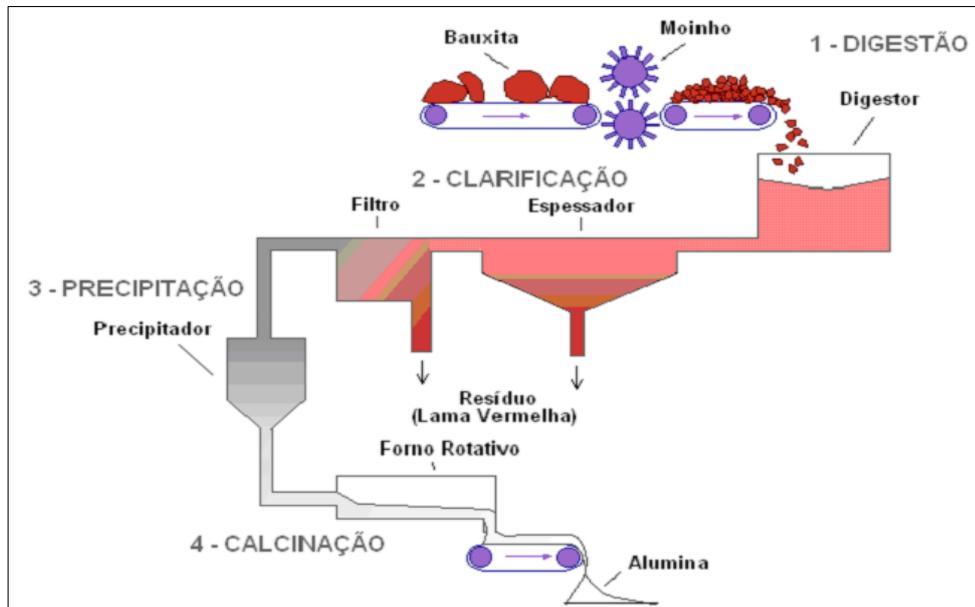


Figura 2.2 - Fluxograma e Esquema do Processo Bayer. Fonte: FILHO *et al.* (2007).

A LV faz parte de um grupo de rejeitos conhecidos como tailings. Os quais são materiais que continham o mineral de interesse. Dependendo do processo de extração, podem ser adicionadas substâncias químicas aos tailings, como por exemplo, a soda cáustica empregada no refino da alumina (SILVA FILHO *et al.* 2007).



Figura 2.3 - Amostra de LV com 13% de umidade. Fonte: (AUTOR).

Por muito tempo a LV foi considerada um resíduo inaproveitável para a indústria do alumínio (CHAVES, 1962). Entretanto, os custos econômicos e os riscos ambientais associados à sua disposição têm motivado companhias e pesquisadores na busca por

alternativas ambientalmente mais seguras, que possibilitem a redução do volume de resíduo encaminhado para a disposição final.

Estudos realizados com a LV sobre corrosividade, reatividade e toxicidade não a classifica como um resíduo perigoso, entretanto, indica que a sua disposição precisa ser feita em locais adequados, como lagoas de disposição, construídas com técnicas de elevado custo, que impossibilitem a ocorrência de lixiviação de seus componentes e a consequente contaminação dos corpos d'água da superfície e das águas subterrâneas (WANG *et al.* 2008).

Segundo Silva Filho *et al.* (2008) a literatura apresenta controvérsia quanto à toxicidade da LV. A LV não é particularmente tóxica, inclusive, a Environmental Protection Agency (EPA) não a classifica como um rejeito perigoso. Entretanto, a LV, devido à presença de elevados valores de cálcio e hidróxido de sódio, é considerada tóxica, na medida em que pode constituir um perigo para as populações vizinhas. Outros relatos encontrados na literatura apontam para os riscos ao meio ambiente associados à LV, em função de sua elevada alcalinidade e capacidade de troca iônica.

Estudos propõem a utilização da LV em vários setores industriais. Aproveitar a LV como produto agregado para a produção de concreto e como matéria-prima na fabricação de produtos cerâmicos, tais como, telhas, tijolos, pigmentos para misturas em cimentos (DUTRA e CARDOSO 2002). No caso do concreto, quanto maior sua resistividade, menor a penetração de íons cloreto e, conseqüentemente, menor a probabilidade de ocorrer corrosão. O grau de saturação (umidade) das amostras de concreto contendo lama vermelha parece influenciar consideravelmente nos resultados de resistividade elétrica. Os corpos de prova de concreto com presença da lama vermelha apresentam maior resistividade em ambiente úmido, situação mais propícia à corrosão (REVISTA IBRACON, 2012).

Para Dutra e Cardoso (2002) a LV como matéria prima na produção de pigmentos inorgânicos a base de óxido e hidróxido de ferro é tecnicamente possível, devido às semelhanças físico-químicas do rejeito LV e de pigmentos comerciais à base de óxidos e hidróxidos de ferro. Os pigmentos conferem cor, opacidade e certas características de consistência e outros efeitos. A LV apresenta, entre seus componentes, os óxidos de titânio e ferro, que são amplamente utilizados como pigmentos inorgânicos (DUTRA e CARDOSO, 2002). No trabalho desenvolvido por Souza e Antunes (2011) são apresentadas duas abordagens sobre a possibilidade de aproveitamento da lama vermelha na remoção de corantes presentes em efluentes têxteis.

Para Bitencourt *et al.* (2012) a geopolimerização pode se tornar uma solução interessante para a LV, uma vez que essa técnica seria capaz de tirar proveito de algumas das características mais típicas desse resíduo, como sua elevada alcalinidade e o seu significativo teor de compostos de silício e alumínio, produzindo materiais sólidos semelhantes em propriedades às cerâmicas tradicionais. A construção civil tem sido o setor mais visado para o emprego dos geopolímeros, uma vez que suas propriedades podem ser muito similares, ou até mesmo superiores, às dos materiais cerâmicos aplicados nesse campo, no que se incluem as cerâmicas vermelhas, cimentos, concretos, entre outros. No entanto, o maior diferencial dos geopolímeros em relação a esses produtos convencionais estaria em seus aspectos quanto à sustentabilidade.

De acordo com os resultados obtidos em Macêdo *et al.* (2011), conclui-se que a utilização da lama vermelha em mistura com a argila para fabricação de blocos cerâmicos estruturais é tecnicamente viável do ponto de vista de absorção de água e resistência à compressão. O que proporciona uma alternativa para aplicação estrutural.

Para Rivas Mercury *et al.* (2010), de acordo com os resultados obtidos em seu trabalho, demonstram que é possível a utilização deste resíduo em conjunto com outras matérias primas em misturas para fabricação de materiais cerâmicos, podendo contribuir para a economia de energia e diminuindo assim o seu passivo ambiental.

2.2 SILOS

Os silos são estruturas que armazenam produtos sólidos particulados, diferenciando-se dos reservatórios por estes armazenarem fluidos de maneira geral. Uma grande diferença entre reservatório e silos é o método de cálculo de cada um. Os reservatórios apresentam ações hidrostáticas e os silos apresentam pressões muito elevadas em relação aos reservatórios, devido ao atrito do produto com a parede (HEZEL, 2007).

Denomina-se célula o compartimento onde fica armazenado o produto. Um silo pode ter uma célula (silo unicelular) ou mais células (silo multicelular). A seção transversal da célula poderá ser circular, quadrada, retangular ou mesmo poligonal, de acordo com a necessidade. Sendo que os silos podem ser construídos com os mais variados materiais como concreto armado, fibra de vidro chapa de aço liso ou ondulada, madeira, alvenaria de blocos cerâmicos ou de concreto (FREITAS, 2001).

Os silos são usados extensamente na indústria com vantagens de utilização eficiente de espaço, conservação do estoque, abastecimento do processo de fabricação. Contudo,

apresentando frequentemente problemas operacionais, os quais ocorrem devido à existência de diferentes produtos que podem ser armazenados. Esses problemas ocorrem nos sistemas onde as estruturas são projetadas sem conhecimento das características relevantes do fluxo do produto a ser armazenado (BATISTA, 2009).

Segundo Palma (2005), quando a relação altura/diâmetro for maior ou igual a 1,5 os silos são classificados como esbeltos. Porém as normas internacionais apresentam diferenças quanto à classificação do que seria uma célula baixa ou alta para silos, como mostrado na tabela 2.1.

Tabela 2.1- Classificação dos silos segundo a relação altura/diâmetro (h/d) (FREITAS, 2001)

NORMA	CLASSIFICAÇÃO		
	Baixo	Medianamente esbelto	Esbelto
AUSTRALIANA AS 3774/1996	$h/d < 1$	$1 < h/d < 3$	$h/d > 3$
EUROCODE ENV 1991/1995	$h/d < 1,5$	-	$h/d \geq 1,5$
AMERICANA ACI 313/1991	$h/d \leq 2$	-	$h/d > 2$
ALEMÃ DIN 1055/1987	$h/d < 2,5\mu$	$2,5\mu \leq h/d \leq 5\mu$	$h/d > 5\mu$
INGLESA BMHB – 1985	$h/d \leq 1,5$	-	$h/d > 1,5$
CANADENSE CFBC/1983	$h/d \leq 0,75$	-	$h/d > 0,75$
FRANCESA SBATI/1975	$h/d < 2,5$	-	$h/d \geq 2,5$
ISSO 11697/1995	$h/d < 1,5$	-	$h/d > 1,5$
DIN 1055-6/ 2000	$h/d < 1,5$	-	$h/d > 1,5$

Outros parâmetros geométricos também diferenciam os silos, como, por exemplo, o tipo de fundo, que pode se apresentar de forma cônica (ou com tremonha) ou plana. Os silos cilíndricos são ditos verticais quando o diâmetro da base for menor que a altura e horizontais quando contrário, sendo que os verticais exigem menor investimento por quantidade unitária armazenada. O dimensionamento de um silo deve ser sistematizado através de um procedimento que congregue as informações e cálculos necessários, cujo principal foco é garantir um fluxo contínuo do produto armazenado (BADIALE *et al.*, 1999 *apud* HEZEL, 2007).

2.3 CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO EM TREMONHAS – CÔNICAS

O modo como o produto flui por gravidade em um silo é governado, por um lado, pelas propriedades de fluxo do produto e, por outro lado, pela geometria e estrutura da superfície da tremonha. Sendo o diâmetro da moega um parâmetro que deve ter uma dimensão suficiente para que não ocorram obstruções durante a descarga do produto armazenado. Dentre os principais problemas funcionais no escoamento de sólidos

particulados, destaca-se a formação de arcos coesivos, mostrado na figura 2.4(a). Os arcos são capazes de restringir parcial ou completamente a descarga, estando sua ocorrência relacionada às geometrias dos silos e das tremonhas (TEIXEIRA, 2006).

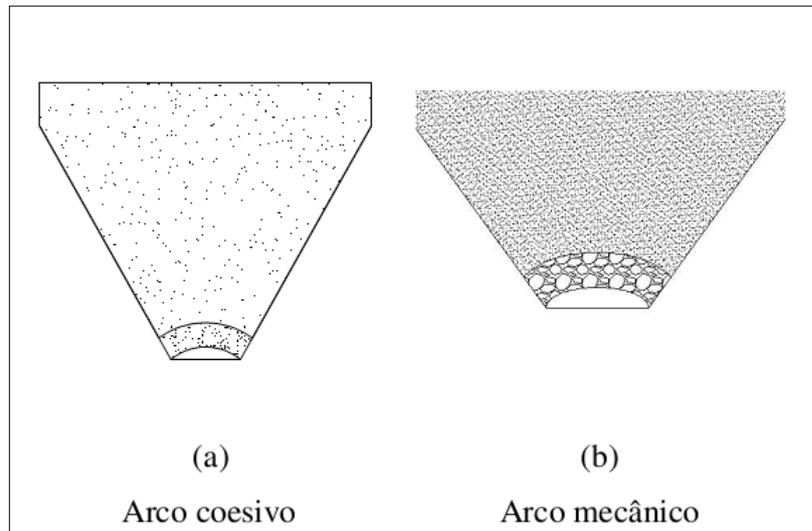


Figura 2.4 - Obstruções do fluxo em silos. Fonte: TEIXEIRA (2006).

A formação de um arco coesivo ocorre mais em produtos de granulometria fina e coesivos, ao contrário da formação de arcos mecânicos, mostrado na figura 2.4(b), decorrente da interação de partículas de formas irregulares. Partículas fibrosas com tamanhos variados tendem a formar estruturas mecanicamente estáveis que impedem o livre escoamento (NAKA, 2010).

Fortes Filho (1985) *apud* Naka (2010) relata que os fatores que influenciam o comportamento de um produto durante a descarga são a rugosidade da parede do silo, o ângulo de atrito interno, a forma e a inclinação das paredes da moega e o tamanho do orifício de saída. Entretanto para um sistema de descarga por gravidade, cuidados devem ser tomados durante o dimensionamento do silo, pois o sistema de descarga gera diferenças de pressões que atuam nas paredes do silo quando a descarga está ocorrendo.

Para um determinado produto o ângulo de inclinação (θ_c) de uma tremonha cônica será normalmente menor que o ângulo de uma tremonha em forma de cunha $\theta_c < \theta_p$ (Figura 2.5b). Segundo Jenike (1964) *apud* Schulze (2007) a tremonha em cunha permite inclinações um pouco maiores (geralmente de 8° a 10°) para produtos com as mesmas propriedades. Jenike (1985) *apud* Schulze (2007) afirma que seus diagramas publicados em 1964 predizem muito bem o ângulo de inclinação da tremonha com a vertical para que o ocorra escoamento do

produto, embora resultados experimentais indiquem que os valores são um pouco conservadores.

As características geométricas de silos, tremonhas e dimensões do orifício de descarga, estão relacionadas ao ângulo de atrito com a parede, o qual representa o esforço de adesão entre o produto armazenado e a superfície do material da parede. Sendo o conhecimento do ângulo de atrito com a parede essencial para projetos estruturais e de estabilidade de silos nos quais devem ser garantidas descargas seguras e consistentes (LOPES NETO, *et al.* 2008).

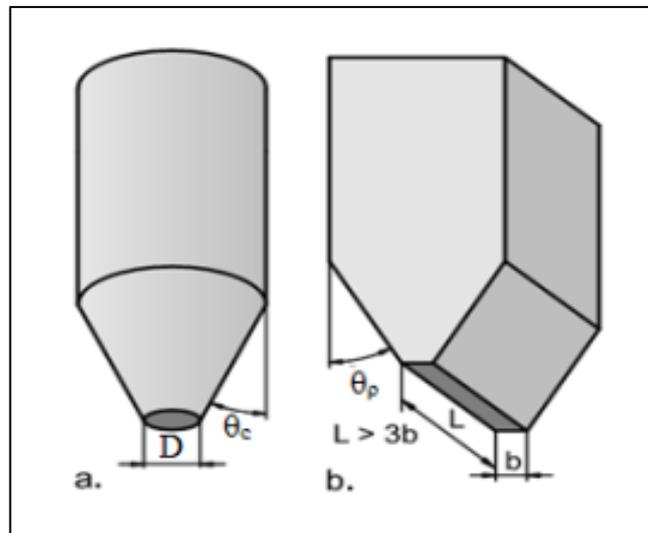


Figura 2.5 - Formas de tremonha: a) cônica; b) em forma de cunha. Fonte: SCHULZE (1996).

Ao se aumentar o ângulo de atrito entre o material a ser armazenado no silo e a parede interna deste, aumenta-se o diâmetro de descarga, diminuindo-se o ângulo máximo de inclinação com a tremonha com a vertical para que ocorra o escoamento do produto. Tremonhas cônicas de aço para produtos pulverulentos devem ter inclinação mínima de 60° com a vertical de forma a permitir o fluxo e não haver segregação durante a descarga e a dimensão do diâmetro mínimo de descarga aumenta com o incremento do tempo efetivo de consolidação do produto. Com o intuito de evitar instabilidades que alterem o tipo de fluxo, Jenike (1964) recomenda que a dimensão mínima da boca de descarga da tremonha determinada por meio de sua metodologia seja majorada em 20% (PALMA, 2005).

Na teoria de Enstad (1981) se propõe um equacionamento que permitem determinar o fator de fluxo da tremonha com boa aproximação e a dimensão mínima da boca de descarga da tremonha resulta da condição de não existência de tensões suportando arcos. A aplicabilidade desse equacionamento é limitada, em geral, para moegas íngremes e suaves.

Apesar das freqüentes ocorrências de arqueamento em produtos particulados na etapa de descarga, a quantidade de informações detalhadas sobre os parâmetros de fluxo de materiais, a geometria das tremonhas, e as condições de alimentação e descarga é muito limitada (DRESCHER, 1992).

2.4 PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS DE SÓLIDOS GRANULARES

A dinâmica dos produtos sólidos armazenáveis tem grande importância dentro dos processos industriais. Com o acréscimo em quantidade e variedade de produtos sólidos armazenáveis, existe a necessidade de informações quanto às suas propriedades para manuseio e processamento. Tendo em vista que a caracterização de um produto granulado consiste em determinar as propriedades de fluxo. Estas propriedades se referem ao comportamento do produto e surgem das forças que atuam sobre as partículas individualmente. A importância em determinar as propriedades de fluxo do produto reside no fato de que elas influenciam em seu padrão de escoamento (PALMA, 2005).

As principais propriedades características de produtos sólidos granulares que se fazem necessários no estudo do comportamento do fluxo em silos são:

- Massa específica do sólido (ρ_s) (kg/m^3);
- Massa específica aparente (ρ_b) (kg/m^3);
- Granulometria;
- Ângulo de atrito interno (φ_i) (graus);
- Efetivo ângulo de atrito interno (φ_e) (graus);
- Ângulo de atrito com a parede (φ_w) (graus);
- Ângulo de repouso (δ) (graus);
- Umidade (w) (%);
- Função fluxo (FF);
- Índice de escoabilidade (ff);
- Fator fluxo da tremonha (ff_c) e
- Vazão de massa (dm/dt) (kg/s).

Os ensaios de cisalhamento têm como referencial teórico a normas ASTM (1997). Estes ensaios medem as tensões de consolidação e cisalhamento das amostras, requisitos necessários para a construção dos círculos de tensões de Mohr, por meio do qual se determinam as propriedades físicas e de fluxo do produto a ser armazenado. Sendo a determinação teórica da vazão de massa para produtos particulados um parâmetro de

fundamental importância na comparação com os resultados experimentais de vazão de massa obtida em um silo modelo em acrílico, cujo intuito é verificar a ocorrência do fluxo de massa para o escoamento do produto.

Segundo Nascimento (2008), vários são os fatores que influenciam no fluxo do silo, tais como: geometria; tipo de fundo (tremonha ou fundo plano); propriedades físicas do produto a ser armazenado (tamanho dos grãos, peso específico, coesão, ângulo de atrito interno, coeficiente de atrito com as paredes, teor de umidade e tempo de consolidação). Na sequência são descritas as propriedades dos sólidos granulados.

2.4.1 Massa específica (ρ_s) e Massa específica aparente (ρ_b)

A massa específica das partículas que compõem o material granulado é constante, mas como o volume do material granulado pode variar devido à quantidade de vazios entre as partículas, então a densidade do material pode variar. A variação entre um material bem comprimido e o mesmo material em um estado muito pouco comprimido pode chegar a 50% (MCGLINCHEY, 2005). O cimento, por exemplo, quando compactado tem uma densidade de 1400 kg/m^3 e uma densidade quando aerado de 1000 kg/m^3 . Sendo a expressão da massa específica aparente do material granulado dada pela equação 2.1.

$$\rho_b = \frac{M_t}{V_t} = \frac{M_s + M_f}{V_s + V_f} \quad (2.1)$$

sendo M_t a massa total do material granulado contendo a massa somente das partículas sólidas (M_s) e a massa do fluido (M_f) dentro meio intersticial entre as partículas sólidas, que é preenchida por um algum fluido. A análise é a mesma para o volume. Se a fração volumétrica do meio intersticial é dada por $\varepsilon = V_f / (V_s + V_f)$, tem-se que a fração volumétrica do meio sólido é $1 - \varepsilon = V_s / (V_s + V_f)$. Então a equação (2.1) pode ser reescrita pela equação 2.2.

$$\rho_b = \frac{M_s}{\frac{V_s}{(1-\varepsilon)}} + \frac{M_f}{\frac{V_f}{\varepsilon}} = (1-\varepsilon)\rho_s + \varepsilon\rho_f \quad (2.2)$$

sendo ρ_s a massa específica do sólido e ρ_f a massa específica do fluido intersticial. Se este fluido for o ar, tem-se que $\rho_f \ll \rho_s$, então a equação (3.2) pode ser aproximada pela equação 2.3.

$$\rho_b = (1-\varepsilon)\rho_s \quad (2.3)$$

Na prática, para medir a massa específica do material granulado, basta colocar uma quantidade de material dentro de um recipiente de massa conhecida e volume de vazio conhecido (o material tem que preencher completamente o volume vazio), e em seguida, medir a massa total do recipiente e material. A massa específica aparente do material é obtida subtraindo a massa do recipiente vazio da massa total do recipiente cheio e o resultado divide-se pelo volume de vazio que foi preenchido pelo material. Logicamente, a massa específica dependerá de o quão compactado estará o material dentro do recipiente.

Existem procedimentos, tais como as Normas ASTM D6393 (1999), DIN 1055-6 (1987), BS EN 1097-3 (1998), BS EN 543 (2003) e BS EM 23923-2 (1993) para a definição da massa específica do material granulado apenas derramado em um recipiente (*poured or aerated bulk density*) e da massa específica do material compactado em condições específicas (*tap bulk density*). As medições da massa específica do material granulado também têm sido usadas para uma predição qualitativa da ‘escoabilidade’ ou ‘manuseabilidade’ do material, tal como o índice de compressibilidade (CI) de Carr (1965) *apud* McGlinchey (2005) que é dado pela equação 2.4.

$$CI(\%) = \frac{\rho_b^{\text{tapped}} + \rho_b^{\text{aerated}}}{\rho_b^{\text{aerated}}} \quad (2.4)$$

Quanto maior for CI mais difícil será o fluxo do material, pois o material estará mais comprimido, e então as distancias entre as partículas que não estão em contato e haverá maior área de contato entre as partículas que estão contíguas. A unidade de massa específica no (SI) é (kg.m⁻³) e no CGS (g.cm⁻³). A relação válida entre as unidades corresponde a (kg.m⁻³ = 10³ g.m⁻³).

2.4.2 Granulometria

A análise granulométrica clássica de um produto granular é desenvolvida pelo método de peneiramento, o qual permite classificar o produto em função dos diâmetros de suas partículas. Para a classificação do tamanho das partículas constituintes do produto se utiliza a escala granulométrica da ABNT (NBR 6502/95). É importante mencionar que a condição do fluxo de um produto que contém diferentes granulometrias (partículas finas e grossas) é governada pelas propriedades de fluxo das menores partículas. As partículas mais grossas afetarão a tendência de agrupamento na boca de descarga e o impacto pode causar compactação do produto, ao longo do canal de fluxo (TEIXEIRA, 2006).

De acordo com a recomendação de Calil (1984) *apud* Nascimento (2008), pode-se classificar o produto armazenado em função do diâmetro das suas partículas, como mostra a tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Classificação do produto armazenado quanto à granulometria. Fonte: Calil (1984) *apud* Nascimento (2008).

Diâmetro (D) das partículas sólidas	Classificação do produto armazenado
$D > 0,42$ mm	Granulares
$0,42 \leq D \leq 0,149$ mm	Pulverulentos coesivo
$0,149 < D \leq 0,074$ mm	Pulverulentos coesivos finos
$D < 0,074$ mm	Pulverulentos coesivos extra finos

Segundo Batista (2009), os diâmetros médios das partículas podem ser determinados, pela equação 2.5, a qual descreve a razão do volume pela superfície média para toda distribuição.

$$d_{ps} = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{d_{pi}} \right)} \quad (2.5)$$

Sendo os parâmetros relacionados a equação: (d_{ps}) o diâmetro médio de Sauter; (x_i) a fração mássica retida e (d_{pi}) o diâmetro médio para cada partícula, o qual deve ser apresentar um diâmetro igual ao diâmetro de abertura das peneiras utilizadas.

Para Nascimento (2008), a análise granulométrica dos produtos armazenados é importante para a determinação do tipo de fluxo que irá ocorrer no silo, pois, a dimensão das partículas sólidas influencia diretamente na formação ou não de obstruções de fluxo.

2.4.3 Ângulo de atrito interno (φ_i) e Ângulo de atrito interno efetivo (φ_e)

O ângulo de atrito interno refere-se às condições internas do produto armazenado, dependendo do nível de pressões médias aplicado a todos os grãos. O aumento das pressões de confinamento irá tornar a amostra do produto mais densa. Dessa forma o ângulo de atrito interno aumenta com o peso específico ou com a diminuição do índice de vazios (NASCIMENTO, 2008).

O ângulo de atrito interno efetivo é uma medida da fricção entre as partículas, que depende da rugosidade, da forma e do tamanho das partículas. Para materiais não coesivos, o ângulo efetivo de atrito interno coincide com o ângulo de atrito interno, quando acontece o escoamento livre do material (CAMPOS, 2012).

Na obtenção desses ângulos se faz necessário entender o ensaio de cisalhamento da amostra, o qual é realizado por meio da célula Jenike. O círculo de tensões de Mohr (ver anexo I) é uma representação gráfica (ver figura 2.6) do estado de tensão em um ponto do meio contínuo. Sendo extremamente útil para problemas de tensão e deformação (ORTIGÃO, 1993).

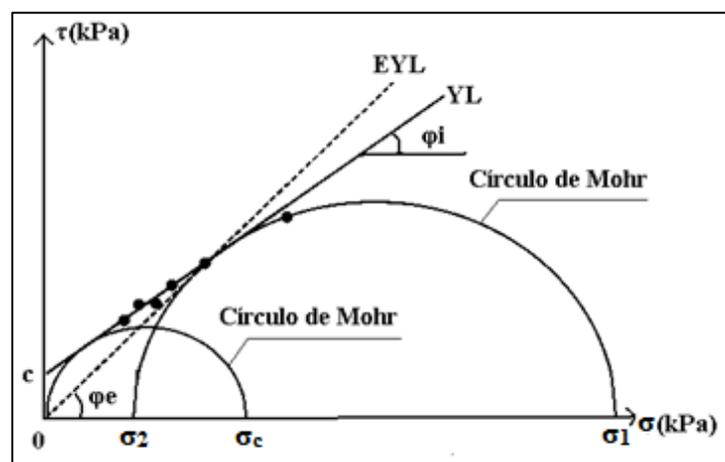


Figura 2.6 - Curva característica de (YL) e (EYL).

O lugar geométrico de deslizamento (YL) é uma função do grau de consolidação da amostra, sendo obtido quando o elemento do produto armazenado é cisalhado. É determinado pela envoltória de resistência, que é a relação entre a tensão de cisalhamento (τ) e a tensão normal (σ), representado pela curva que tangencia os círculos de tensões de Mohr, construídos com as tensões principais atuantes no produto (SCHULZE, 1997).

O efetivo lugar geométrico de deslizamento (EYL) mostrado na figura 2.6 foi introduzido por Jenike (1964), sendo representado por uma reta tangente ao círculo de tensões do fluxo de estado estável e passando pela origem. Quanto à tensão de cisalhamento é importante mencionar que sua existência se deve ao atrito entre massa/massa e a interseção do YL com o eixo da tensão de cisalhamento descreve a tensão de coesão (c) de um estado não consolidado, ou seja, a coesão é a tensão de cisalhamento sob tensão normal nula (SCHULZE, 1997).

A célula Jenike mostrada na figura 2.7 é um dispositivo de cisalhamento direto. Devido ser relativamente fácil na operação e baixo custo, a célula de cisalhamento de

translação, provou ser o mais versátil instrumento para teste de cisalhamento para aplicações, tornando-se então um padrão industrial (PALMA, 2005).

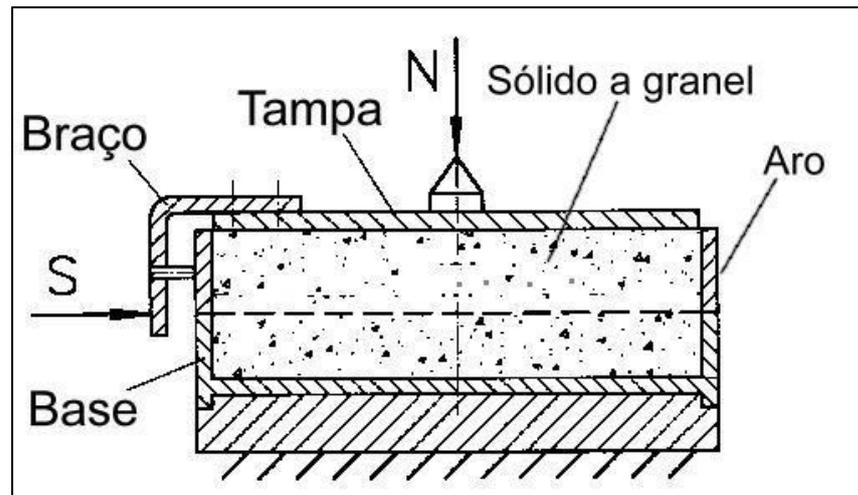


Figura 2.7 – Célula Jenike de cisalhamento. Fonte (ROSÁRIO e BEZERRA, 2004).

O ensaio de cisalhamento material/material, consiste em preparar um modelo criticamente consolidado e otimizado, por meio da seleção de uma primeira tensão normal, $\sigma_{p,1}$, calculada com base na massa específica aparente do material que será utilizado no ensaio, de acordo com a seguinte tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Relação entre massa específica aparente e tensão de consolidação inicial (pré-consolidação). Fonte: (ASTM, 1997)

ρ_b (kg/m ³)	$\sigma_{p,1}$ (kPa)
< 300	aproximadamente 1,5
300 a 800	aproximadamente 2,0
800 a 1600	aproximadamente 2,5
1600 a 2400	aproximadamente 3,0
>2400	aproximadamente 4,0

Em seguida, se eleva a tensão normal de pré-consolidação, de acordo com a norma ASTM (1997), onde se verificam os valores relacionados às massas específicas aparentes mostradas na tabela 2.4.

Com a obtenção dos pares de tensão ($\sigma \times \tau$) plota-se o círculo de tensões de Mohr. Tendo como objetivo descrever o comportamento do fluxo do produto, por meio dos lugares geométricos de deslizamentos.

Tabela 2.4 – Relações entre tensões de pré-consolidação. Fonte: (ASTM, 1997)

$\sigma_{p.2} = 2\sigma_{p.1}$
$\sigma_{p.3} = 4\sigma_{p.1}$
$\sigma_{p.4} = 8\sigma_{p.1}$

A figura 2.8 mostra um cilindro hipotético preenchido com material, e compactado com uma tensão de pré-consolidação. Sendo (σ_1) a maior tensão principal de consolidação. Após algum tempo, o cilindro é removido, ficando a amostra submetida a uma tensão crescente, até que haja o rompimento da amostra com tensão não confinada (σ_c). A tensão não confinada resulta do círculo de tensões que é tangente ao lugar geométrico de deslizamento. Esta tensão representa a resistência ao deslizamento do produto armazenado em uma superfície livre (SCHULZE, 1997).

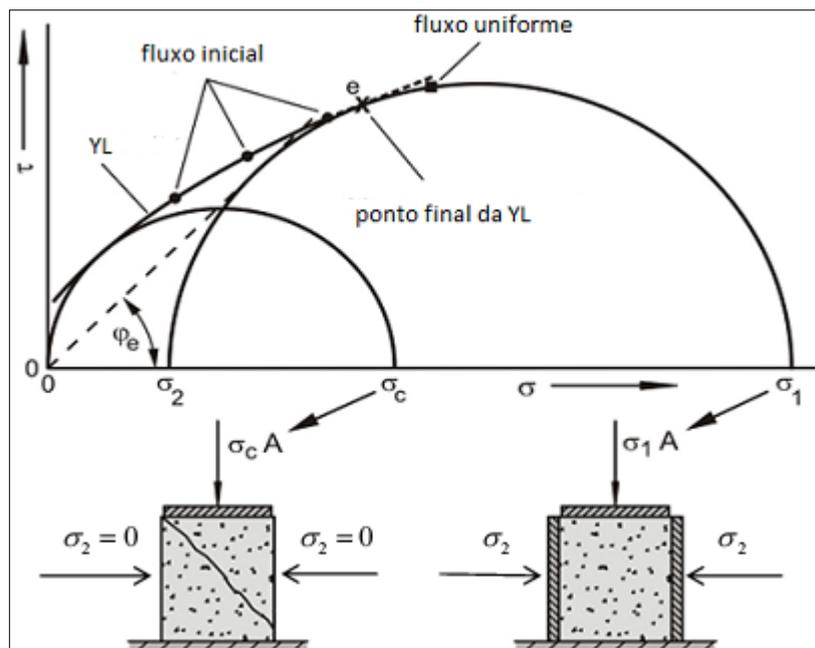


Figura 2.8 - Comparação da YL para teste de compressão uniaxial (Fonte: SCHULZE, 1997)

Como no plano vertical, a tensão de cisalhamento é zero, a tensão vertical é idêntica a maior tensão principal (σ_1). Tensões principais são as tensões normais ao plano onde ocorre o cisalhamento do produto. Sendo a maior tensão principal igual a tensão vertical e a menor tensão principal (σ_2) igual a tensão horizontal. Para cada estado de tensões definido pela maior tensão principal, uma tensão não confinada pode ser determinada. É importante mencionar que através do conhecimento do lugar geométrico de deslizamento e do lugar

geométrico com a parede que podemos determinar a forma da tremonha e as dimensões da boca de descarga, para que ocorra o fluxo desejado.

2.4.4 Ângulo de atrito com a parede (φ_w)

O ângulo de atrito com a parede é uma medida do atrito entre as partículas e a parede, que depende da rugosidade, da forma e do tamanho das partículas e da rugosidade da parede. Quanto maior à rugosidade da parede, maior o atrito no contato com as partículas. Tendo a tangente do ângulo de atrito com a parede como corresponde ao coeficiente de atrito com a parede (μ_w). Pela análise da abordagem gráfica de Jenike (1964) o ângulo de atrito com a parede possibilita determinar o ângulo de inclinação da tremonha cônica com a vertical, para incidência de fluxo mássico e o fator de fluxo da tremonha.

Marinelli e Carson (2001) *apud* Naka (2010) em seu trabalho relatam que o escoamento tipo massa tem ação direta com o ângulo de atrito do produto armazenado e a parede do silo. Muitos produtos aderem à superfície quando armazenados por um período sobre pressão o que resulta em ângulos de atrito com a parede, maiores, necessitando assim de tremonhas com inclinações maiores.

No caso do atrito com a parede, geralmente, a YL é uma reta que passa pela origem dos eixos das tensões. O ângulo φ_w não é necessariamente constante, pois sofre variação inversa a tensão normal σ_w . Na figura 2.9 observa-se o ângulo de atrito com a parede, o qual é definido pelas equações 2.6 e 2.7. Ao longo do eixo vertical são definidos os valores de pressão normal aplicada ao material, enquanto no eixo vertical se representa a medida de cisalhamento das tensões necessárias para superar o atrito entre a amostra e a parede do silo, a união desses pares ordenados define a inclinação da reta para determinação do coeficiente de atrito existente entre material e parede.

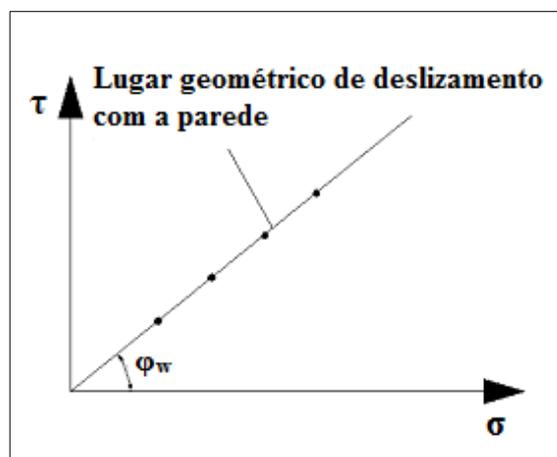


Figura 2.9 - Ângulo de atrito material/parede.

$$\varphi_w = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_w}{\sigma_w} \right) \quad (2.6)$$

$$\mu_w = \tan \varphi_w \quad (2.7)$$

2.4.5 Ângulo de repouso (δ_r)

O ângulo de repouso é outro parâmetro que é usado para avaliar a escoabilidade de sólidos granulados. O ângulo de repouso é definido como o ângulo da superfície livre inclinada de uma pilha de material granulado em relação à base horizontal da pilha. Aqui também o ângulo de repouso não é constante para um determinado material e é dependente da maneira que a pilha é formada. Existem três formas de quantificar o ângulo de repouso: o ângulo de repouso ‘derramado’ (*poured angle of repose*), o ângulo de repouso ‘drenado’ (*drained angle of repose*) e o ângulo de repouso dinâmico (*dynamic angle of repose*) (MCGLINCHEY, 2005).

O primeiro é formado a partir de uma pilha formada derramando o material granulado sobre uma superfície plana horizontal (Fig. 2.10(a)). O segundo é o ângulo medido na face cônica interna (em relação à horizontal) de uma pilha de material, em um container, que foi formada quando drenada através de um orifício localizado na superfície plana superior do container (ou seja, o material estava na parte superior do container e foi drenado para o seu interior) (Fig. 2.10(b)). O terceiro tipo de ângulo de repouso é o ângulo interno em relação à horizontal formado na pilha dentro de um cilindro girando vagarosamente (Fig.2.10(c)).

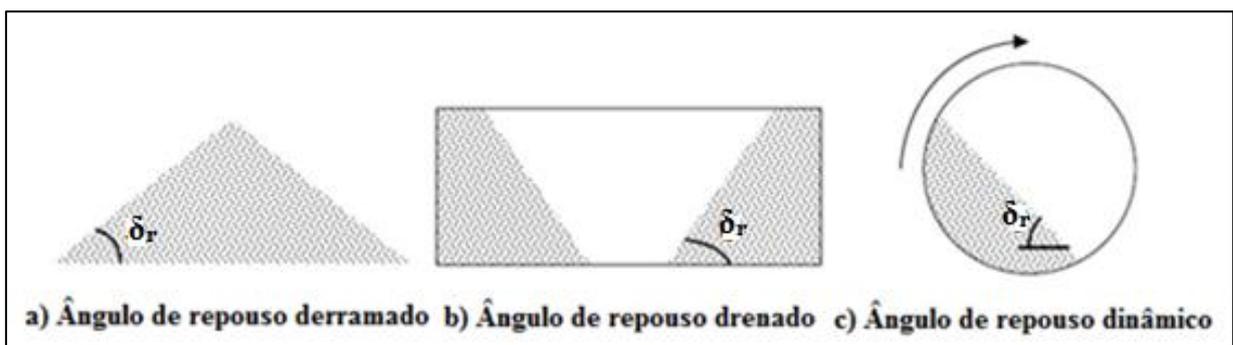


Figura 2.10 – Tipos de ângulos de repouso (McGlinchey, 2005)

Novamente existem várias variáveis que podem influenciar na formação desses ângulos, tais como altura de queda para a formação da pilha derramada, tipo e tamanho do orifício para o ângulo de repouso drenado e velocidade do cilindro na formação do ângulo de repouso dinâmico. Outra questão é que os três tipos de ângulos de repouso são diferentes para um mesmo material. Os resultados mais confiáveis para a medição do ângulo de repouso são

para granulados de fluxo livre até levemente coesos, a partir daí os resultados tornam-se mais imprecisos e sem uma regular repetição dos resultados. Apesar das dificuldades e da imprecisão das medições, a medição do ângulo de repouso fornece uma primeira indicação da escoabilidade do material. Há inclusive uma tabela para esta classificação de escoabilidade, como pode ser visto na tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Classificação do escoamento pelo ângulo de repouso. Fonte: Gaylord e Gaylord (1984) *apud* Teixeira (2009).

Ângulo de repouso (δ_r°)	Produto/Tipo de fluxo
25 a 30	Produto granular/Fluxo livre
30 a 38	Produto granular/Fluxo fácil
38 a 45	Produto pulverulento/Instabilidade no tipo de fluxo
45 a 55	Pós coesivos/ Podem requerer equipamentos especiais
55 a 70	Pós muito coesivos/ Requerem equipamentos especiais

Para Benedetti (1987), o ângulo de repouso sofre influência decisiva pelo tamanho, forma, orientação das partículas e umidade do produto. Sua importância se verifica na aplicação dos cálculos de telhados das coberturas dos silos e na classificação do escoamento do produto quanto ao grau de dificuldade. Apresenta-se como uma propriedade exclusiva dos produtos sólidos e muitas vezes sua determinação pode resultar em valores que apresentam inconsistências pelo fato dos produtos em estudo possuírem determinado grau de coesividade.

Segundo Dalbello *et al.* (1994), o ângulo de repouso corresponderia ao ângulo de atrito interno para o caso de pressões de confinamento praticamente nulas, ou ainda, ao ângulo de atrito interno do produto depositado num estado extremamente solto.

2.4.6 Umidade (w%)

Holdich (2002) *apud* Naka (2010) em seu trabalho considera que a umidade, em certas condições, pode contribuir como um facilitador do escoamento de determinados produtos pulverulentos armazenados em silos uma vez que pode atuar como um lubrificante ou impedir a formação de forças de atração eletrostática entre as partículas reduzindo a coesividade e o atrito interno e, portanto, evitando a interrupção do próprio escoamento. Porém, para Palma (2005), a capacidade de fluir (fluidez) de alguns produtos armazenados, geralmente grãos finos (partículas menores que 100 μm), torna-se pior com o aumento da umidade. Um produto onde se observa perfeitamente a dificuldade em escoar de acordo com o aumento da umidade é a areia.

A umidade é definida como a massa de água existente no minério, isto é, a água de superfície dividida pela massa do minério úmida. Em tratamento de minérios, a umidade é definida em base seca e em base úmida. O cálculo da umidade, expresso em (%), é feito com auxílio da equação 2.8.

$$w(\%) = \frac{m}{M} \times 100 \quad (2.8)$$

Sendo (m), massa de água presente na amostra, medida em gramas e (M) a massa total da amostra medida em gramas.

Segundo Fekete *et. al.* (2007) a presença de água pode solubilizar os sais contidos no produto e ocasionar o fenômeno da cristalização na região de contato entre as partículas deste produto e promover assim a formação de “pontes líquidas” que dificultarão o escoamento após o armazenamento em silos. Entretanto o escoamento de um sólido a granel depende das forças de coesão existentes entre as partículas individualmente sendo que elas podem ser resultado da presença do teor de umidade existente no produto. Como exemplo pode-se recordar a época da infância e da brincadeira de encher um balde com areia na praia. Ao virar-se o balde de cabeça para baixo, dependendo do teor de umidade da areia, granulometria, dimensões do balde, material com que foi fabricado o balde, parte da areia fica sem escoar.

2.4.7 Função de fluxo (FF)

A função de fluxo é uma relação entre tensões definida pela tensão não confinada em função da maior tensão principal de consolidação [σ_c (σ_1)]. Portanto à medida que o esforço de consolidação varia, implica em uma modificação do resultado da tensão não confinada, gerando diferentes FF para o escoamento. Quanto mais consolidado está o produto, maior é a tensão σ_1 . No gráfico ($\sigma_1 \times \sigma_c$) mostrado na figura 2.11 a curva obtida é denominada de função de fluxo.

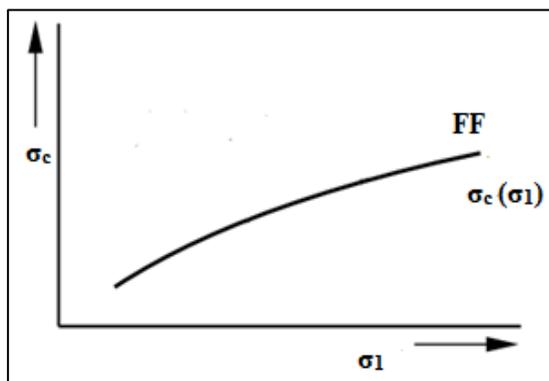


Figura 2.11 - Função de Fluxo. Fonte: SCHULZE (1997).

A função fluxo e o índice de escoabilidade devem ser conhecidos para prevenir os problemas de fluxo durante a descarga de produtos sólidos particulados.

2.4.8 Índice de escoabilidade (ff)

Segundo Schulze (2007), a fluidez de granéis sólidos caracteriza-se principalmente pela sua elasticidade confinada, em função do esforço de consolidação e o tempo de armazenamento. Portanto, o índice de escoamento (ff) é utilizado para caracterizar de forma numérica a fluidez do sólido de acordo com a tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Classificação da ff dos produtos. Fonte: SHULZE (1997).

$ff < 2$	produto muito coesivo
$2 < ff < 4$	produto coesivo
$4 < ff < 10$	produto que escoam com facilidade
$ff > 10$	Produto de escoamento livre

De acordo com Jenike (1964) *apud* Teixeira (2006), a ff pode ser classificada de acordo com determinados valores limites. Sendo esta propriedade uma relação direta entre a pressão de consolidação e a resistência não confinada, como pode ser verificado por meio da figura 2.12.

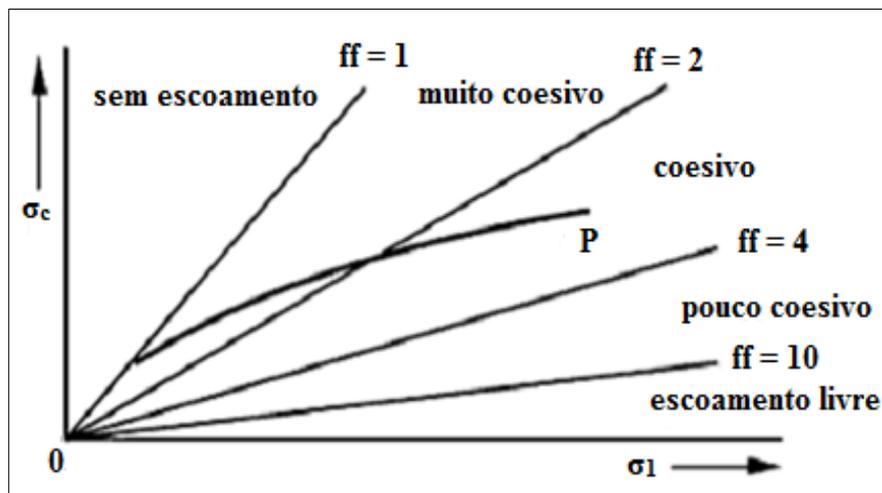


Figura 2.12 - Classificação da fluidez de acordo com o ff. Fonte: SHULZE (1997).

Sendo a curva P na figura 2.12 a representação da função de fluxo do produto e para caracterizar o comportamento de fluxo dos produtos particulados armazenados, a relação da tensão σ_1 pela tensão σ_c da equação 2.9 define o ff.

$$ff = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad (2.9)$$

Cada produto apresenta uma resistência adquirida em função da tensão de consolidação, ou seja, existem produtos que apresentam um aumento na tensão não confinada de ruptura maior do que outros, para o mesmo aumento na tensão de consolidação maior.

2.4.9 Fator de fluxo da tremonha (ff_c)

O fator fluxo da tremonha é dado pela relação entre σ_1 e a tensão atuando em um arco estável imaginário (σ_{1a}), como mostrado na figura 2.13. O fator fluxo da tremonha define-se pela equação 2.10.

$$ff_c = \frac{\sigma_1}{\sigma_{1a}} \quad (2.10)$$

Assim como o ff o ff_c também é usado para indicar a fluidez do produto armazenado. Porém, ao contrário do ff , quanto mais baixo seu valor, melhor é a fluidez do produto (PALMA, 2005).

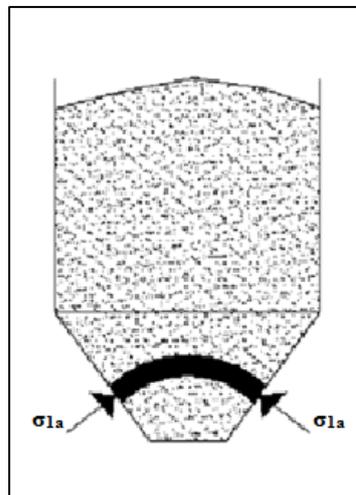


Figura 2.13 - Representação da tensão σ_{1a} atuando em um arco estável. Fonte: TEIXEIRA (2006).

Os tipos de obstruções observados no momento da descarga e relatados por Marinelli e Carson (2001) podem ser basicamente identificados como arco mecânico entre partículas e arco coesivo entre as partículas como visto anteriormente. Como regra, em um sólido a granel as forças coesivas tendem a serem maiores com o decréscimo do tamanho das partículas. Para evitar o arqueamento dos sólidos nas tremonhas de silos, devem-se considerar as tensões que

atuam na tremonha. Quando a massa sólida é descarregada a partir de um silo com fluxo de massa (ver capítulo a seguir), um campo de tensões radiais se desenvolve na tremonha. A tensão σ_{1a} do campo de tensões radiais (pelo menos a uma distância suficiente da seção vertical do silo) é proporcional ao diâmetro do funil. Assim, σ_{1a} tende a zero no vértice do funil (figura 2.14).

Jenike (1964) *apud* Shulze (1997) assume que o arco da massa tem uma forma suave, com uma espessura constante na direção vertical, e que o arco deve levar apenas o seu próprio peso, ou seja, toda a carga do material acima do arco é desprezível.

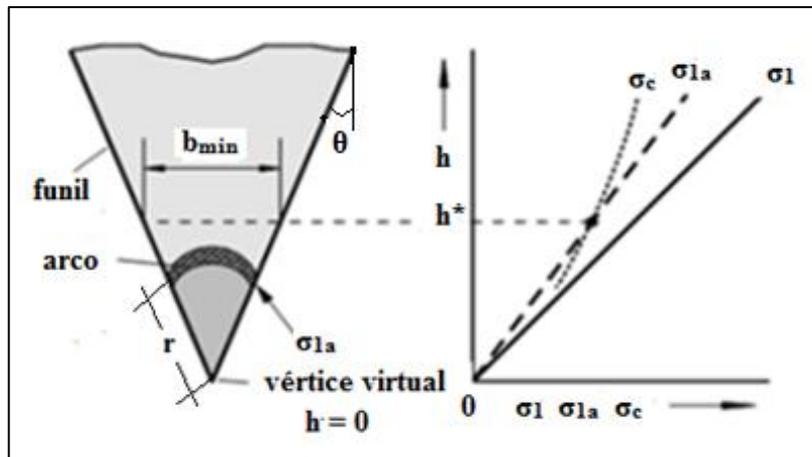


Figura 2.14 - Modelo para determinação do diâmetro mínimo de saída, b_{\min} , para evitar o arqueamento. Fonte: SHULZE (1997).

Analisando o gráfico da figura 2.14 se observa que no ponto de interseção das tensões ($\sigma_{1a} = \sigma_c$) a altura (h^*) determina a distância mínima que deve estar o b_{\min} do vértice virtual da tremonha para que não ocorra a formação de arcos mecânicos ou coesivos, dessa forma a tensão σ_{1a} se anula e o fluxo desenvolvido passa a ser mássico. Para o cálculo da tensão σ_{1a} , determinada pela equação 2.11 é necessário conhecer os ângulos φ_c e φ_w , os quais são necessários para determinar a geometria e inclinação da tremonha pelo ângulo θ .

$$\sigma_{1a} = \frac{2rsen\theta g \rho_b}{1+n} \quad (2.11)$$

Na equação 3.8 assumindo ρ_b , como sendo constante e o parâmetro n descreve o perfil da tremonha, sendo $n = 0$ para tremonhas trapezódais e $n = 1$ para tremonhas cônicas. O termo $(2rsen\theta)$ representa o diâmetro de descarga da tremonha. A coordenada (r) mede a distância

do ápice do funil até o ponto de apoio do arco e (g) a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$) (SHULZE, 1997).

2.5 VAZÃO DE SÓLIDOS PARTICULADOS EM SILOS

A vazão em massa devido a ação da gravidade de produtos sólidos particulados armazenados em silos é de fundamental importância como experimento do escoamento dos produtos a serem armazenados, pois dessa forma se verifica na prática o que ocorre com o comportamento do escoamento. Tendo em vista que os diversos parâmetros que influenciam na descarga de sólidos granulares armazenados em silos, tornam o comportamento da vazão de massa difícil de prever. Muitas equações desenvolvidas empiricamente ou baseadas em uma analogia com o escoamento de líquidos sob as condições de gravidade estão dispostas na literatura.

Segundo Rotter (2001) *apud* Costa (2008), a vazão de massa num silo protótipo pode ser determinadas com base nas equações 2.12 e 2.13, as quais estimam a vazão máxima para fluxo por gravidade em um silo, respectivamente para tremonhas circulares e tremonhas retangulares.

1ª) Para tremonhas com saídas circulares:

$$\frac{dm}{dt} = 0,6\gamma G_f \frac{(b - k_s d_{pm})^{2,5}}{\sqrt{g}} \quad (2.12)$$

2ª) Para tremonhas com saídas retangulares ($L > D$):

$$\frac{dm}{dt} = 0,6\gamma G_f \frac{(L - k_s d_{pm})(b - k_s d_{pm})^{2,5}}{\sqrt{g}} \quad (2.13)$$

Sendo:

γ = Peso específico do produto (N/m^3);

G_f = Fator de correção;

b = Diâmetro da boca de descarga (m);

d_{pm} = Diâmetro médio das partículas (m);

k_s = constante de forma das partículas

- 1,6 para partículas próximas ao formato esférico
- 2,4 para partículas muito angulares

Para a determinação do fator G_f , é preciso durante procedimento experimental da vazão, observar como o fluxo do material está ocorrendo no interior da tremonha do silo. No caso de haver contato local do produto com a abertura de descarga da tremonha, o fator de correção G_f passa a ser calculado pela equação 2.14.

$$G_f = 0,75 \frac{[1 - 0,08 \cos(\theta)]}{\sqrt{\sin(\theta)}} \quad (2.14)$$

Sendo θ o ângulo de inclinação da tremonha com a vertical. Caso o fluxo seja interno, o valor de G_f será igual a 1,0.

Esta metodologia proposta prevê a vazão máxima teórica que um silo com de descarregamento pela ação da gravidade. Ressaltando que o comportamento da vazão de sólidos granulares em silos pode ser observado através de experimentos com paredes externas de vidro ou acrílico, como mostra a figura 2.15.

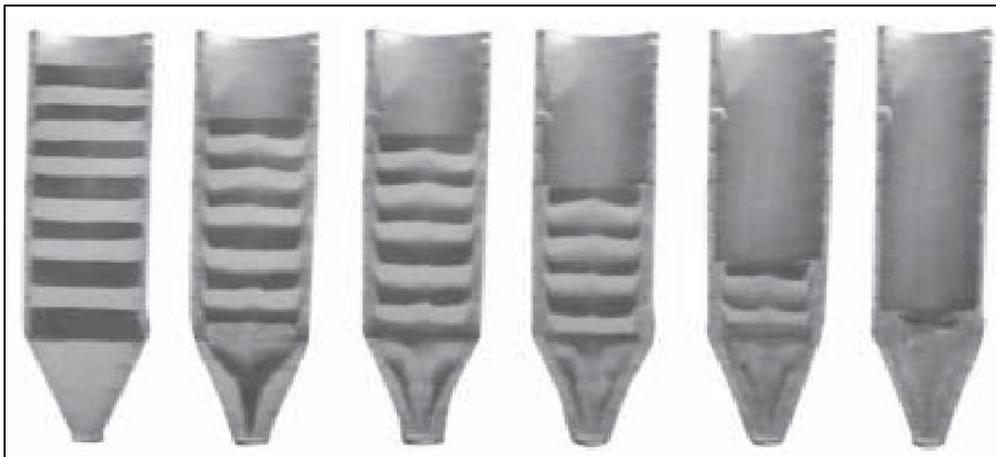


Figura 2.15 - Imagens da descarga do silo com fluxo mássico. Fonte: AMORÓS *et al.* (2000).

Na tremonha as tensões diminuem no sentido descendente conforme mostra a Figura 2.15, o que provoca uma dilatação nos sólidos granulares ao fluírem para baixo, isto é, passam a apresentar menor densidade e maior porosidade. Sendo que quando se aumenta o tamanho da saída de descarga, as tensões e a densidade da massa granular diminuem na direção da abertura de saída. Assim, a dilatação do sólido granular e a diminuição da pressão do ar passam a ter menos influem para formação de arcos.

No capítulo a seguir são definidas as características do fluxo de massa, por meio de abordagens sobre à teoria do arqueamento, cujo objetivo é a determinação de um diâmetro mínimo de descarga para a ocorrência do fluxo.

CAPÍTULO III

DIMENSIONAMENTO DE TREMONHAS CÔNICAS - FLUXO MÁSSICO

O presente capítulo apresenta um estudo teórico do fluxo de massa para produtos granulares em silos com tremonhas cônicas e aborda a teoria do arqueamento, juntamente com as expressões para determinar o diâmetro mínimo de descarga definidas pelas teorias de Jenike e de Enstad.

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Segundo Palma (2005) o primeiro passo, para dimensionar uma tremonha, com escoamento do tipo fluxo de massa, é a determinação das propriedades de fluxo do produto armazenado e o passo seguinte é a escolha da forma geométrica. Para Perry (1980) *apud* Monteiro (2005) no fluxo de massa todo o material no silo se movimenta quando qualquer parcela é retirada, ou seja, o escoamento é uniforme desde o topo da seção de armazenamento.

Para o dimensionamento de tremonhas cônicas para fluxo de massa deve-se evitar a formação de um arco espontâneo sobre a abertura de escape de um silo durante a etapa de descarga do produto armazenado, o que é um dos maiores problemas enfrentados quando ao processo de dimensionamento do silo.

Para Gomide (1983), em muitos casos, o ponto de descarga do material armazenado é crítico na operação de processos, porque o escoamento pode ser afetado por variações da vazão, tais com a formação de arcos.

Objetivando a previsão do regime de fluxo de massa para o produto lama vermelha este trabalho apresenta duas diferentes abordagens para determinação do diâmetro de descarga do silo. Abordagens essas fundamentadas nas teorias propostas por Jenike e Enstad.

3.2 TIPOS DE FLUXO

A partir da década de 50 com o trabalho pioneiro do Dr. Andrew W. Jenike se obteve a produção de uma completa teoria do escoamento de sólidos granulares. Jenike juntamente com seu aluno que posteriormente tornou-se seu sócio, Jerry R. Johanson, descobriram que há dois modos basicamente diferentes de escoamento em silos: fluxo de massa (*mass flow*) e fluxo de funil (*funnel flow*) (SCHULZE, 1997).

3.2.1 Fluxo de Massa

Marinelli e Carson (2001), em seu trabalho, relatam que o fluxo tipo massa tem relação direta com o ângulo de atrito do produto armazenado e a parede do silo que por sua vez é afetado diretamente por:

- a) material de construção da parede do silo – em geral, quando mais liso for à superfície da parede, menor é o ângulo de atrito com a parede e, portanto menor poderá ser θ ;
- b) temperatura de armazenamento do produto e das paredes do silo;
- c) umidade – ocorrência de migração de umidade das paredes para o produto nos casos em que este produto foi introduzido a temperaturas mais elevadas que o próprio silo;
- d) corrosão – dependendo do material utilizado na fabricação, a oxidação das paredes do silo eleva o atrito superficial;
- e) tempo de armazenamento – muitos materiais aderem à superfície quando armazenados por um período sobre pressão o que resulta em ângulos de atrito com a parede maior, necessitando assim de tremonhas com inclinações maiores.

a) Como ocorre o fluxo de massa

O fluxo em massa ocorre em geral para produtos granulares com pouca coesão, onde toda a massa contida no silo se movimenta homogeneamente conforme mostra a figura 3.1. Outra característica importante é que as primeiras partículas que entram são as primeiras que saem evitando assim que haja segregação do produto. Nesta modalidade de escoamento o peso específico do produto retirado praticamente se mantém constante e a altura do silo exerce pouca influência no escoamento (NASCIMENTO, 2008).

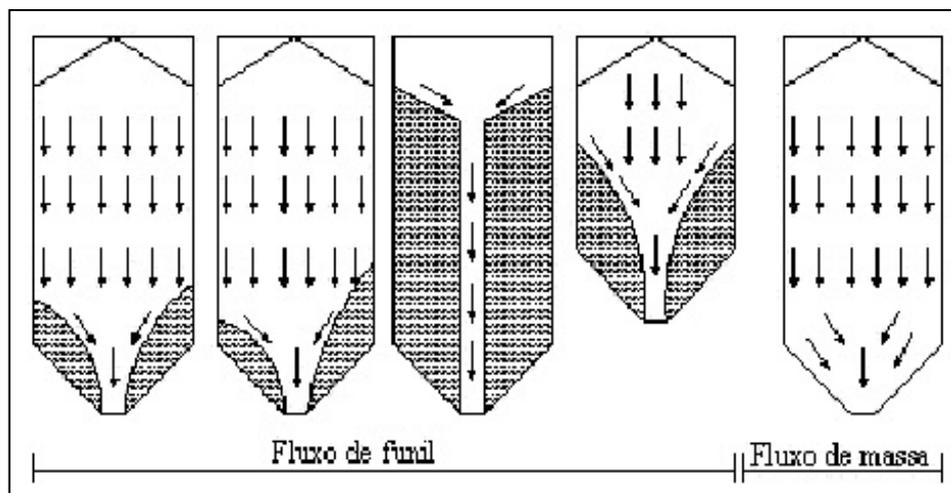


Figura 3.1 - Padrões de Fluxo para produtos sólidos (Fonte: BATISTA, 2009).

A definição do material da parede a ser utilizado para dimensionamento do silo é decisiva, pois a rugosidade das paredes irá interferir no escoamento do produto armazenado podendo comprometer as etapas subsequentes ao armazenamento e ainda fazer-se necessária à instalação de dispositivos auxiliares que promovam o escoamento esperado (BATISTA, 2009).

b) Condição necessária para obtenção do Fluxo de massa

As condições necessárias para o fluxo de massa dependem da inclinação da parede da tremonha e o coeficiente de atrito na parede (MASUDA, 2006). Tendo sido feita a escolha da forma geométrica da tremonha (Figura. 2.5a), determinados os ângulos de atrito com a parede e o ângulo de atrito interno efetivo, pode ser determinada a máxima inclinação da tremonha com a vertical, a qual deve assegurar um fluxo de massa.

Para Palma (2005), uma vantagem do fluxo do tipo mássico é o fato de que o silo pode ser totalmente descarregado por gravidade, sem o auxílio de qualquer dispositivo de retirada. Isto permite que toda capacidade de armazenamento da unidade seja aproveitada.

A abertura de descarga da tremonha deve ter uma dimensão suficiente para que não ocorram obstruções durante a descarga do produto armazenado. Normalmente para silos com fluxo de massa, o objetivo é evitar a formação da obstrução por arcos (PALMA, 2005).

Descreve-se aqui o comportamento de uma partícula do produto armazenado durante a operação de descarga em um silo com fluxo de massa. À medida que a partícula vai descendo, a consolidação aumenta e conseqüentemente a tensão de consolidação σ_1 também. Como pode ser visto na Figura 3.2, inicialmente a tensão aumenta com a profundidade, permanecendo constante a partir de certa altura. Na transição entre a parede vertical e a tremonha ocorre um pico de tensão. A partir deste ponto, a pressão vai diminuindo à medida que o produto vai sendo descarregado (PALMA, 2005).

Observando a Figura 3.2, faz-se a seguinte análise: se ($\sigma_{1a} > \sigma_c$), não ocorre à formação de arcos durante a descarga do produto, entretanto se ($\sigma_{1a} < \sigma_c$), ocorre formação de arco. No entanto, se a dimensão da abertura de descarga é diminuída, mantendo-se constantes as demais variáveis (inclinação da tremonha, produto, umidade, etc.) de maneira que se a tensão não confinada supera a tensão atuante no arco, ocorrerá à formação de arcos (PALMA, 2005).

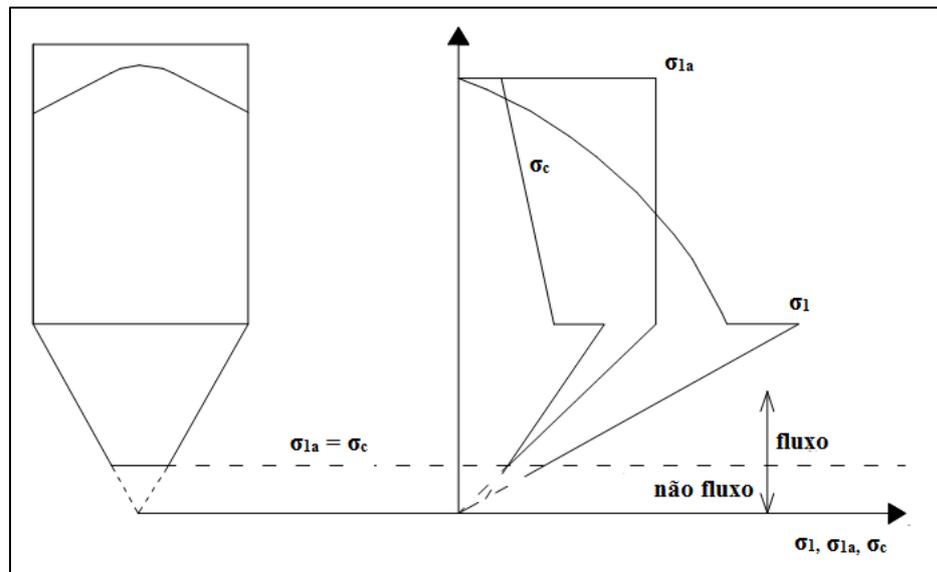


Figura 3.2 - Análise para a não formação de arcos. Fonte: Teixeira (2006).

É importante ressaltar que a descarga de um silo por fluxo mássico não é interrompida pela formação de canais, uma vez que todo o material se move de uma vez. Além disso, as tensões que aparecem durante a descarga do silo são previsíveis, o que favorece a não formação de arcos que interrompam o fluxo (AMORÓS, *et al.* 2002).

Entretanto na maioria dos casos, as obstruções que ocorrem na prática durante o fluxo devem-se à concepção de projetos inadequados, bem como à falta de conhecimento das propriedades dos produtos armazenados, visto que estas exercem importante papel no comportamento de pressões e nos fluxos em silos (CALIL Jr, 1990).

3.2.2 Fluxo em Funil

O fluxo de funil (ver Figura 3.1) ocorre quando a parede do silo não é suficientemente íngreme, e sua superfície não é bastante lisa. O movimento das partículas ocorre das bordas para dentro tão logo se inicie a retirada do material pela abertura da moega, sendo bastante prejudicial para produtos cujas partículas segregam.

Uma vez formado o canal preferencial, todo o deslocamento restante irá acontecer por este caminho de forma contínua. O cisalhamento ocorrerá entre as camadas das partículas, o que pode representar certa vantagem para produtos compostos de partículas duras e abrasivas por apresentar menor desgaste das paredes do silo. Para este tipo de escoamento deve-se considerar a ocorrência do fenômeno da segregação das partículas que compõem o produto armazenado.

Praticamente não existe atrito do material com a parede do silo, o que protege o desgaste. Isto pode ser interessante para algumas aplicações de grande porte, utilizando-se material de alto poder abrasivo, tais como o carvão.

3.2.3 Fluxo misto

Em Benink, 1989 *apud* Roberts, 1991 se identificou um padrão intermediário de escoamento que ocorre entre as condições de fluxo de massa e fluxo funil. Em sua teoria, a distribuição de pressão vertical é considerada juntamente com as condições de contorno da parede, assim como a relação altura/diâmetro (H^*/D^*) do silo. Ele também desenvolveu uma relação para a altura crítica (H_{cr}) de acordo com a transição dos padrões de fluxo, levando-se em consideração vários materiais e geometrias de silos.

No escoamento misto, inicialmente observa-se o tipo de escoamento mássico e posteriormente, devido às forças de adesão das partículas com a superfície do silo, o material passa a escoar em regime de funil. Uma vez definido o tipo de silo selecionado para um determinado produto faz-se necessário definir a geometria da tremonha mais adequada para que o escoamento possa ser o mais eficiente possível (PALMA, 2005).

3.3 TEORIAS DO ARQUEAMENTO EM TREMONHAS

A formação espontânea de um arco estagnado suportando produto particulado, ou mesmo durante o fluxo é conhecido como arqueamento e é função direta da geometria da tremonha e da abertura de saída entre outros fatores (DRESCHER *et al.* 1995). Existem diferentes abordagens teóricas para a formação de arcos, as quais apresentam evidentes divergências na literatura. Drescher *et al.* (1995) e Jing e Li (1998) relatam que a teoria desenvolvida por Jenike para a formação de arcos tem recebido diversas modificações e contribuições.

Segundo Marinelli e Carson (2002), serve como regra geral que a saída circular da tremonha cônica deve ser 3 ou 4 vezes maior que a maior partícula do sólido. Tomando como referencial o trabalho desenvolvido por Drescher *et al.* (1995) verifica-se que a análise do arqueamento estende-se em duas soluções teóricas (Figura 3.3): (1) Para tensões que consolidam o material a granel em uma moega e dão origem a deformações; e (2) Para tensões que agem em um arco ou cúpula considerados como um membro estrutural.

As tensões de consolidação correspondem a maior deformação cisalhante onde a condição EYL se aplica e sua magnitude é proporcional a distâncias medida a partir do vértice

virtual da moega. E somente as maiores tensões principais, que se desenvolvem próximo às paredes da tremonha, assumem condição para afetar a consolidação (DRESCHER *et al.* 1995).

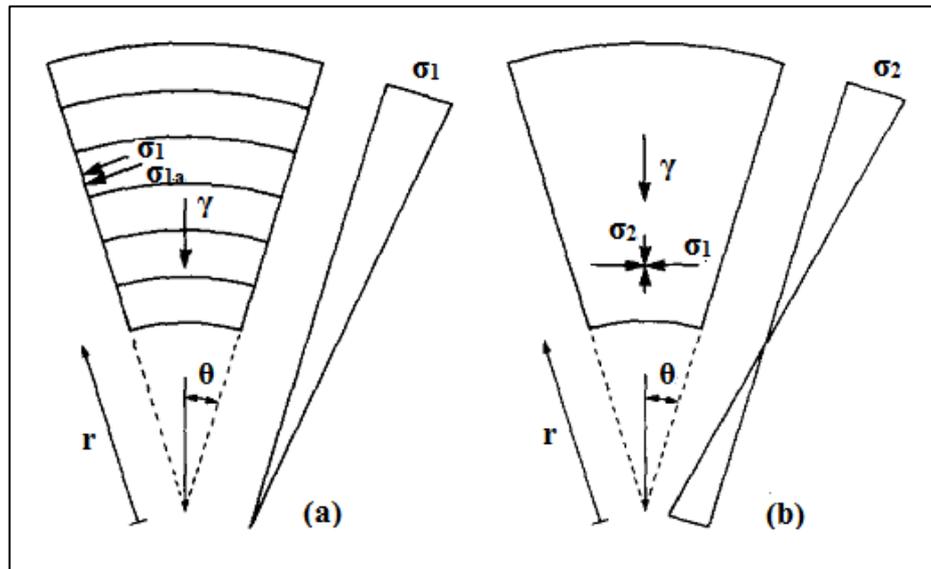


Figura 3.3 - (a) Abordagem pela deformação cisalhante; (b) Abordagem para massa única.

Fonte: DRESCHER *et al.* (1995).

Enstad (1981) em seu trabalho desenvolveu uma abordagem na qual o sólido granular armazenado num silo é considerado como meio contínuo, onde a formação de arco ocorre quando há uma condição de equilíbrio sem suporte inferior a este (ver Figura 3.3b). Na abordagem de Enstad para a teoria do arqueamento existem duas soluções teóricas. A tensão de consolidação (σ) e o campo de tensões radiais comportam - se razoavelmente de acordo com a equação 3.1 (DRESCHER *et al.*, 1995).

$$\tau = \sigma \tan \varphi_e \quad (3.1)$$

A segunda considera que o equilíbrio global da massa do material consolidado obedeça à equação 3.2. Ambas as soluções se baseiam pelo método das diferenças repartidas.

$$\tau = \sigma \tan \varphi_i + c \quad (3.2)$$

As teorias apresentam formas diferentes para a formação dos arcos, fato este que se devem as relações existentes entre os parâmetros tensão de consolidação, tensão de coesão, ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito, parâmetros fundamentais na formação do arco.

3.4 DIMENSIONAMENTO DE TREMONHAS

A expressão proposta pela abordagem de Jenike para o dimensionamento de diâmetros de descarga é uma função da tensão de consolidação principal atuante no arco. Enquanto que na expressão para o mesmo propósito, definida pela abordagem de Enstad, a tensão principal atuante no arco é considerada nula, ou seja, o arco não apresenta suporte na parte inferior.

3.4.1 Abordagem de Jenike

Por essa abordagem, se um arco coesivo se forma numa tremonha, uma força resultante se origina a partir do peso do sólido granulado, sendo transferida para as paredes da tremonha. Este efeito é representado pela tensão principal requerida para suportar um arco estável, σ_{1a} . O arco tem uma massa sólida de espessura constante na direção vertical, suportando apenas o seu próprio peso, ou seja, qualquer carga de massa acima do arco é desprezada. A partir de um ângulo de inclinação da tremonha (ângulo de projeto), juntamente com a equação 3.8 se calcula σ_{1a} (SCHULZE, 1997).

O fator de fluxo da tremonha depende das propriedades de fluxo (φ_w , φ_e) e da forma geométrica da tremonha. Sendo determinado por meio dos parâmetros (n , θ) e pelos diagramas da figura 3.4, representados pela relação entre o ângulo de atrito material/parede e o ângulo de inclinação da tremonha, referente a quatro situações de ângulos de atrito interno efetivo.

Para determinar os diâmetros de descargas das tremonhas Jenike propôs o procedimento descrito a seguir. Baseia-se no fato de que tanto σ_{1a} quanto σ_1 são proporcionais ao diâmetro de descarga da tremonha ($2r \sin \theta$), o qual por sua vez, é uma função da distância, r e do ângulo de inclinação da tremonha.

Em relação ao ângulo de inclinação da tremonha cônica, Jenike propõe uma margem de segurança, de 3° a 5° para que ocorra escoamento, a qual deve ser subtraída do ângulo de inclinação da tremonha estimado, pois os limites de fluxo de massa devem ser calculados com garantia (SCHULZE, 1997).

Uma margem de segurança de 2° a 3° pode ser suficiente se as propriedades do sólido granulado não mudam com o tempo, e se os ângulos de atrito máximo de parede foram determinados com precisão (SCHULZE, 1997).

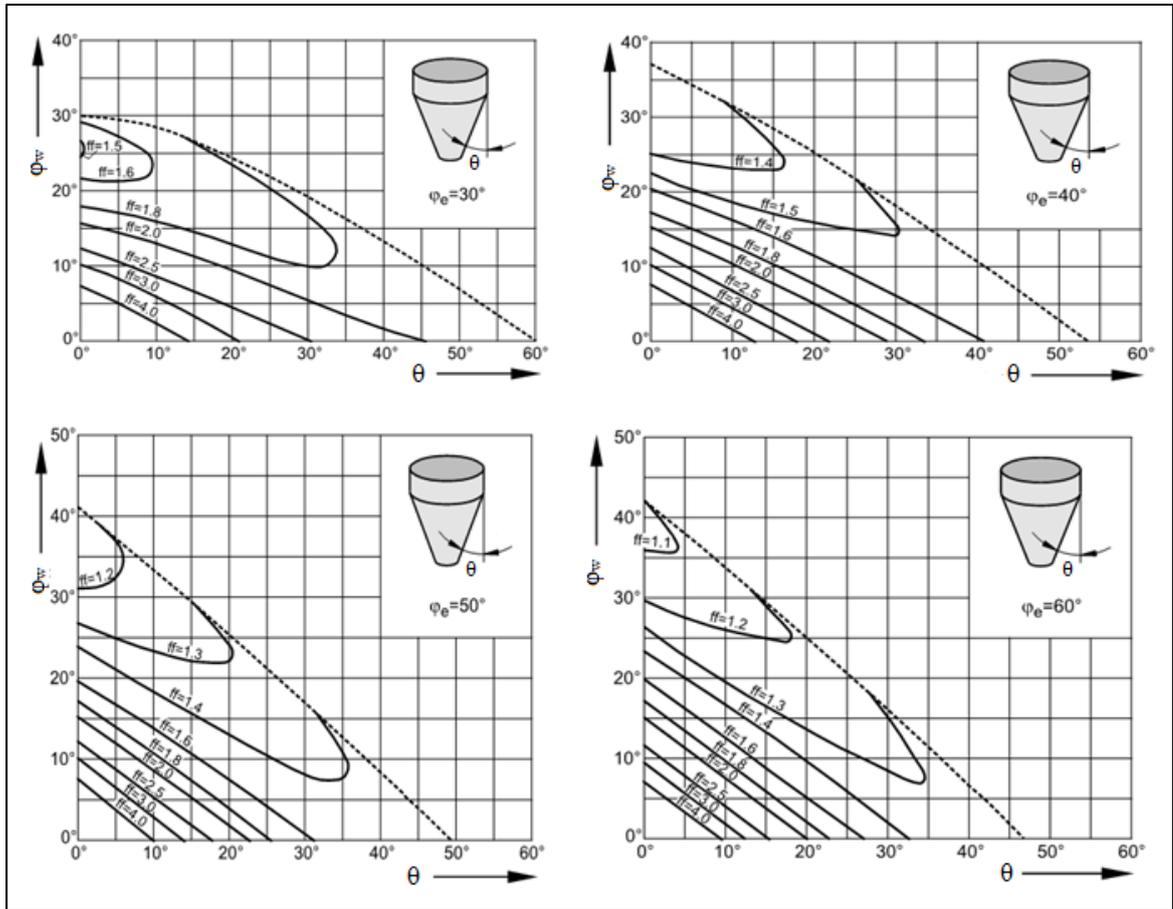


Figura 3.4 - Diagramas para determinação de fatores de fluxo para tremonhas cônicas com ângulo de atrito interno efetivo de 30° , 40° , 50° e 60° (Fonte: JENIKE, 1964 *apud* SCHULZE, 2007).

O ângulo de atrito interno efetivo (ver figura 3.5) é o parâmetro das linhas limites entre o fluxo de massa e o fluxo de funil. As linhas limites separam todos os pares de valores que conduzem ao fluxo de massa daqueles que conduzem ao fluxo de funil.

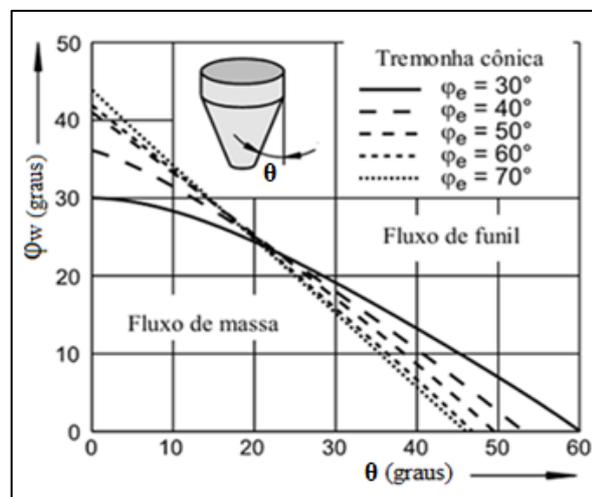


Figura 3.5 - Diagrama de fluxo de massa - tremonha cônica (Fonte: SCHULZE, 1997).

Para determinar o diâmetro de descarga, Jenike (1964) utiliza a função $H(\theta)$ que depende da forma geométrica e da inclinação da tremonha. A figura 3.6 apresenta o gráfico para determinação do valor da função $H(\theta)$ em relação ao ângulo de inclinação da tremonha, tanto para tremonhas cônicas quanto em forma de cunha (SCHULZE, 1997).

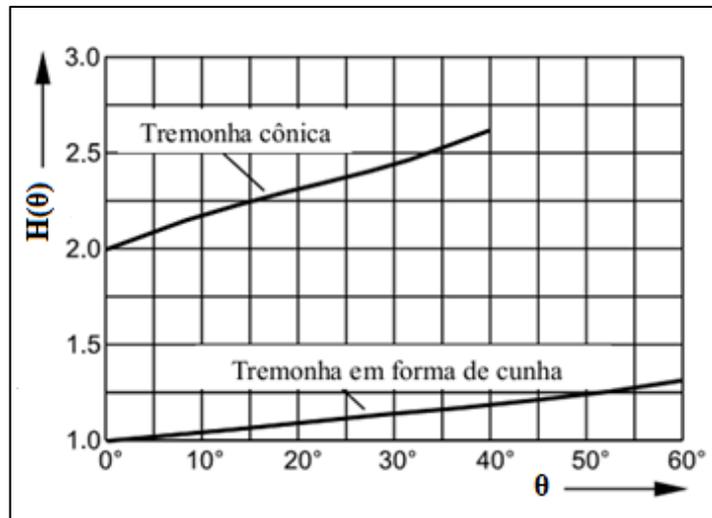


Figura 3.6 - Determinação da função $H(\theta)$ para tremonhas cônicas e em cunha. (Fonte: SCHULZE, 1997).

As curvas da função $H(\Theta)$ mostradas na Figura 3.6 podem ser aproximadas pelas equações 3.3 e 3.4 (sendo que os ângulos são dados em graus):

$$H(\Theta_c) = 2 + \frac{\Theta_c}{60} \quad (3.3)$$

$$H(\Theta_p) = 2 + \frac{\Theta_p}{180} \quad (3.4)$$

Como Θ é o domínio da função $H(\Theta)$, sendo que os dois ângulos Θ_c e Θ_p representam geometrias diferentes. O ângulo de inclinação da tremonha Θ_c tem aplicação para tremonhas de geometria cônica enquanto o ângulo de inclinação Θ_p tem aplicação para tremonha com geometria em forma de cunha (SCHULZE, 1997).

Em acordo com o gráfico da figura 3.7, o ponto ($\sigma_c = \sigma_{1a} = \sigma_{cri}$) e a função $H(\theta)$ influenciam de forma diretamente proporcional na determinação do diâmetro da boca de descarga (b) para silos de tremonhas cônicas com fluxo de massa conforme descreve a equação 3.5 (PALMA, 2005).

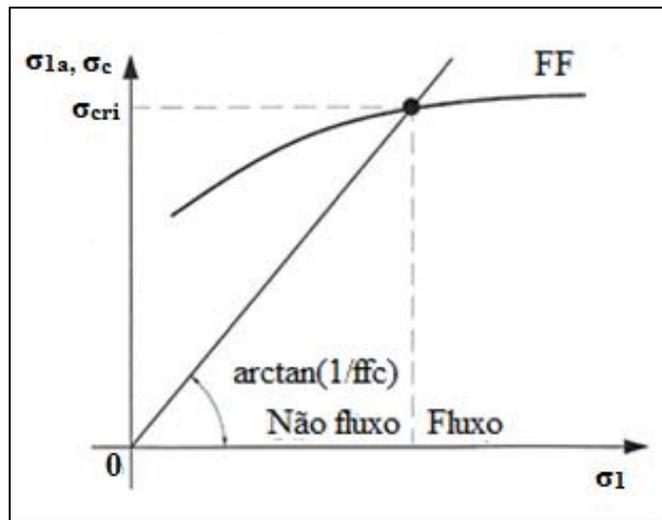


Figura 3.7 – Critério de fluxo e não fluxo (não formação ou formação de arco coesivo)
(Fonte: CALIL JR e CHEUNG, 2007).

$$b = \frac{H(\theta)\sigma_{cri}}{\gamma} \quad (3.5)$$

onde:

b - diâmetro do orifício de saída (m)

$H(\theta)$ - função do ângulo da tremonha

θ - ângulo de inclinação da tremonha com a vertical (graus)

σ_{cri} - tensão crítica (Pa)

γ - peso específico (N/m^3)

Com o intuito de evitar instabilidades que alterem o tipo de fluxo, Jenike (1964) recomenda que a dimensão mínima da moega, seja majorada em 20%. Como exemplo da aplicação da teoria proposta por Jenike, dimensionam-se dois diâmetros de descarga para tremonhas cônicas.

3.4.2 Abordagem de Enstad

A tensão cisalhante que fornece a YL é assumida como sendo uma função linear da maior tensão de consolidação. Escrevendo a função linear da equação 3.2, para a coesão, onde A e B são constantes se obtém:

$$c = A\sigma_1 + B \quad (3.6)$$

Nesta abordagem uma nova versão para esta solução é significativamente diferente, pois ao invés de analisar as tensões de consolidação satisfazendo a equação 3.1, outra condição é então introduzida de acordo com a equação 4.7 (DRESCHER *et. al* 1995).

$$\tau = \sigma \tan \varphi'_e + c' \quad (3.7)$$

Onde φ'_e (equação 3.8) é outra vez o ângulo de atrito efetivo, e c' (equação 3.9) pode ser considerado como a coesão independente da consolidação, que se mantém sempre maior que zero independentemente da magnitude de cisalhamento (DRESCHER *et. al* 1995).

$$\varphi'_e = \arcsen \frac{2 \text{sen } \varphi_i + K(1 - \text{sen } \varphi_i)}{2 - K(1 - \text{sen } \varphi_i)} \quad (3.8)$$

$$c' = L \frac{(1 + \text{sen } \varphi'_e)(1 - \text{sen } \varphi_i)}{2 \cos \varphi'_e (1 - \text{sen } \varphi_i)} \quad (3.9)$$

Sendo K (equação 3.10) e L (equação 3.11) os parâmetros relacionados as equações (3.8) e (3.9).

$$K = \frac{2A \cos \varphi_i}{1 - \text{sen } \varphi_i} \quad (3.10)$$

$$L = \frac{2B \cos \varphi_i}{1 - \text{sen } \varphi_i} \quad (3.11)$$

A abertura de saída crítica da tremonha baseada por esta abordagem resulta da condição que não existe tensão suportando o arco na parte inferior. A equação 3.12 determina o b_{\min} .

$$b_{\min} = \frac{2k(\theta, \varphi'_e, \varphi_w, c') \text{sen } \theta}{\rho_b h(\theta, \varphi'_e, \varphi_w)} \quad (3.12)$$

As funções k , h e β são obtidas desta abordagem e definidas respectivamente pelas equações (3.13), (3.14) e (3.15). A aplicabilidade das equações acima é limitada, em geral, para moegas íngremes e lisas onde o fluxo de massa ocorre (DRESCHER *et al.*, 1995).

$$k=c \left(2^{m-1} \tan \varphi_e \left[1 + \frac{\sin(\beta+\theta)}{\sin \theta} \right] - 1 \right) \quad (3.13)$$

$$h = \frac{\sin \beta \sin^m(\beta+\theta) + [2 - 2\cos(\beta+\theta)]^{m-1} (\beta+\theta)^{2-m} \sin \theta}{2 \tan \varphi_e \sin^{m+1}(\beta+\theta)} \quad (3.14)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\varphi_w + \arcsen \frac{\sin \varphi_w}{\sin \varphi_e} \right) \quad (3.15)$$

É importante mencionar que segundo Palma (2005) a resistência à ruptura por cisalhamento de um produto depende da coesão e do ângulo de atrito interno como descrito na equação 3.2, sendo que estes, por sua vez, dependem do teor de umidade e porosidade do produto.

No capítulo a seguir apresenta-se toda a metodologia do processo experimental para determinar as propriedades físicas e de fluxo do produto LV, juntamente com os instrumentos e equipamentos utilizados em laboratório.

CAPÍTULO IV

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

As propriedades de fluxo do produto LV foram determinadas experimentalmente com a utilização de instrumentos e equipamentos, disponíveis no Laboratório de Transporte Pneumático da Engenharia Mecânica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (LABEM/ITEC/UFGPA) e no Laboratório para ensaios de materiais granulados da SOLVE Engenharia. As metodologias de ensaio utilizadas para determinação das propriedades físicas e de fluxo foram baseadas nas normas ABNT (NBR 6502/95) e pela ASTM (D6128-97).

4.1 PROPRIEDADES DE FLUXO E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O aparelho de cisalhamento “Jenike Shear Tester” (Figura 4.1) devido ser relativamente fácil na operação e de baixo custo provou ser o mais versátil instrumento para teste de cisalhamento para aplicações, tornando-se então um padrão industrial (PALMA, 2005).



Figura 4.1 - Aparelho de cisalhamento direto. Fonte: (AUTOR).

Os resultados obtidos pelo aparelho de cisalhamento possibilitam traçar os círculos de tensões de Mohr de fundamental importância no processo de determinação das propriedades. A etapa inicial do teste é o pré-cisalhamento, seguindo-se pela etapa de cisalhamento. O processo de cisalhamento é representado na figura 4.2, a tensão τ_{sh} aumenta até atingir um valor máximo e depois diminui. “O valor máximo alcançado pela tensão cisalhante, junto à

tensão normal aplicada, formam o ponto de cisalhamento (σ_{sh}, τ_{sh})” e o conjunto dos pontos (σ_{sh}, τ_{sh}), forma o YL (SCHULZE, 2008).

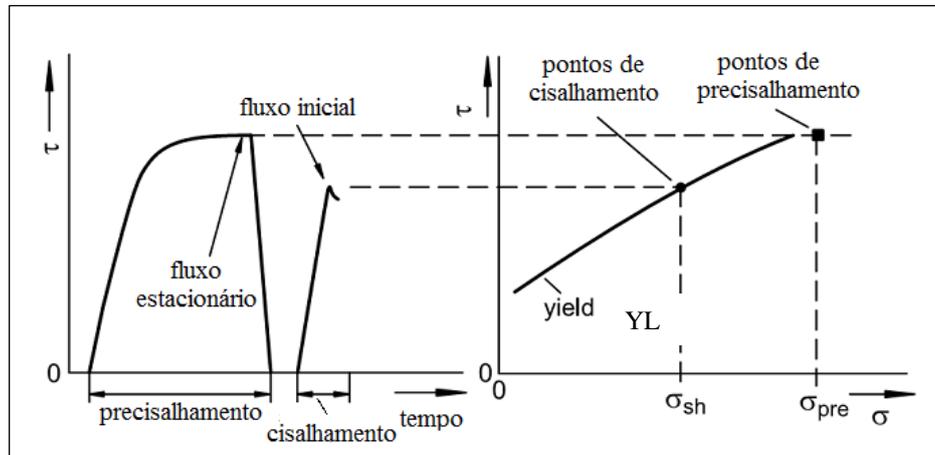


Figura 4.2 - Metodologia de ensaio proposta por Jenike (Fonte: SCHULZE, 1997).

As propriedades físicas e de fluxo normalmente consideradas são: massa específica; granulometria; ângulo de repouso; ângulo de atrito interno; efetivo ângulo de atrito interno; ângulo de atrito do produto com a parede; função fluxo do produto e fator fluxo da tremonha.

4.1.1 Determinação da massa específica aparente e ângulo de repouso

A massa específica do produto LV foi mensurada por meio de um tubo de proveta (250 ml) e uma balança digital com precisão de 0,001 g, com três repetições para cada tratamento.

Em relação ao ângulo de repouso uma forma prática para determiná-lo ocorre com a queda do produto, onde um volume se forma, conforme mostra a figura 4.3. Aplicando a equação 4.1, mede-se o ângulo de repouso que as paredes deste volume formam com o plano horizontal.

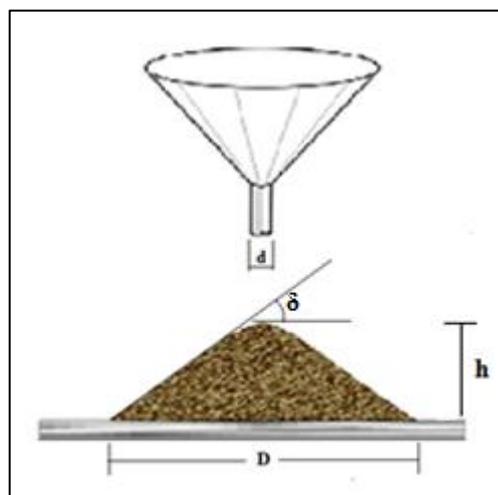


Figura 4.3 - Representação do ângulo de repouso (Fonte: BATISTA, 2009).

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{2h}{D-d} \quad (4.1)$$

Onde h é a medida da distância da base até o topo da amostra, D é o diâmetro médio da base do cone formado com a queda do produto e d o diâmetro interno de saída do funil. Duas condições diferentes de ângulos de repouso obtidos experimentalmente, com a queda por gravidade da massa de 250g de LV, são mostradas nas Figuras 4.4(a) e 4.4(b).

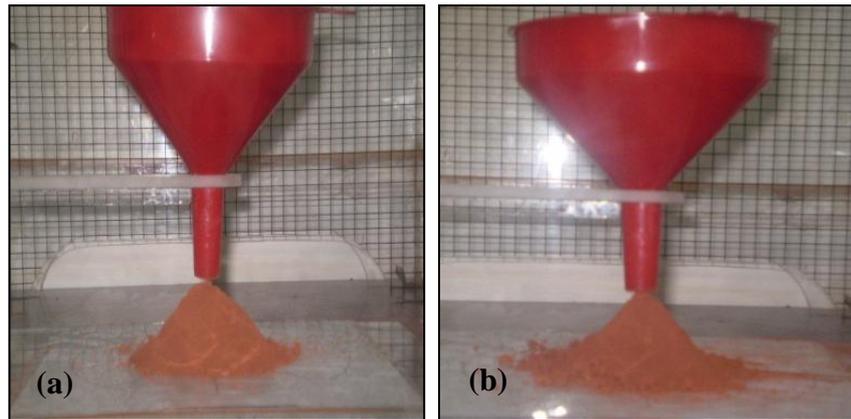


Figura 4.4 - (a) Amostra a 1,0% de umidade. (b) Amostra a 13,0% de umidade.

Para Batista (2009) a utilização do ângulo de repouso para a classificação do tipo de fluxo não é recomendada atualmente, este é apenas utilizado para o cálculo da formação do cone da cobertura superior formado pela queda do produto.

4.1.2 Determinação da umidade e granulometria

Na determinação dos teores de umidade das amostras de LV se utilizou uma balança com precisão e uma estufa com circulação forçada de ar a uma temperatura de 110 °C. Durante o período dos ensaios, coletaram-se amostras dos produtos LV para a determinação de seus teores de umidade por meio das diferenças entre as massas das amostras em base úmida com as massas das amostras colocadas em estufa, divididas pelas massas em base úmida. Sendo a análise granulométrica realizada por peneiramento de acordo com ABNT (NBR 6502/95). Nos ensaios de granulometria se utiliza limites de diâmetro para as peneiras que correspondam aos limites existentes entre os diâmetros mínimos e máximos das partículas que compõem o produto LV.

4.1.3 Ensaios em célula de cisalhamento do tipo Jenike

O ensaio de cisalhamento objetiva a determinação das tensões de consolidação e de cisalhamento, as quais permitem construir gráficos dos círculos de tensões de Mohr.

O funcionamento da bancada (ver Figura 4.1), consiste em acionar o motor de passo, que aciona as engrenagens ligadas aos fusos. A rotação dos fusos movimenta a guia, onde a célula de carga, contra a célula Jenike. O pino atuador, preso à célula de carga, toca no braço da tampa da célula Jenike, como ilustrado na figura 4.5, comprimindo a célula de carga. Quando comprimida, a célula de carga envia sinais ao indicador de pesagem. O indicador de pesagem, mostrado na figura 4.5, é o elemento responsável pela conversão dos sinais enviados pela célula de carga, permitindo a leitura dos valores da carga atuante na célula de carga. A célula Jenike constitui-se de uma célula de cisalhamento de forma cilíndrica, compreendida dos seguintes acessórios: base, anel de cisalhamento, tampa e um suporte para a colocação dos pesos equivalentes aos valores das tensões normais empregados para a aplicação do ensaio conforme mostra as Figuras 4.5 e 4.6.



Figura 4.5 - Célula carregada e consolidada.

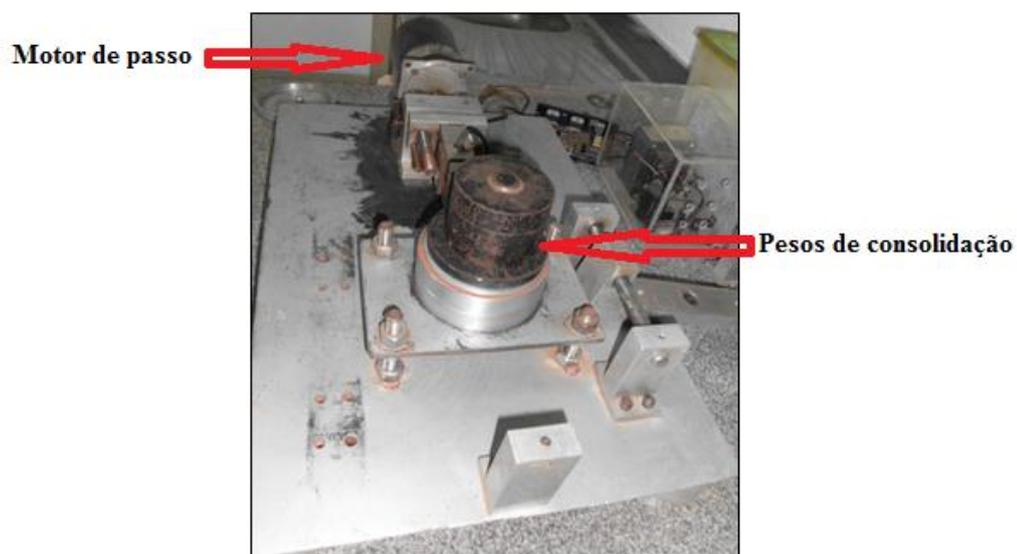


Figura 4.6 - Cisalhamento direto do produto.

4.1.3.1 Metodologia de ensaio

No ensaio de cisalhamento em uma célula para material/material a granel, a amostra é colocada no recipiente cilíndrico bipartido (ver figura 4.7a), após a célula é tampada, e submetida estaticamente a cargas iniciais.

Passo 1: Inicialmente preenche-se a célula com o material a ser testado colocando bem cuidadosamente até a camada limite do anel superior (ver Figura 4.7b).

Passo 2: Aplica-se no material uma força normal F_n por meio de cargas estáticas pré-definidas e em seguida gira-se o cabide de peso, dando entre 18 a 20 voltas (ver Figura 4.7c).

Passo 3: A carga aplicada e rotacionada na tampa da célula irá consolidar o material de modo que sua densidade se mantenha constante (ver Figura 4.7d).

Passo 4: Em seguida aplica-se uma força horizontal F_h através de um pino atuador movido por um motor de passo na haste de medição localizada na tampa da célula, levando o anel mover-se sobre a base, cisalhando o sólido no plano formado pela base e o anel, a força aplicada aumenta até atingir um valor constante, ou seja, quando o fluxo do material atinge um escoamento uniforme. A força F_h é mostrada em um indicador de pesagem em massa (kg), devendo ser transformada para unidade de força (ver Figura 4.7e).

Passo 5: Retorna o pino atuador em sentido inverso de modo a apenas perder o contato com o anel da tampa da célula. Reduzir a carga aplicada no pré-cisalhamento numa razão definida pela ASTM (1998), após avançar novamente com o pino atuador fazendo uma nova leitura no indicador de pesagem (ver Figura 4.7f). Passo 6: Para um novo ensaio se retorna ao passo de 1, fazendo todos os outros passos para o cisalhamento de uma nova amostra.

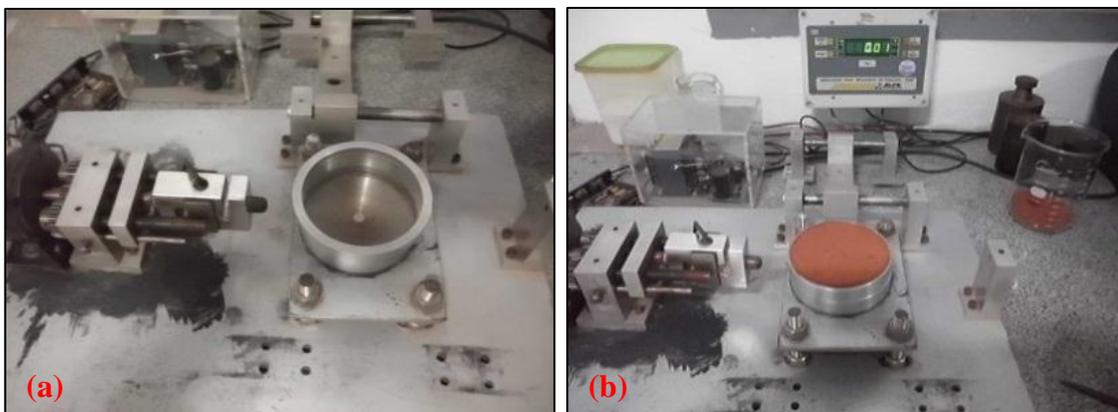


Figura 4.7 - Ensaio de cisalhamento material/material. (a) Célula Jénike; (b) Célula Jenike preenchida com LV.

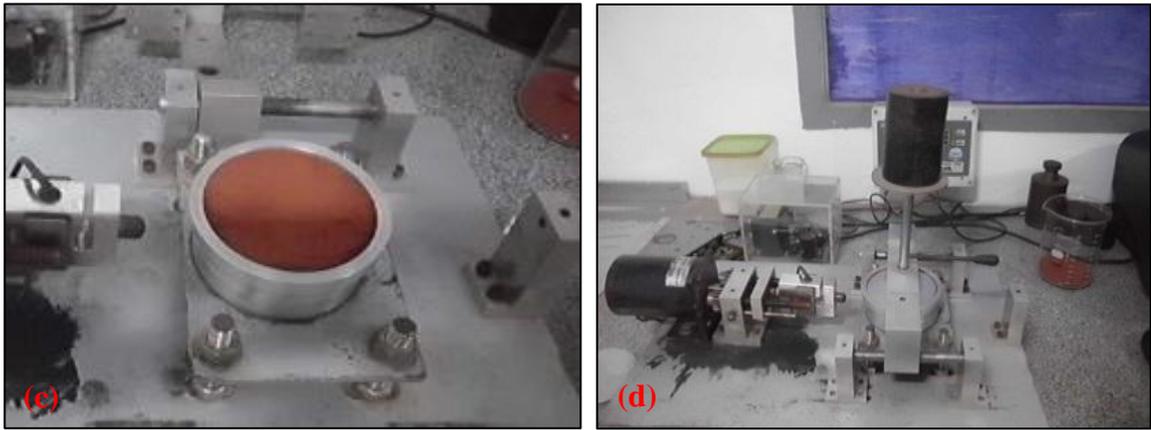


Figura 4.7 - Ensaio de cisalhamento material/material. (c) Amostra preparada para consolidação; (d) Consolidação; (d) Consolidação da amostra.

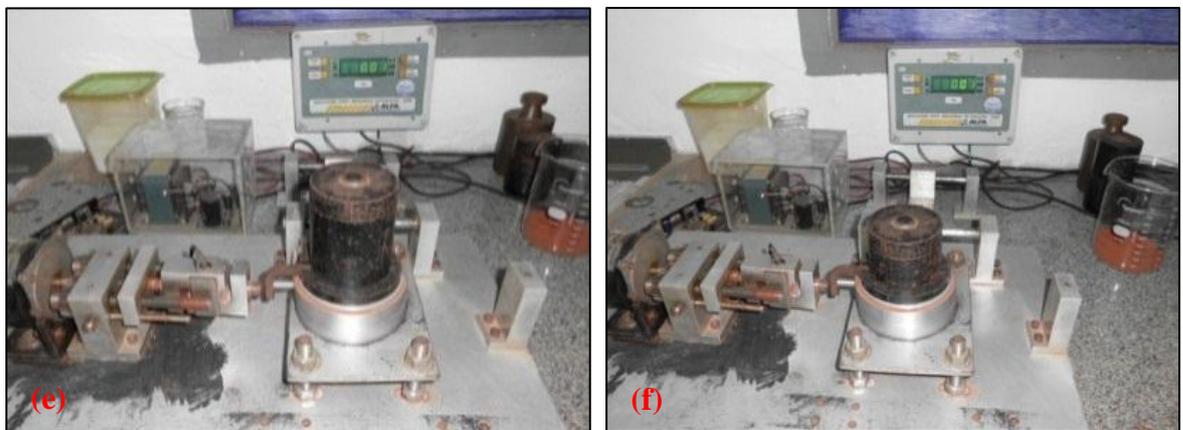


Figura 4.7 - Ensaio de cisalhamento material/material. (e) Cisalhamento da amostra; (f) Cisalhamento da amostra com carga reduzida.

Os ensaios de cisalhamento direto tanto para material/material e material/parede foram realizados em amostras da LV, com velocidade linear de 0,04 rev/s para o deslocamento do pino atuador, o qual se encontra acoplado à célula de carga (transdutor) do equipamento de teste (ver Figura 4.8).

Para medir o atrito existente entre a LV e o material da parede do silo (ensaio material/parede), se substituiu a base da célula de cisalhamento por placas retangulares que medem 150 x 100 mm de lado sendo a de Aço com 5 mm de espessura, UHMW com 10mm de espessura e Acrílico 8 mm de espessura.

A amostra sólida é submetida a uma tensão normal (σ_w), seguida de uma tensão cisalhante (τ_w). Definindo-se a quantidade de tensões que serão aplicadas, de forma que tenham valores diferentes e que sejam aplicadas de forma decrescente.

Inicialmente a tensão cisalhante aumenta atingindo, em seguida, um valor constante. Esta tensão poderá passar por um máximo (atrito estático) ou atingir diretamente o valor fixo (atrito cinético). As demonstrações desse experimento podem ser visualizadas na figura 4.8.

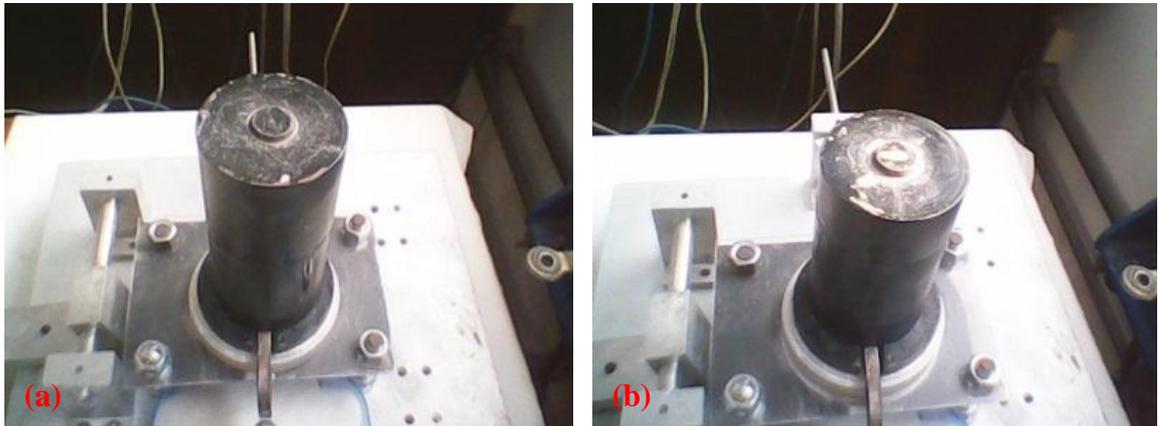


Figura 4.8 - Ensaio material/parede. (a) Começo da análise, 6,88 kPa; (b) Célula agora submetida a 5,51 kPa.

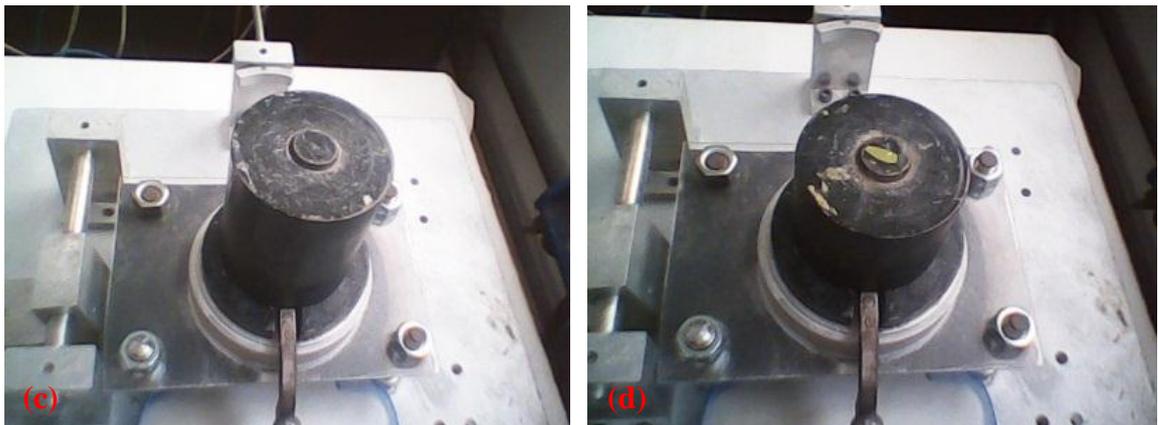


Figura 4.8 - Ensaio material/parede. (c) Metade da análise, 4,13 kPa; (d) Com 2,75 kPa.

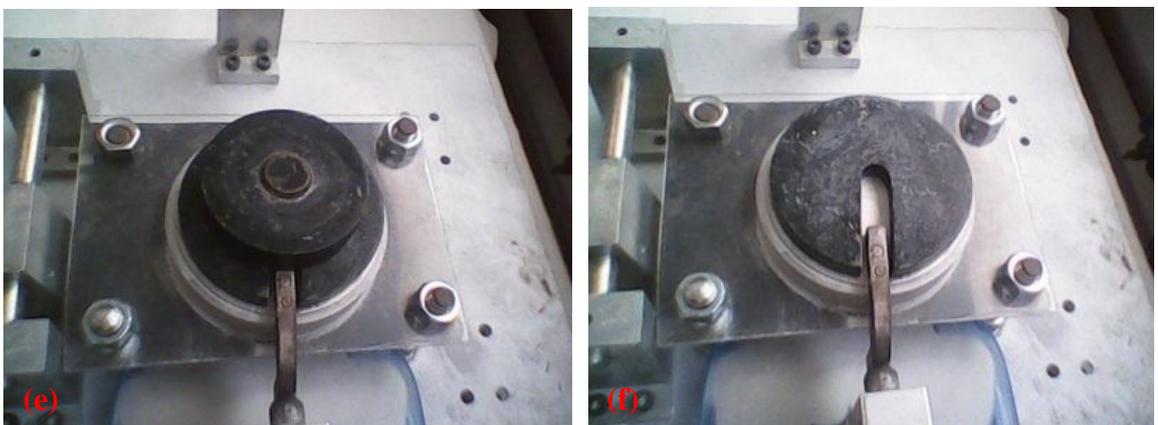


Figura 4.8 - Ensaio material/parede. (e) 1,38 kPa e (f) Com 0,69 kPa é feita a última leitura.

De acordo com as figuras acima se observa que o sólido é submetido a uma tensão normal $\sigma_w = 6,88\text{kPa}$, seguida de uma tensão cisalhante τ_w . Após a tensão τ_w atingir um valor fixo, sem interromper o avanço da força horizontal, se diminui a tensão normal σ_w para $\sigma_{w-1} = 5,52\text{kPa}$. Após σ_{w-1} tornar-se constante, a tensão normal deverá ser reduzida para $\sigma_{w-2} = 4,13\text{kPa}$ e assim por diante até $\sigma_{w-5} = 0,69\text{kPa}$. Com os resultados dos pares de tensões (ver anexo II) se constrói o gráfico (figura 2.9) para determinação o atrito entre material parede. Segundo Nascimento (2008) o objetivo do teste é medir a tensão τ necessária para que ocorra o cisalhamento do sólido, quando este é compactado por uma tensão normal σ .

No ensaio material parede a carga de consolidação sofre uma redução a medida que ocorre o cisalhamento da amostra, ou seja, o processo é contínuo encerrando com a última carga, corresponde a 0,5 kg.

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA O ESCOAMENTO NO SILO MODELO

A determinação experimental da vazão em massa para um produto sólido particulado armazenado em silo tem com objetivo verificar na prática o que ocorre com o comportamento do escoamento desse produto. Tendo em vista essa observação, se dimensionou um silo modelo de acrílico composto de cinco tremonhas diferentes, cujos valores dos parâmetros encontram-se dispostos na tabela 4.1 e representado na figura 4.10.

4.2.1 Procedimento para determinação do diâmetro de descarga - silo modelo

Na obtenção do diâmetro de descarga se faz necessário conhecer os valores de alguns parâmetros, os quais foram determinados por meio de experimentos e ensaios. Considerando o produto LV a 1% de teor de umidade e 1320 kg/m^3 de massa específica aparente.

Como o objetivo é dimensionar um silo modelo de pequenas dimensões, se utiliza o ângulo de atrito efetivo correspondente à 60° , o qual resulta dos ensaios de cisalhamento material/material do material LV, sob uma tensão de consolidação inicial 0,2 kPa.

O ângulo de inclinação da tremonha corresponde a 30° e foi obtido por meio do gráfico (figura 3.5), sendo de $19,86^\circ$ o ângulo de atrito existente entre o produto LV e acrílico, o qual foi definido no ensaio de cisalhamento material/parede.

O raio estimado de 0,04 m corresponde à distância do vértice virtual da tremonha até a saída de descarga (5) mostrado na figura 4.9, e a aceleração da gravidade têm módulo

9,81m/s². Aplicando a equação 2.11 (algoritmo I) determina-se o valor 0,259 kPa para a tensão atuante no arco e por meio do gráfico (figura 3.4) se define 1,3 para a função de fluxo da tremonha. Da relação $ff_c = \sigma_1 / \sigma_{1a}$ se obtém 0,337 kPa para maior tensão de consolidação.

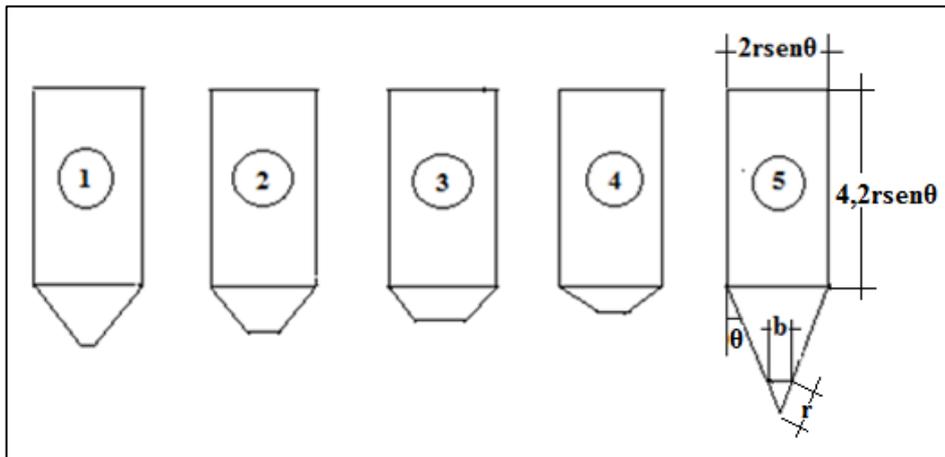
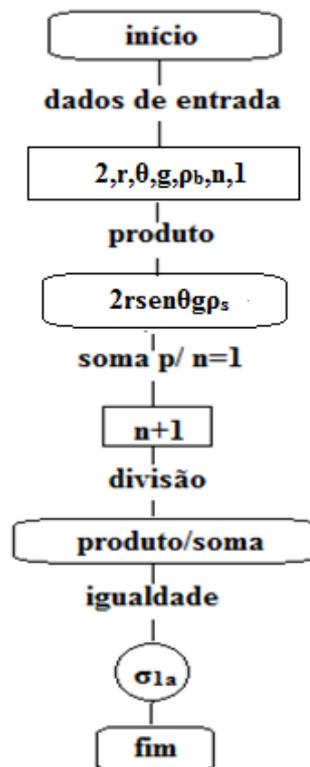


Figura 4.9 - Silos modelos.

Os parâmetros de dimensionamento dos cinco silos modelos construídos de acrílico estão dispostos na tabela 4.1.

Algoritmo (I): Cálculo da "Tensão atuante no arco".



A seguir se apresenta a figura 4.10 para obtenção do ponto de interseção entre a reta do fator de fluxo da tremonha e a curva da função de fluxo, o qual apresenta valor 0,34 kPa e corresponde a tensão crítica de consolidação.

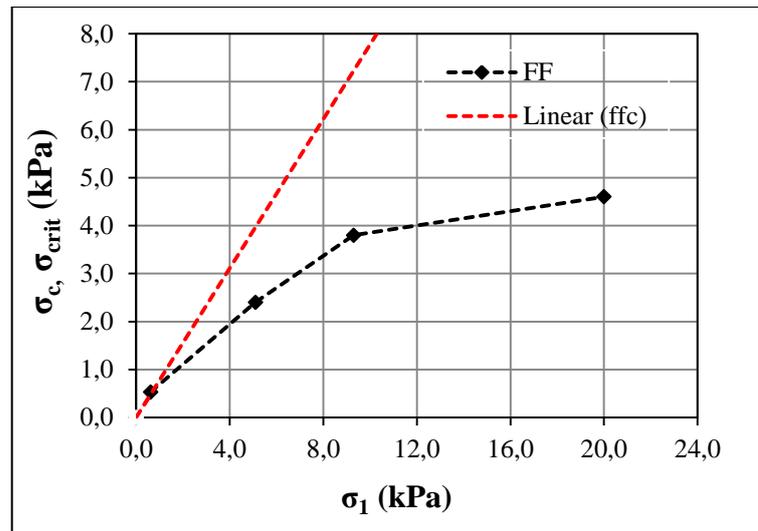
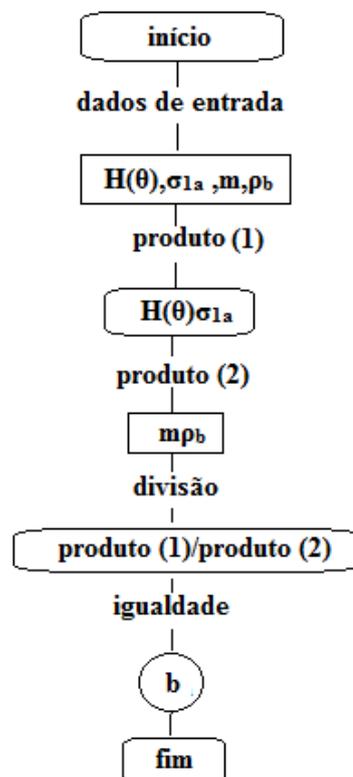


Figura 4.10 - Curva de FF e a sua interseção com a reta do $ff_c = 1,3$ fornecendo a tensão crítica de consolidação.

Por meio da figura 3.6 se determina a função $H(\theta) = 2,4$ e aplicando-se a equação 3.5 (algoritmo II) calcula-se o valor de 75,6 mm para o diâmetro de descarga do silo, valor esse majorado em 20% e de acordo com a metodologia proposta por Jenike.

Algoritmo (II) Cálculo do "Diâmetro de descarga".



Sendo a representação dos parâmetros do silo (Figura 4.11) feita pelas seguintes notações: (b) diâmetro de descarga; (D^*) diâmetro do corpo do silo; (H_C) altura do corpo do silo; (H_F) altura da tremonha; (H_T) altura do telhado do silo; (H) altura do silo; (θ) ângulo de inclinação da tremonha com a vertical e ângulo de inclinação da tremonha com a horizontal (α) é o complementar de θ .

Tabela 4.1 – Dimensões do silo protótipo de acrílico.

Tremonha	H_C/D^*	H_F (mm)	b (mm)	θ (graus)
01	2,1	65	25	45
02	2,1	57,5	40	45
03	2,1	50	55	45
04	2,1	33,5	40	60
05	2,1	99,5	40	30

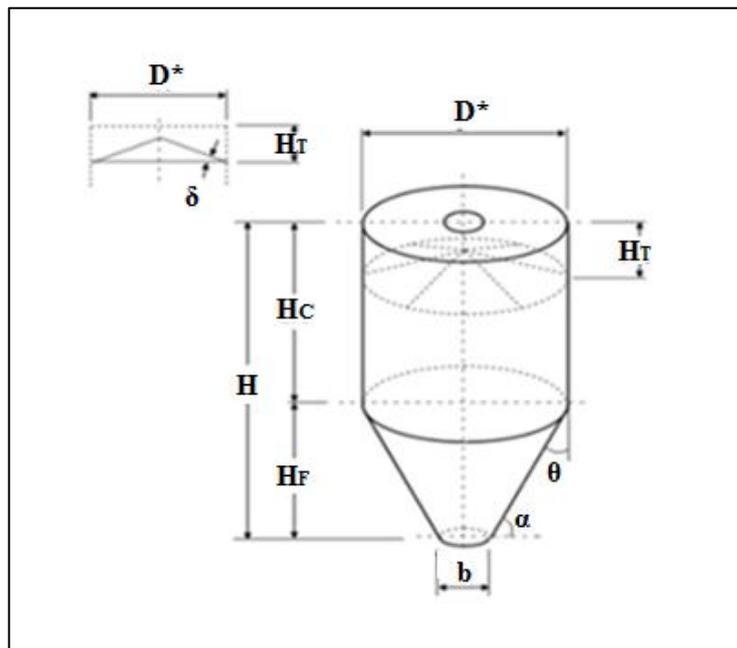


Figura 4.11 - Parâmetros de dimensionamento do silo protótipo de acrílico.

Para realização do experimento da vazão do produto faz-se necessários equipamentos complementares tais como: cronômetro para medir o tempo de duração do escoamento; coletor do material descarregado e a balança para medir a massa coletada.

Nos experimentos (ver anexo III), o dispositivo requer uma sequência ordenada de operações, para que a vazão seja medida nas condições normais de regime. O procedimento das operações é:

- 1ª) Verificar se a descarga do silo encontra-se fechada;
- 2ª) Encher o silo com o produto;
- 3ª) Abrir a descarga do silo;
- 4ª) Acionar o cronômetro juntamente com o início da descarga do produto;
- 5ª) Após o descarregamento, retira-se o recipiente coletor, pesa-se e retorna-se o produto para o recipiente, para encher novamente o silo e assim sucessivamente.

Para controle da abertura da descarga do silo, se afixa no fundo plano, uma chapa de acrílico tipo gaveta, onde a abertura é feita manualmente. Para cada medida efetuada anotam-se em tabelas os valores obtidos, com o intuito de determinar a vazão de massa pela aplicação da equação 2.12.

4.3 PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS EM UM RESULTADO

Seja R uma função de variáveis x_i pertencentes à distribuições gaussianas e com incertezas δ_{x_i} , ou seja,

$$R = R(x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_{N-1}, x_N) \quad ; \quad \bar{x}_k = \mu_{x_k} \pm \delta_{x_k} \quad (4.2)$$

a incerteza de R , denotada δ_R , é dada por Kline e McClintock, 19953 como:

$$\delta_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \delta_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \delta_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_N} \delta_{x_N}\right)^2} \quad (4.3)$$

ou

$$\delta_R/R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} (\delta_{x_1}/x_1)(x_1/R)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_N} (\delta_{x_N}/x_N)(x_N/R)\right)^2} \quad (4.4)$$

No próximo capítulo se faz análise dos resultados obtidos para as propriedades de fluxo do produto LV e o comportamento do escoamento no silo piloto de acrílico e o diâmetro mínimo de descarga para os três tipos de materiais utilizados nos ensaios material/parede.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos procedimentos experimentais realizados com atributos relacionados as propriedades de fluxo da LV. Divide-se em duas etapas; a primeira, com os resultados relacionados às propriedades, juntamente com a análise de erros para alguns resultados e a segunda, onde os resultados são analisados em relação ao dimensionamento da saída de descarga e a observação do escoamento da LV no silo modelo.

5.1 MASSA ESPECÍFICA, ÂNGULO DE REPOUSO E GRANULOMETRIA DAS AMOSTRAS DE LV

Os valores médios das massas específicas aparentes e os ângulos de repouso das amostras de LV, obtidos para os respectivos teores de umidades estão dispostos na tabela 5.1. Sendo que para as estimativas de erros que afetam a massa específica do produto LV, se aplicou a equação (5.1) proposta por Kline e Mcclintock (1953).

$$\delta_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \delta_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \delta_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_N} \delta_{x_N}\right)^2} \quad (5.1)$$

$$\delta\rho = \frac{\partial\rho}{\partial m} \delta m + \frac{\partial\rho}{\partial V} \delta V \quad (5.2)$$

$$\delta\rho = \left(\frac{1}{V}\right) \delta m + \left(\frac{m}{V^2}\right) \delta V \quad (5.3)$$

Tabela 5.1 - Densidades aparentes médias e ângulos de repouso.

w (%)	ρ_m (g/cm ³)	δ
1,0	1,321 ± 0,017	44° ± 0,004
7,0	1,342 ± 0,016	43° ± 0,004
10,0	1,347 ± 0,016	43° ± 0,004
13,0	1,353 ± 0,016	42° ± 0,004

Realizando o experimento a uma temperatura de 25°C e pressão de 1,0 atm, determina-se o resultado da massa específica, juntamente com os erros de suas medidas, os quais são provenientes das incertezas (δm e δV). O erro obtido para massa específica aparente da LV a 13% de umidade corresponde aproximadamente a $\delta\rho = \pm 0,0166316$, ou seja, $\delta\rho' = \pm 1,66\%$.

Levando-se em consideração os seguintes valores dos parâmetros: $m = 92,9\text{g}$ e $V = 70\text{ml}$; $\delta m = \pm 0,5\text{g}$; $\delta x = \pm 0,5\text{ml}$. Para se determinar a estimativa do erro leva-se em conta a metade da menor unidade da escala de leitura do equipamento. De acordo com a tabela 5.1 observa-se que a medida que se eleva o teor de umidade, ocorre um suave aumento linear da massa específica aparente, fato que se deve a presença de água nos vazios entre os grãos.

A variação sofrida pelo ângulo de repouso estático da LV se encontra num intervalo que de acordo com a tabela 2.5 do capítulo 2, a define como um produto de escoamento difícil e à medida que se eleva o teor de umidade da LV. É importante mencionar que o ângulo de repouso corresponde ao ângulo de atrito interno, para o caso de tensões de confinamento praticamente nulas, ou ainda, ao ângulo de atrito interno do produto depositado num estado livre de confinamento (DALBELLO *et al.*, 1994).

De acordo com a figura 5.1 podemos observar a variação do ângulo de repouso necessária para as estimativas dos erros que afetam os resultados experimentais. Por meio da substituição das equações 5.4, 5.5 e 6.6 na equação (5.1) se obtém a equação 5.7, a qual define o erro.

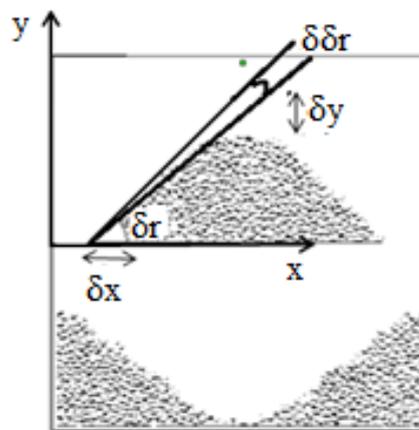


Figura 5.1 - Dimensões que geram incertezas nas medições.

$$\operatorname{tg} \delta_r = \frac{y}{x} \Leftrightarrow \delta_r(x, y) = \operatorname{arctg} \left(\frac{y}{x} \right) \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial \delta_r}{\partial x} = -\frac{y}{x^2} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{y}{x} \right)^2} = -\frac{y}{x^2 + y^2} \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial \delta_r}{\partial y} = \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{y}{x}\right)^2} = \frac{x}{x^2 + y^2} \quad (5.6)$$

Assim,

$$\delta \delta_r = \sqrt{\left(\frac{-y}{x^2 + y^2}\right)^2 \delta x^2 + \left(\frac{x}{x^2 + y^2}\right)^2 \delta y^2} \quad (5.7)$$

Nas mesmas condições de temperatura e pressão, determina-se o resultado do ângulo de repouso, juntamente com o erro de sua medida, os quais são provenientes das incertezas (δx e δy). O erro obtido para o ângulo de repouso da LV a 13% de umidade corresponde aproximadamente a $\delta \delta_r = \pm 0,004$, ou seja, $\delta \delta_r' = \pm 0,48\%$. Levando-se em consideração os seguintes valores dos parâmetros: $x = 121,302\text{cm}$ e $y = 109,221\text{cm}$; $\delta x = \pm 0,5\text{cm}$; $\delta y = \pm 0,5\text{cm}$. Sendo importante mencionar que as medidas x e y foram realizadas com uma régua graduada em centímetros. De acordo com a tabela 5.1 verifica-se que a medida que se eleva o teor de umidade, ocorre uma suave diminuição linear do ângulo de repouso da LV, fato que se deve ao enfraquecimento de sua coesão.

Para a classificação do tamanho das partículas constituintes da LV foi utilizada a escala granulométrica da ABNT (NBR 6502/95). A análise granulométrica foi realizada por peneiramento. A tabela 5.2 apresenta os resultados médios dos ensaios granulométricos de três amostras do produto LV com 1,0% de teor de umidade, realizados no laboratório de transporte pneumático do PPGEM/UFPA.

Tabela 5.2 - Resultado médio dos ensaios granulométricos para LV a 1,0% de umidade.

Nº Peneiras	Diâmetro (mm)	ASTM	Medida (%) Acumulada
1	4,75 mm	4	2,77
2	2,0 mm	10	22,71
3	1,18 mm	16	31,89
4	0,6 mm	30	48,76
5	0,3 mm	50	66,80
6	0,15 mm	100	86,11
7	0,075 mm	200	98,90
Fundo	-	-	100,00%

Os ensaios de granulometria dos produtos armazenados são importantes para a determinação do tipo de fluxo que irá ocorrer no silo, pois, a dimensão das partículas sólidas influencia diretamente na formação ou não de obstruções durante o escoamento do produto no silo (NASCIMENTO, 2008).

A figura 5.2 mostra as curvas granulométricas médias de massa acumulada e massa passante, obtidas para o produto LV.

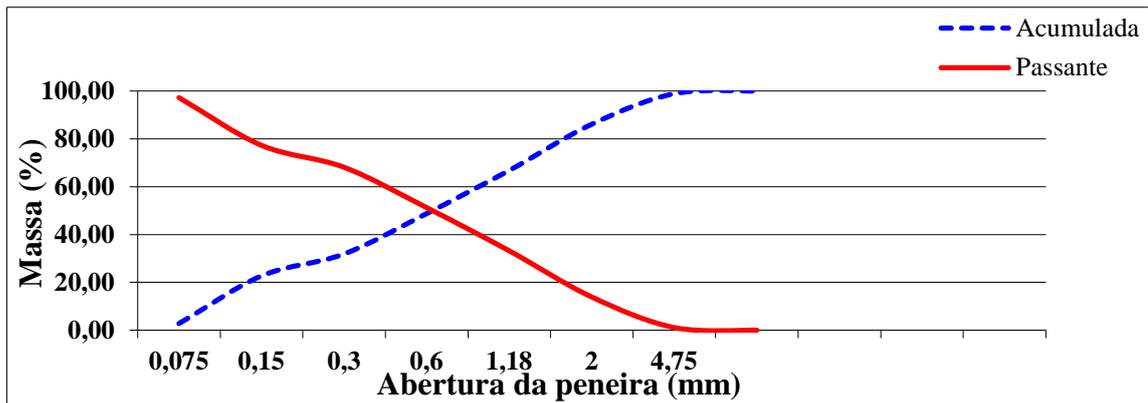


Figura 5.2 - Distribuição granulométrica (relação entre a porcentagem de massa acumulada e massa passante).

A partir dos valores dos diâmetros das partículas de LV determinados pôde-se definir o diâmetro médio pela equação 2.5, sendo que o menor valor encontrado foi de 0,075 mm e o maior valor de 4,75 mm. Pela análise granulométrica do produto LV, se pode concluir que em sua maioria constitui-se de partículas finas e de acordo com a classificação proposta por Calil (1984), apresentada na tabela 2.2 do capítulo 2 deste trabalho, a LV se caracteriza como um produto coesivo fino, com o diâmetro médio igual a 0,149 mm.

A seguir são apresentados as tabelas e os gráficos dos resultados experimentais obtidos por meio dos ensaios de cisalhamento direto.

5.2 ENSAIOS DE CISALHAMENTO MATERIAL/MATERIAL COM A CÉLULA JENIKE

Os ensaios de cisalhamento para a determinação das propriedades de fluxo do produto lama vermelha disposto nos teores de umidade 1,0%, 7,0%, 10,0% e 13,0% seguiram a norma americana ASTM (D6128-97).

Com os valores de força de pré-cisalhamento e cisalhamento para quatro níveis de consolidação, foi possível construir as curvas YLs. As Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 mostram as YLs, por meio dos círculos de tensões de Mohr.

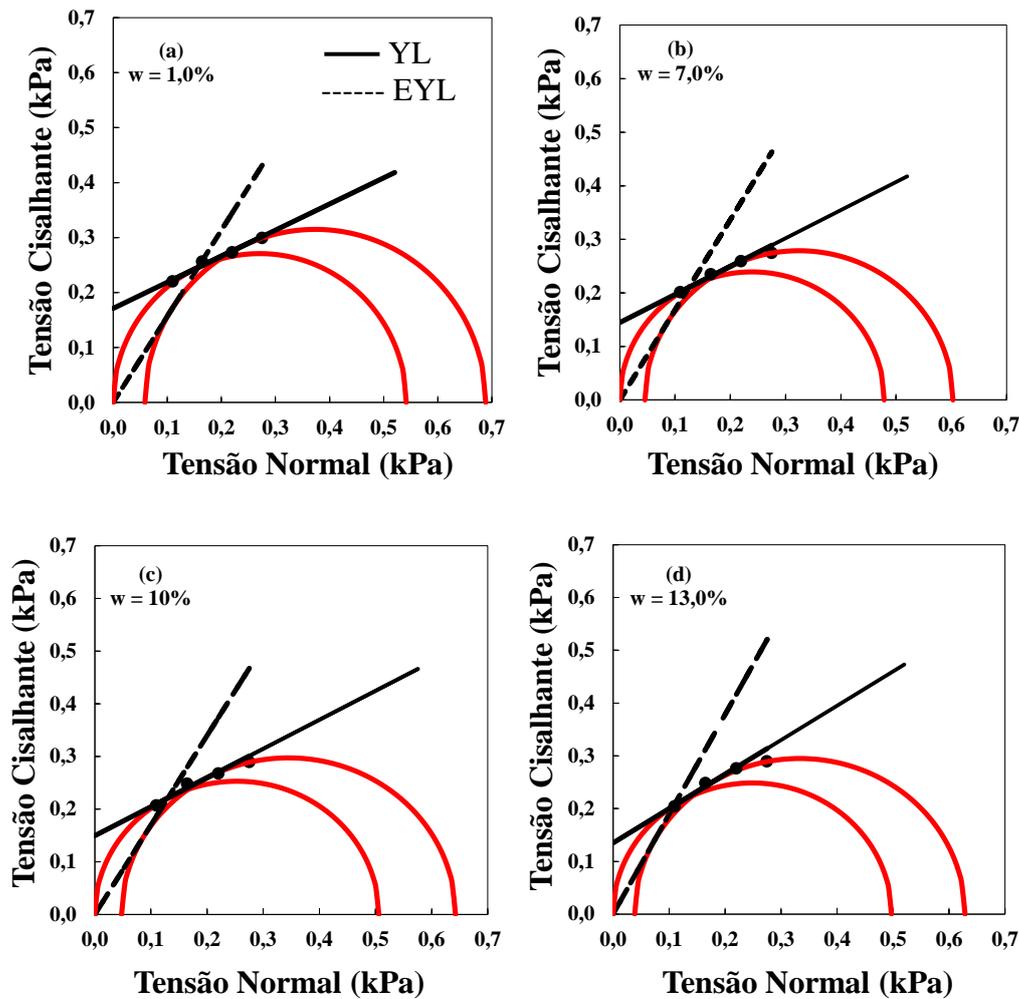


Figura 5.3 - Círculos de tensões de Mohr ($\sigma_{pré} = 0,2$ kPa).

As tabelas 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam os resultados dos parâmetros: ângulo de atrito interno, ângulo de atrito interno efetivo, tensão de coesão, tensão não confinada, tensão de consolidação maior e índice de escoabilidade para os quatro diferentes teores de umidade.

Tabela 5.3 – Resultados dos parâmetros para mostras consolidadas com $\sigma_{pré} = 0,2$ kPa.

Parâmetros	Teores de umidade das amostras (%)			
	1,0%	7,0%	10,0%	13,0%
φ_i	25,4°	27,7°	28,8°	33,0°
φ_e	58,5°	59,1°	59,9°	62,10°
c	0,16 kPa	0,13 kPa	0,12 kPa	0,10 kPa
σ_c	0,53 kPa	0,52 kPa	0,51 kPa	0,50 kPa
σ_1	0,68 kPa	0,61 kPa	0,64 kPa	0,62 kPa
ff	1,3	1,3	1,3	1,3

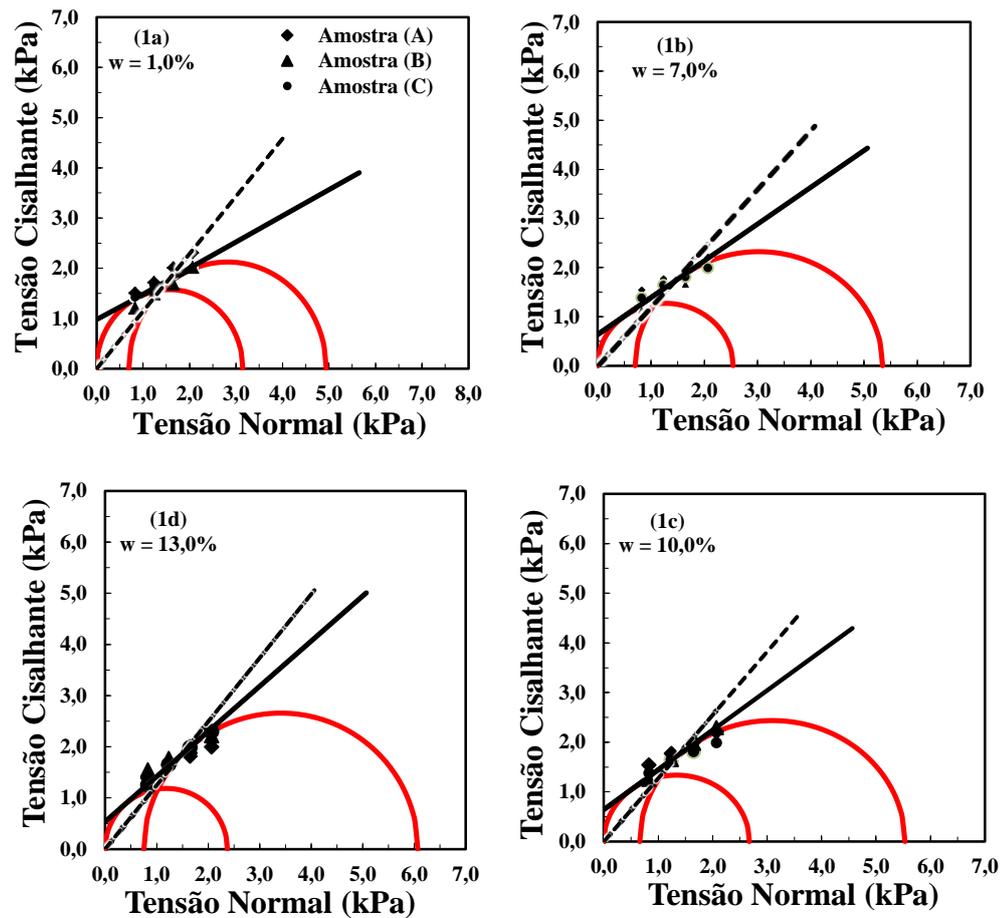


Figura 5.4 - Círculos de tensões de Mohr ($\sigma_{pré} = 2,1$ kPa).

Tabela 5.4 - Resultados dos parâmetros para mostras consolidadas com $\sigma_{pré} = 2,1$ kPa

Parâmetros	Teores de umidade das amostras (%)			
	1,0%	7,0%	10,0%	13,0%
φ_i	30,0°	36,9°	38,7°	41,5°
φ_e	44,0°	50,2°	51,9°	52,2°
c	1,0 kPa	0,7 kPa	0,6 kPa	0,5 kPa
σ_c	2,4 kPa	2,6 kPa	2,7 kPa	2,5 kPa
σ_1	5,1 kPa	5,4 kPa	5,5 kPa	6,0 kPa
ff	2,1	2,0	2,0	2,4

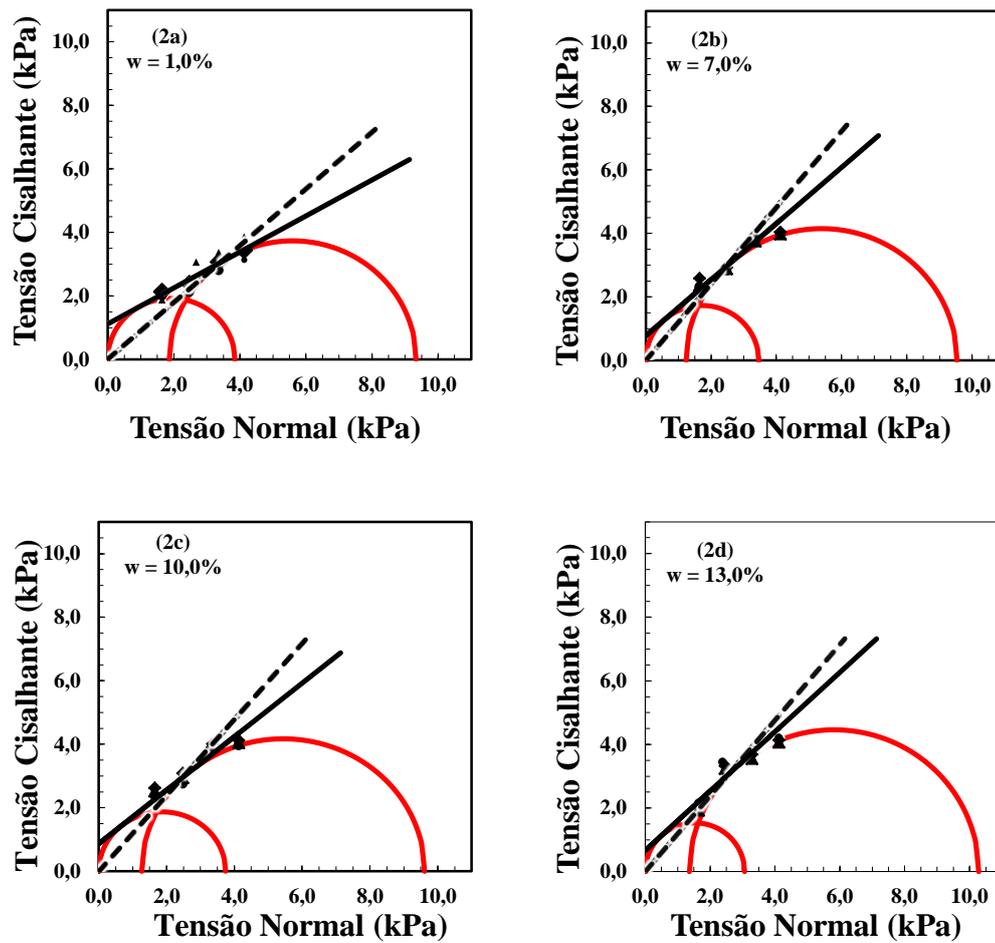


Figura 5.5 - Círculos de tensões de Mohr ($\sigma_{pré} = 4,1$ kPa).

Tabela 5.5 - Resultados dos parâmetros para mostras consolidadas com $\sigma_{pré} = 4,1$ kPa.

Parâmetros	Teores de umidade das amostras (%)			
	1,0%	7,0%	10,0%	13,0%
φ_i	30,5°	38,1°	40,1°	43,0°
φ_e	41,9°	46,4°	50,1°	50,5°
c	1,1 kPa	0,9 kPa	0,8 kPa	0,7 kPa
σ_c	3,8 kPa	3,5 kPa	3,6 kPa	3,2 kPa
σ_1	9,3 kPa	9,5 kPa	9,8 kPa	10,3 kPa
ff	2,4	2,8	2,8	3,2

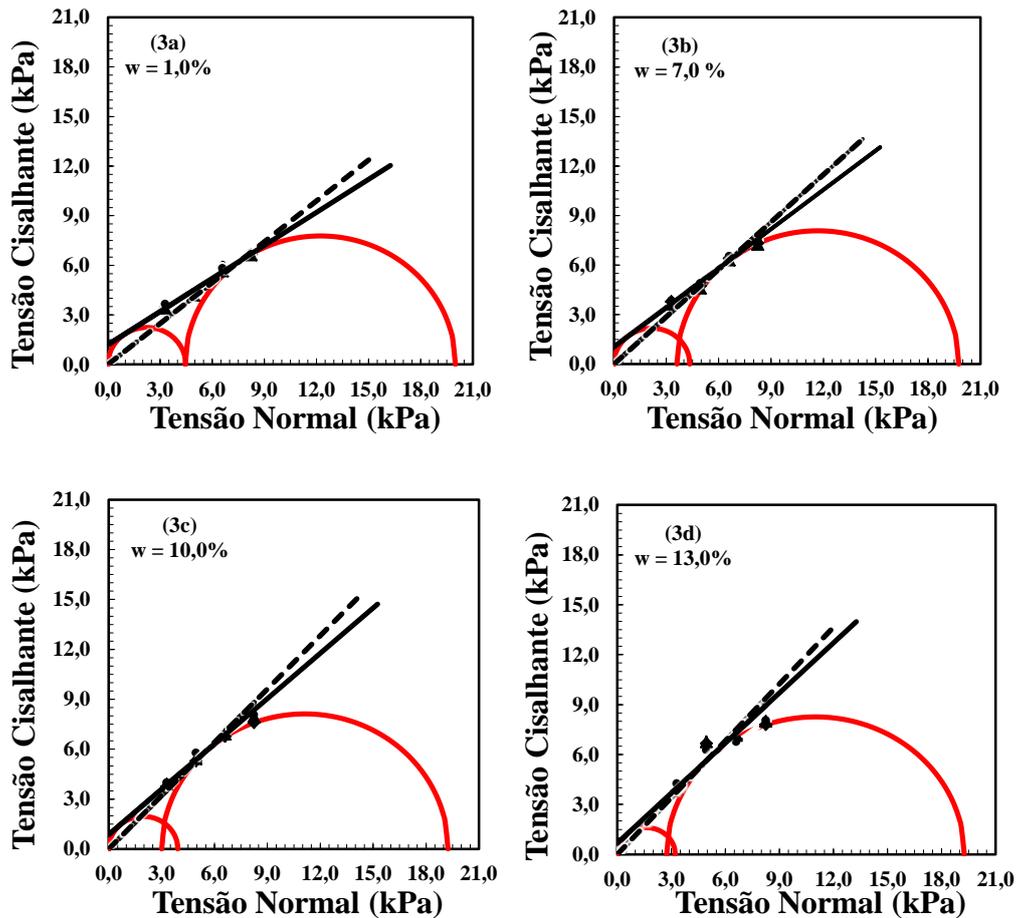


Figura 5.6 - Círculos de tensões de Mohr ($\sigma_{pré} = 8,3$ kPa).

Tabela 5.6 - Resultados dos parâmetros para mostras consolidadas com $\sigma_{pré} = 8,3$ kPa.

Parâmetros	Teores de umidade das amostras (%)			
	1,0%	7,0%	10,0%	13,0%
φ_i	33,7°	38,4°	42,2°	45,1°
φ_e	34,0°	41,7°	46,9°	48,7°
c	1,2 kPa	1,1 kPa	0,9 kPa	0,8 kPa
σ_c	4,6 kPa	4,3 kPa	4,0 kPa	3,8 kPa
σ_1	19,6 kPa	19,7 kPa	19,0 kPa	19,9 kPa
FF	4,5	4,5	4,9	5,6

O ângulo de atrito interno representa uma resistência à ruptura de uma amostra quando lhe é oferecida uma tensão de cisalhamento, cujo comportamento é de forma diretamente proporcional, quanto maior o ângulo de atrito, maior será a dificuldade de ruptura do material e conseqüentemente, maior será a tensão cisalhante atuante na amostra.

As figuras, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 mostram o comportamento dos resultados obtidos para o ângulo de atrito interno e ângulo de atrito interno efetivo das amostras do produto LV.

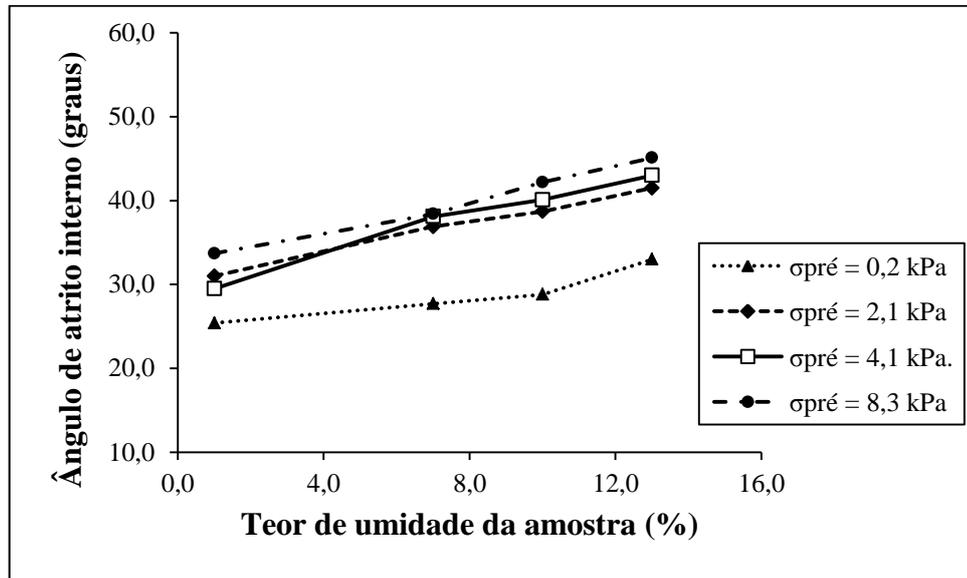


Figura 5.7 - Comportamento do ângulo de atrito interno em função do teor de umidade.

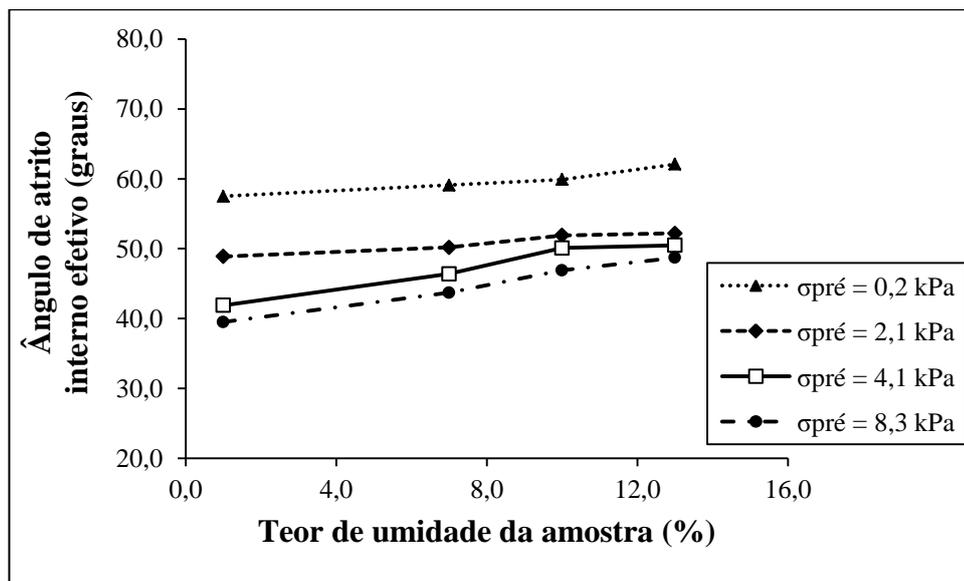


Figura 5.8 - Comportamento do ângulo de atrito interno efetivo em função do teor de umidade.

Analisando as Figuras 5.7 e 5.8, se observa que com o aumento do teor de umidade das amostras de LV o ângulo de atrito interno aumenta, enquanto o ângulo de atrito interno efetivo aumenta de forma mais suave, Isso se deve a existência das forças coesivas diminuir com a elevação da umidade.

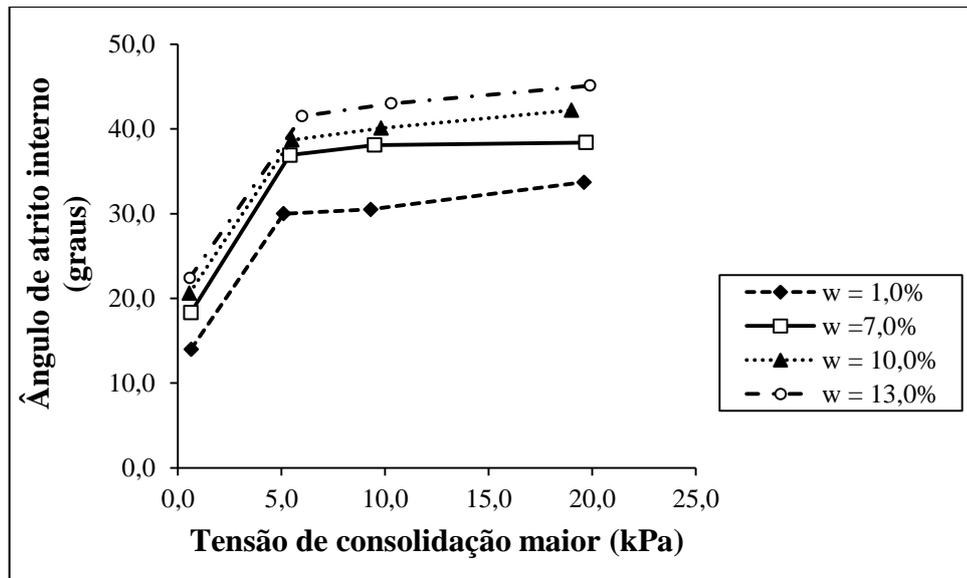


Figura 5.9 - Comportamento do ângulo de atrito interno em função da tensão de consolidação maior.

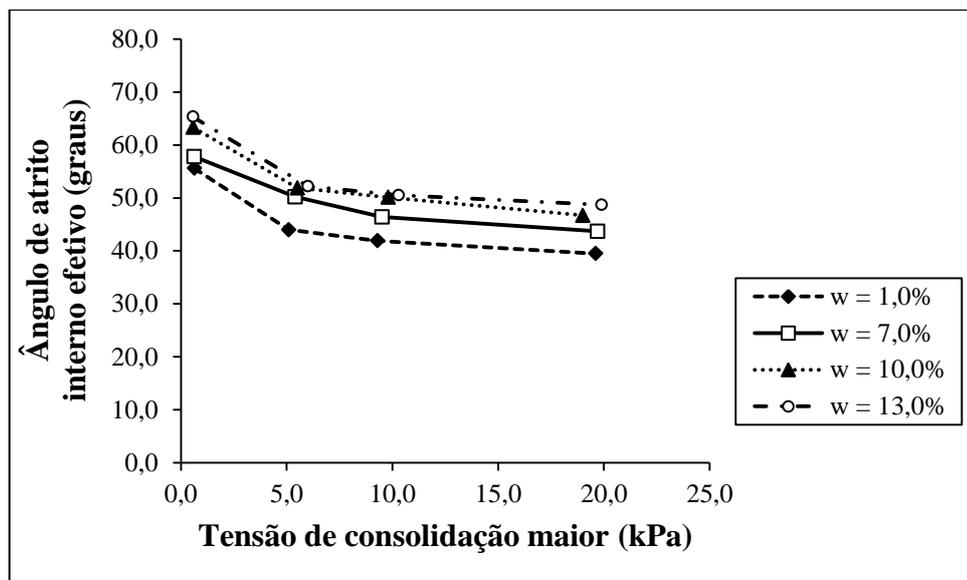


Figura 5.10 - Comportamento do ângulo de atrito interno efetivo em função da tensão de consolidação maior.

Nas figuras 5.9 e 5.10, se evidencia que os ângulos de atrito interno tendem a aumentar com a elevação da maior tensão de consolidação, porém esse comportamento se modifica de forma inversa para o ângulo de atrito interno efetivo.

As figuras, 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam o comportamento dos resultados obtidos para as tensões de coesão, não confinadas e os índices de escoabilidades das amostras em função dos teores de umidade das amostras.

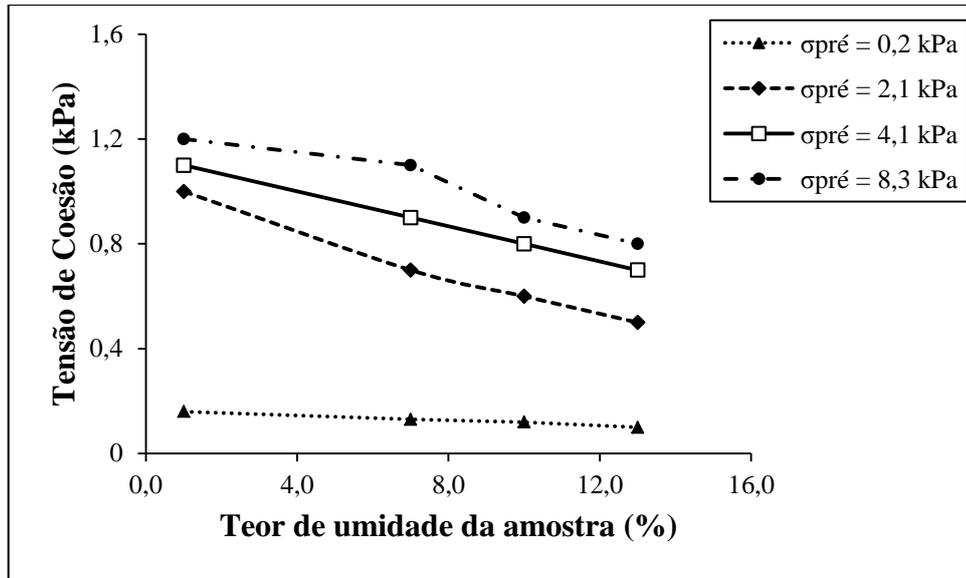


Figura 5.11 - Comportamento da coesão em função do teor de umidade.

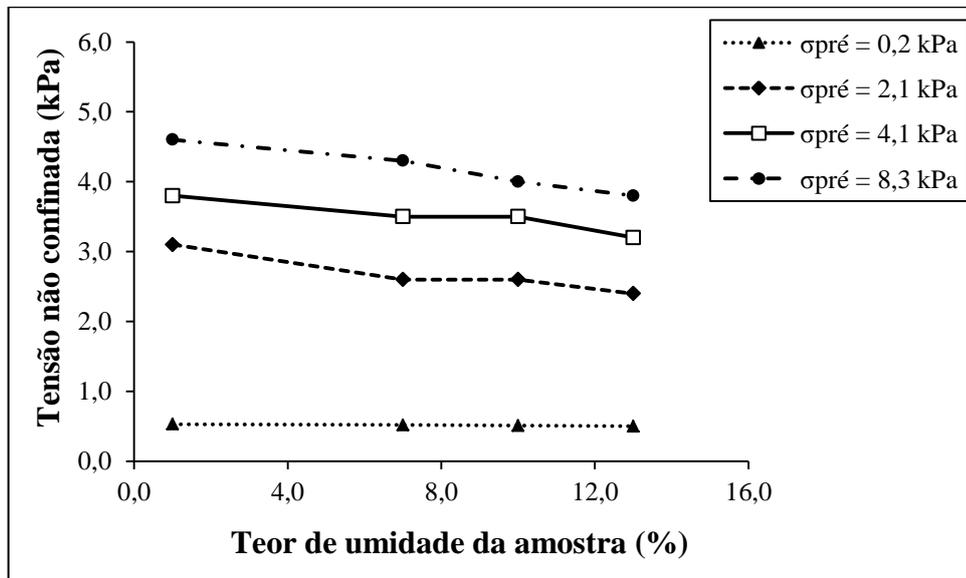


Figura 5.12 - Comportamento da tensão não confinada em função do teor de umidade.

Em relação à presença de água nos interstícios das amostras de LV, se observa que a coesão sofre uma diminuição considerável conforme mostra o gráfico da figura 5.11. Entretanto à medida que diminui o índice de vazios com a consolidação das amostras, a coesão se eleva. Sendo que a tensão não confinada aumenta com a elevação da consolidação das amostras, porém tende a diminuir com o aumento da umidade conforme mostra a figura 5.12. Fato que mostra o comportamento da LV, em relação a faixa de teores de umidade analisados, com características aparentes de um solo com teor argiloso (SILVA e CARVALHO, 2007).

É importante mencionar que quando se modifica os teores de umidade das amostras de LV submetidas a tensões de consolidação bem pequenas percebe-se pouca variação no índice de escoabilidade devido à coesão se manter praticamente inalterada, como mostra a figura 5.13. Entretanto quanto se aumenta a tensão de consolidação das amostras, maior é índice de escoabilidade e em relação à elevação do teor de umidade também se observa uma elevação do índice de escoabilidade devido à diminuição da tensão de coesão.

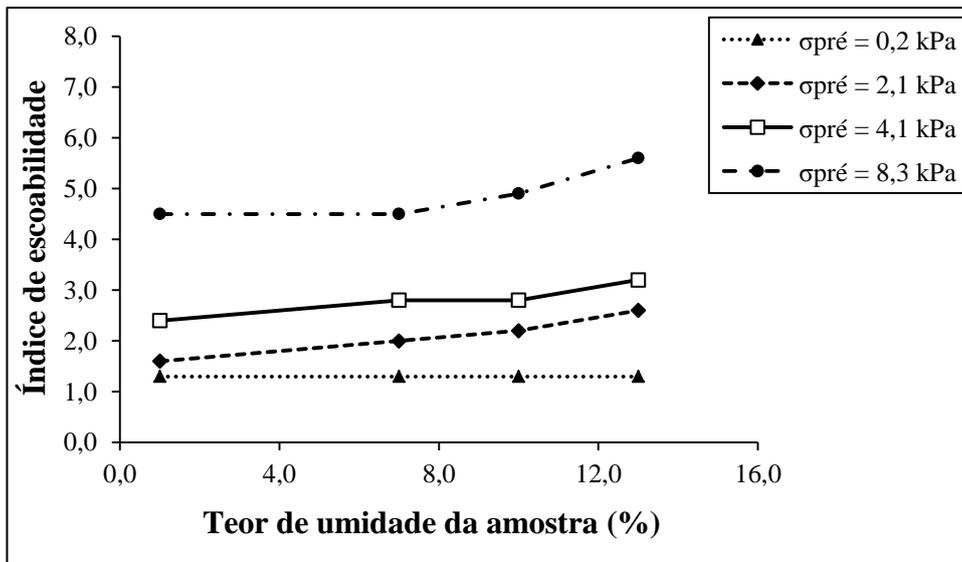


Figura 5.13 - Comportamento do índice de escoabilidade em função do teor de umidade.

Por meio da figura 5.14, a qual representa a função de fluxo do produto LV verifica-se que este produto é coesivo, tendendo a ser pouco coesivo a medida que se elevam as tensões de consolidação e os teores de umidade das amostras.

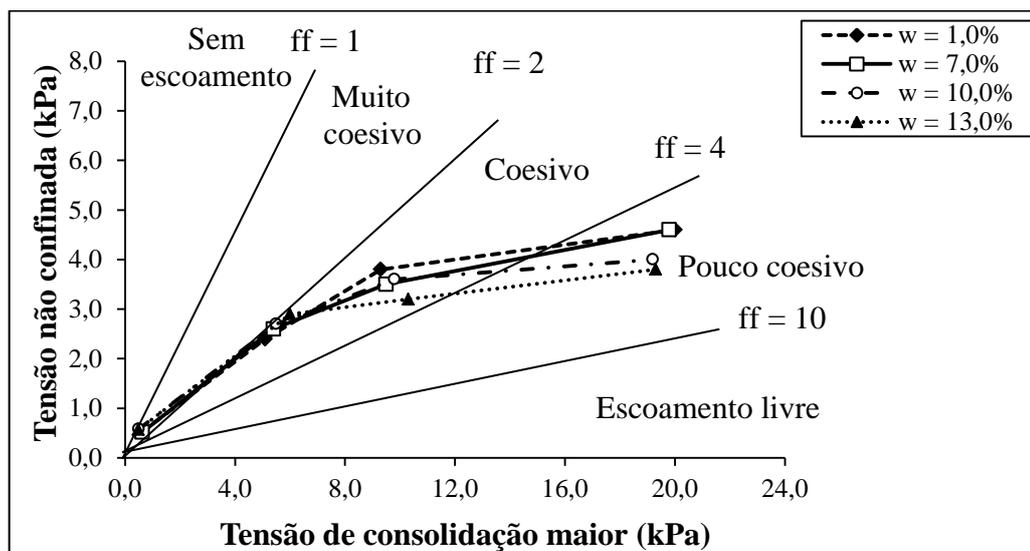


Figura 5.14 - Funções de fluxo da LV.

Para Silva e Carvalho (2007) a maior densidade do solo promove a proximidade entre suas partículas, favorecendo o desenvolvimento da coesão. Porém as forças eletrostáticas entre as partículas tendem a aumentar com a diminuição do teor de umidade. Para avaliar o comportamento mecânico de solos não-coesos e coesos, por meio de determinações da coesão, dificuldade ao cisalhamento e ângulo de atrito interno do solo, se observou que a coesão e a dificuldade ao cisalhamento do solo aumentam com a redução do teor de água.

A figura 5.15 mostra que a tensão de cisalhamento do produto LV aumentou com a tensão normal e se eleva com o aumento da umidade fato este que justifica o aumento do ângulo de atrito interno.

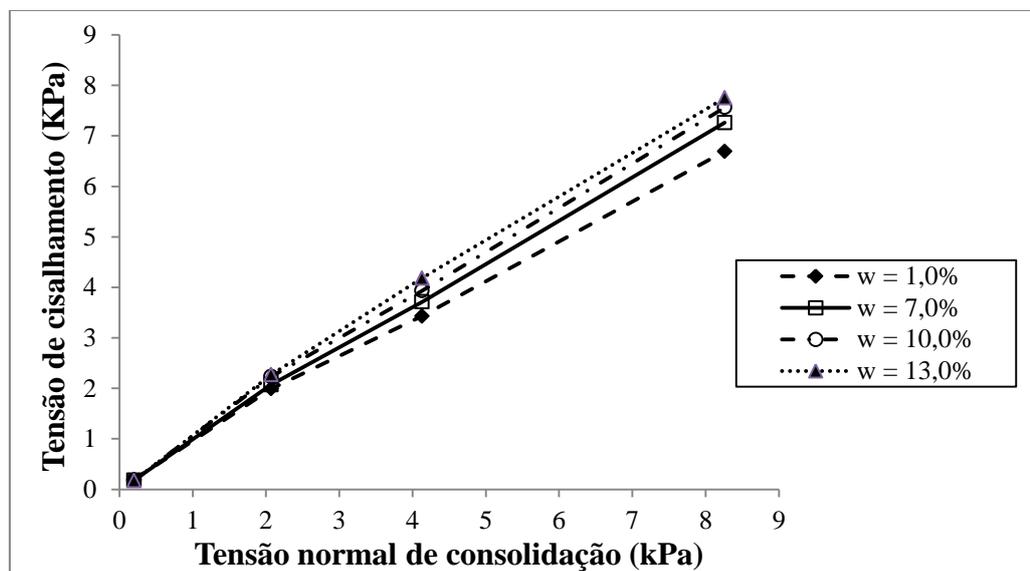


Figura 5.15 - Relação linear entre a tensão normal de consolidação e tensão cisalhante da LV para quatro teores e umidade.

Assim, se observa que quanto maior a tensão normal de consolidação, maior o contato entre as partículas e, conseqüentemente, o atrito interno na LV, sendo que quando a tensão normal tende a zero, a expressão $\sigma_t \phi_i$ tende à nulidade, e a resistência ao cisalhamento do solo será dependente apenas do intercepto de coesão.

No trabalho realizado por Silva *et al.*, (2004) a tensão de cisalhamento aumentou com a tensão normal de consolidação e diminuiu com o aumento da umidade em todos os tratamentos (Figura 5.16), nos quais, com exceção da umidade de $0,27 \text{ kg.kg}^{-1}$ ($w = 27\%$). Todavia, estes resultados concordam com os encontrados por Kézdi (1979), Ayers (1987) e Chancellor (1971) e são corroborados por Yao & Zeng (1988) e Zhang *et al.* (1986) (Silva *et al.*, 2004).

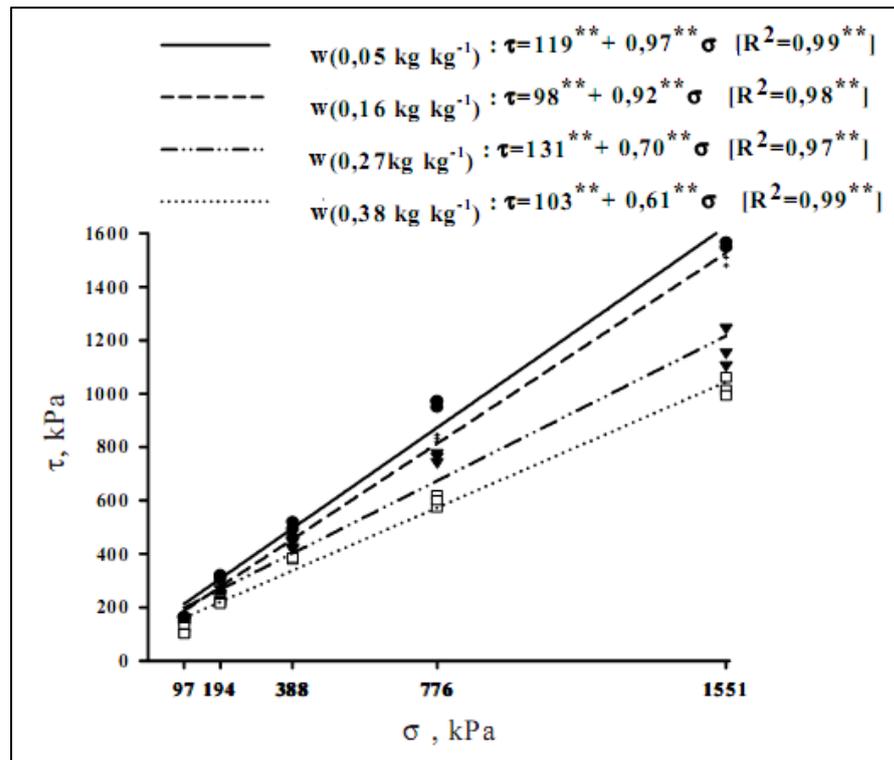


Figura 5.16. Relação linear entre a tensão normal e tensão cisalhante do Latossolo Vermelho distrófico, sob cerradão (CE), submetido a diferentes umidades. (Fonte: Silva *et al.*, 2004)

Segundo os autores citados anteriormente, observou-se que na maioria dos solos, o atrito interno tende a diminuir quando submetido a elevados conteúdos de água, sendo este efeito mais pronunciado, quanto menor forem as partículas granulométricas do solo (Robbins *et al.*, 1988, e Yao & Zen, 1988 *apud* Silva *et al.*, 2004).

Koolen e Kuipers (1983) *apud* Silva *et al.*, (2004) relataram que o parâmetro granulometria, além de sofrer influência da umidade, é especialmente afetado pela tensão normal de consolidação. É importante mencionar que a queda do ângulo de atrito interno ocorre somente para teores de umidades elevados, fato que não foi observado para a LV.

5.3 ENSAIOS DE CISALHAMENTO MATERIAL/PAREDE COM A CÉLULA JENIKE

De acordo com o gráfico da figura 5.14, as funções de fluxo das amostras de LV comportam-se como funções de fluxo de produto coesivo na variação definida do teor de umidade. Uma importante consideração a ser feita na figura 5.14 esta relacionada ao comportamento direto da FF em função dos quatro teores de umidades estudados, pois a FF aumenta a medida que se eleva o teor de umidade. Entretanto é importante mencionar que a LV é um produto que em função da consolidação ou do próprio tempo, pode tornar-se muito

coesivo e desenvolver problemas no fluxo. No ensaio material/parede mede-se o atrito existente entre o material e a parede do silo a ser projetado. Para determinação do ângulo de atrito, foram adotados os níveis de carga 50N, 40N, 30N, 20N, 10N e 5N (ver figura 5.17).

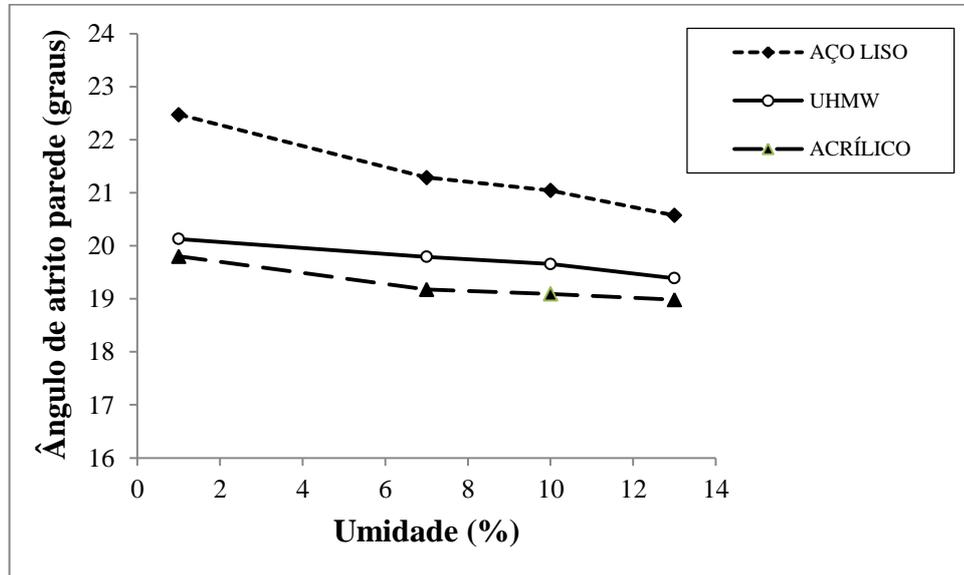


Figura 5.17 - Resultado do atrito material/parede para o aço liso, UHMW e acrílico.

O coeficiente de atrito dinâmico da LV diminui linearmente com o incremento do teor de umidade, independentemente do material de parede. Essa observação é mais acentuada no material acrílico devido possuir uma superfície menos rugosa se comparado com o aço e o UHMW. Porém o material UHMW apresenta uma grande vantagem em relação aos outros, devido não ser corrosivo e possuir alta resistência em sua estrutura.

As superfícies utilizadas nos ensaios foram aço liso, UHMW e acrílico, por serem materiais de pequena rugosidade superficial. Segundo Fekete *et al.*, (2007) se um produto de massa granular encontra-se a uma determinada úmida e se move sobre uma superfície pouco rugosa que constitui a parede de um dispositivo de armazenamento, a adesão do produto na superfície geralmente provoca um aumento nas forças de cisalhamento. A presença de líquido cria pontes entre as partículas, e também entre as superfícies adjacentes. Isto produz uma mudança das propriedades do produto, que é significativa durante processamento e em especial no seu manuseio.

A Tabela 5.7 mostra os resultados obtidos por meio da equação 2.6 (ver capítulo 2) para aos ângulos de atrito material/parede referentes aos produtos aço liso, UHMW e acrílico, usados como materiais de parede. Para cada teor de umidade se observam ângulos de atrito distintos entre o material e a parede.

Tabela 5.7 – Ângulos de atrito material/parede.

Umidade(%)	ϕ_w (Aço)	ϕ_w (UHMW)	ϕ_w (Acrílico)
1,0	21,31°	20,16°	19,86°
7,0	20,82°	19,67°	19,21°
10,0	20,23°	19,51°	18,88°
13,0	20,50°	19,18°	18,72°

De acordo com a tabela 5.7 se pode concluir que à medida que o teor de umidade se eleva o ângulo de atrito material/parede sofre um efeito contrário, ou seja, diminui bem suavemente independente do material utilizado como parede no ensaio de cisalhamento. É importante ressaltar que o material acrílico apresenta menor resistência ao cisalhamento em comparação com os outros dois materiais. Entretanto o material UHMW é o mais indicado para revestimento de silos, devido apresentar uma melhor estrutura física em comparação ao acrílico e uma menor resistência ao cisalhamento em comparação ao aço.

5.4 RESULTADOS PELA ABORDAGEM DE JENIKE

Na tabela 5.8 estão dispostos os resultados dos valores correspondentes aos ângulos de inclinação da tremonha cônica com a vertical para os materiais de revestimento aço, UHMW e acrílico. Os resultados dos ângulos de inclinação com a vertical foram obtidos pela metodologia gráfica proposta por JENIKE.

Tabela 5.8 – Ângulos de inclinação da tremonha com a vertical.

Umidade	$\theta_{Aço}$	θ_{UHMW}	$\theta_{Acrílico}$
1,0%	27,50°	28,80°	28,90°
7,0%	28,30°	29,20°	29,80°
10,0%	28,70°	29,80°	30,40°
13,0%	29,60°	30,50°	30,90°

Analisando os valores dos ângulos de inclinação da tremonha com a vertical, se observa que não ocorreu variação expressiva nos ângulos para os três tipos de materiais de parede testados. Isso ocorre em razão das superfícies apresentarem semelhança. Em relação à tensão crítica de consolidação se determinou primeiramente o fator de fluxo pela equação 2.10 e depois se definiu o ponto de intersecção com a tensão não confinada de acordo a o gráfico 3.7 (ver capítulo 3). Os resultados estão nos gráficos das figuras 5.18 e 5.19.

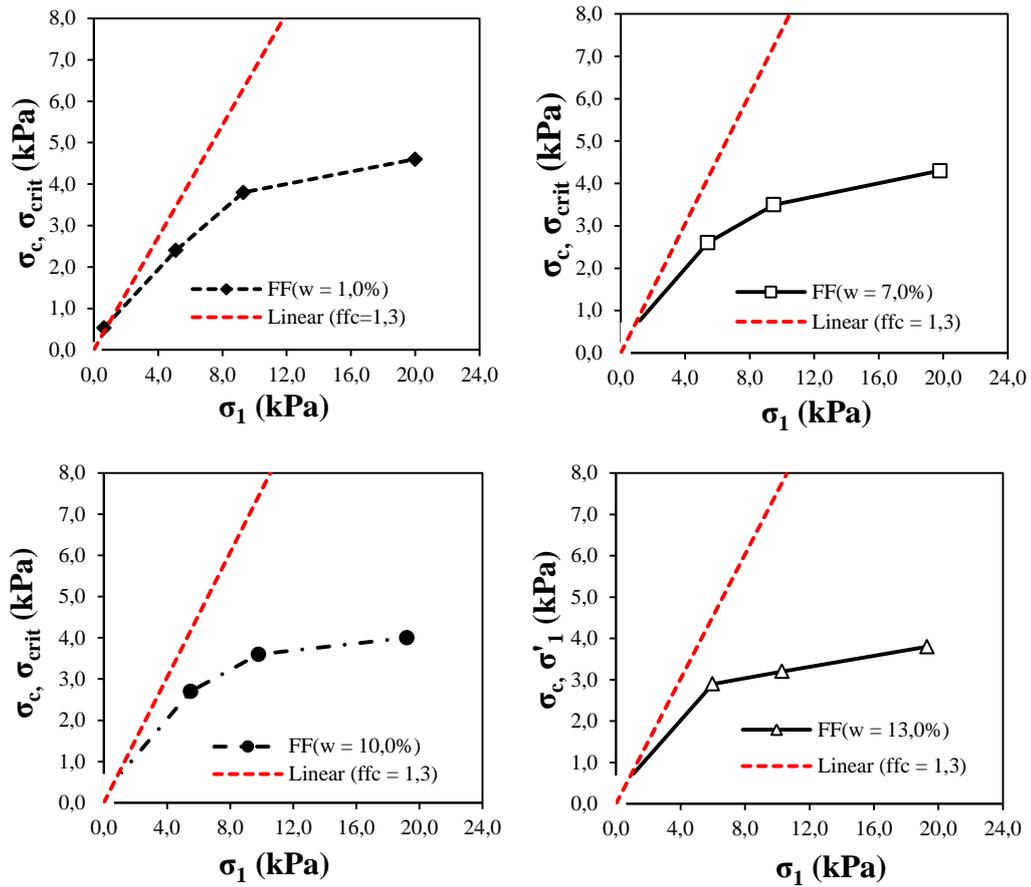


Figura 5.18 - Tensões críticas de consolidação para ($\sigma_{pré} = 0,2$ kPa).

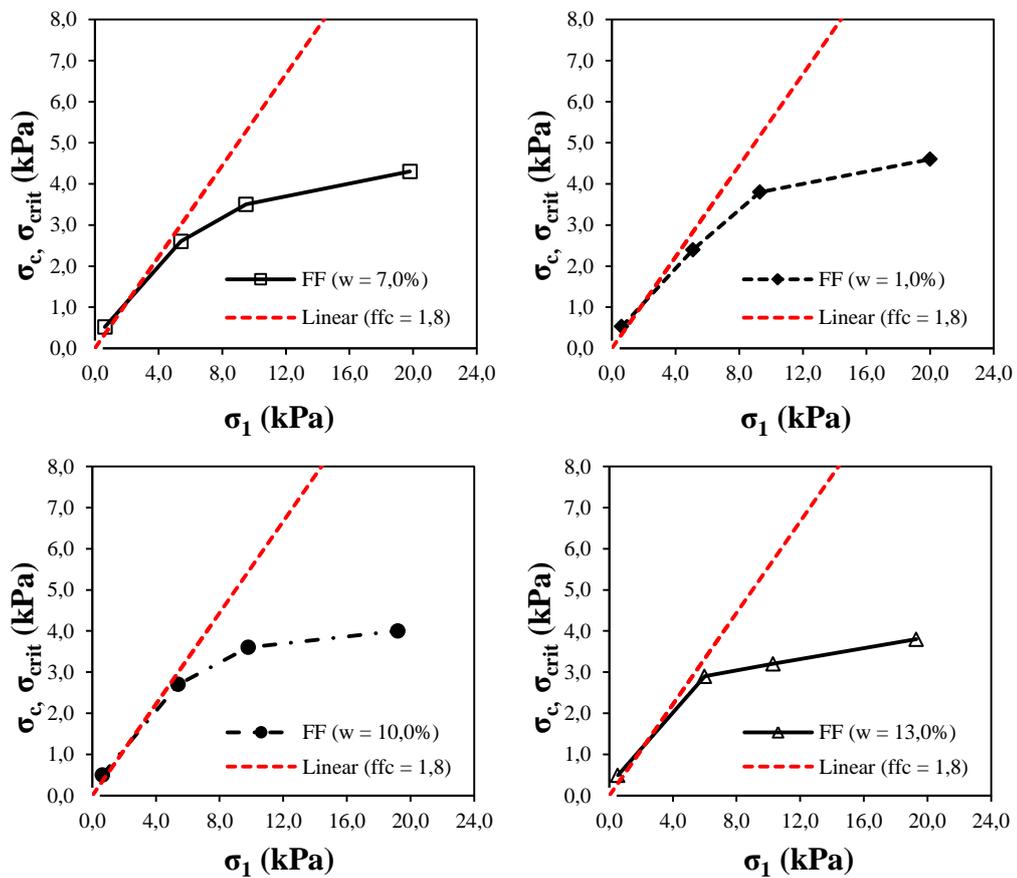


Figura 5.19 - Tensões críticas de consolidação para ($\sigma_{pré} = 8,3$ kPa).

Segundo Neiva, (1998) a tensão crítica de consolidação tende a diminuir à medida que a função de fluxo do produto diminui e tende a se elevar à medida que o fator de fluxo da tremonha aumenta. Se o fator de fluxo da tremonha variar sempre abaixo da Função de Fluxo do produto, então o produto armazenado não fluirá somente por gravidade. Neste caso, pode-se substituir o material da parede da tremonha por outro mais liso, ou mesmo, revesti-la com outro material, diminuindo a rugosidade das paredes. Se, mesmo assim, permanecer a situação de não fluxo, utiliza-se os dispositivos de descarga. Nas tabelas 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 encontram-se os valores da σ_{cri} , ff_c , $H(\theta)$ e os diâmetros de descarga majorados de 20%, para os ângulos de inclinação com a vertical.

Tabela 5.9 – Resultados dos parâmetros e diâmetro mínimo de descarga obtidos pela teoria de Jenike para o material Aço ($\sigma_{pré} = 0,2$ kPa).

Umidade	ff_c	$H(\theta)$	σ_{cri} (kPa)	b_{min} (mm)
1,0%	1,3	2,31	0,40	85,627
7,0%	1,3	2,33	0,45	95,714
10,0%	1,3	2,35	0,55	117,114
13,0%	1,3	2,37	0,60	128,848

Tabela 5.10 - Resultados dos parâmetros e diâmetro mínimo de descarga obtidos pela teoria de Jenike para o material Aço ($\sigma_{pré} = 8,3$ kPa).

Umidade	ff_c	$H(\theta)$	σ_{cri} (kPa)	b_{min} (mm)
1,0%	1,8	2,44	1,55	350,477
7,0%	1,8	2,46	1,62	363,796
10,0%	1,8	2,48	1,65	373,545
13,0%	1,8	2,52	1,78	406,442

Tabela 5.11 - Resultados dos parâmetros e diâmetro mínimo de descarga obtidos pela teoria de Jenike para o material UHMW ($\sigma_{pré} = 0,2$ kPa).

Umidade	ff_c	$H(\theta)$	σ_{cri} (kPa)	b_{min} (mm)
1,0%	1,3	2,23	0,40	82,661
7,0%	1,3	2,25	0,45	92,428
10,0%	1,3	2,26	0,55	113,469
13,0%	1,3	2,27	0,60	123,411

Tabela 5.12 - Resultados dos parâmetros e diâmetro mínimo de descarga obtido pela teoria de Jenike para o material UHMW ($\sigma_{pré} = 8,3$ kPa).

Umidade	ff_c	$H(\theta)$	σ_{cri} (kPa)	b_{min} (mm)
1,0%	1,8	2,37	1,55	340,423
7,0%	1,8	2,39	1,62	353,444
10,0%	1,8	2,40	1,65	361,495
13,0%	1,8	2,42	1,78	390,314

Tabela 5.13 - Resultados dos parâmetros e diâmetro mínimo de descarga obtidos pela teoria de Jenike para o material Acrílico a $\sigma_{pré} = 0,2$ kPa.

Umidade	ff_c	$H(\theta)$	σ_{cri} (kPa)	b_{min} (mm)
1,0%	1,3	2,20	0,40	81,549
7,0%	1,3	2,21	0,45	90,785
10,0%	1,3	2,23	0,55	111,963
13,0%	1,3	2,24	0,60	121,781

Tabela 5.14 - Resultados dos parâmetros e diâmetro mínimo de descarga obtidos pela teoria de Jenike para o material Acrílico a $\sigma_{pré} = 8,3$ kPa.

Umidade	ff_c	$H(\theta)$	σ_{cri} (kPa)	b_{min} (mm)
1,0%	1,8	2,34	1,55	336,113
7,0%	1,8	2,37	1,62	350,486
10,0%	1,8	2,38	1,65	358,483
13,0%	1,8	2,40	1,78	387,088

Para o diâmetro mínimo de descarga, verifica-se pouca variação para as três superfícies de parede, nas mesmas condições de ensaio. O mesmo se observou entre o mínimo e o máximo teor de umidade, onde ocorre elevação do diâmetro mínimo de descarga em razão da tensão crítica de consolidação aumentar à medida que se eleva o teor de umidade. No entanto à medida que se eleva a tensão de consolidação percebe-se grande elevação no diâmetro de descarga. Fato este que se deve ao aumento do fator de fluxo da tremonha e consequentemente ao aumento da tensão de consolidação crítica.

5.5 RESULTADOS PELA ABORDAGEM DE ENSTAD

Nesta abordagem o ângulo de inclinação da tremonha adotado permanece 30°, pois o objetivo do dimensionamento do diâmetro de descarga é a obtenção de fluxo de massa. Sendo importante mencionar que a equação que define o diâmetro por essa abordagem apresenta resultados menores para ângulos de inclinação da tremonha maiores, ou seja, relaciona o diâmetro de descarga e o ângulo de inclinação da tremonha de forma inversa, o que não é interessante para determinação do fluxo de massa.

As tabelas, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20 apresentam os valores das funções β , k , h e os diâmetros mínimos de descarga, para amostras com diferentes teores de umidade e tipos de materiais de parede.

Tabela 5.15 - Resultados obtidos para o material Aço ($\sigma_{pré} = 0,2$ kPa).

Umidade	β	$k(kPa)$	h	$b(mm)$
1,0%	24,829	0,652	12,099	33,098
7,0%	23,164	0,714	10,771	41,042
10,0%	22,128	0,853	9,302	57,841
13,0%	21,316	1,035	7,483	87,938

Tabela 5.16 - Resultados obtidos para o material Aço ($\sigma_{pré} = 8,3$ kPa).

Umidade	β	$k(kPa)$	h	$b(mm)$
1,0%	24,829	3,852	12,305	196,680
7,0%	23,164	3,925	11,409	230,990
10,0%	22,128	4,313	9,734	298,566
13,0%	21,316	3,878	7,821	336,392

Tabela 5.17 - Resultados obtidos para o material UHMW ($\sigma_{pré} = 0,2$ kPa).

Umidade	β	$k(kPa)$	h	$b(mm)$
1,0%	22,404	0,604	12,839	30,374
7,0%	21,355	0,698	11,501	40,175
10,0%	20,172	0,841	9,841	56,760
13,0%	20,585	0,992	7,807	85,075

Tabela 5.18 - Resultados obtidos para o material UHMW ($\sigma_{pré} = 8,3$ kPa).

Umidade	β	k(kPa)	h	b(mm)
1,0%	22,404	3,562	13,684	183,963
7,0%	22,264	3,715	12,039	220,955
10,0%	20,717	4,051	10,334	282,481
13,0%	19,938	3,743	8,329	323,177

Tabela 5.19 - Resultados obtidos para o material Acrílico ($\sigma_{pré} = 0,2$ kPa).

Umidade	β	k(kPa)	h	b(mm)
1,0%	22,067	0,591	13,113	29,829
7,0%	20,851	0,687	11,646	39,483
10,0%	20,044	0,827	10,016	56,235
13,0%	19,458	0,928	8,368	81,001

Tabela 5.20 - Resultados obtidos para o material Acrílico ($\sigma_{pré} = 8,3$ kPa).

Umidade	β	k(kPa)	h	b(mm)
1,0%	22,067	3,393	13,757	174,891
7,0%	20,851	3,781	11,646	217,158
10,0%	20,044	3,723	10,016	253,057
13,0%	19,458	3,611	8,368	315,002

De acordo com os resultados mostrados nas tabelas acima se observa um aumento no diâmetro mínimo de descarga à medida que se eleva o teor de umidade. Os resultados dos diâmetros de descarga descritos pela teoria de Enstad diferem em comparação aos diâmetros de descargas descritos pela teoria de Jenike, levando-se em consideração as mesmas tensões iniciais de consolidação das amostras. Porém a tensão (0,2kPa) a teoria de Jenike apresenta valores maiores para o diâmetro de descarga em relação a de Enstad.

No entanto à medida que se eleva a tensão de consolidação (8,3kPa) verifica-se o contrário, ou seja, a teoria de Jenike passa a apresentar menores valores para o diâmetro de descarga e a teoria de Enstad passa apresentar maiores valores para os diâmetros. Sendo o comportamento dos resultados dos diâmetros de descarga para os materiais Aço e UHMW mostrados nas figuras 5.20 e 5.21.

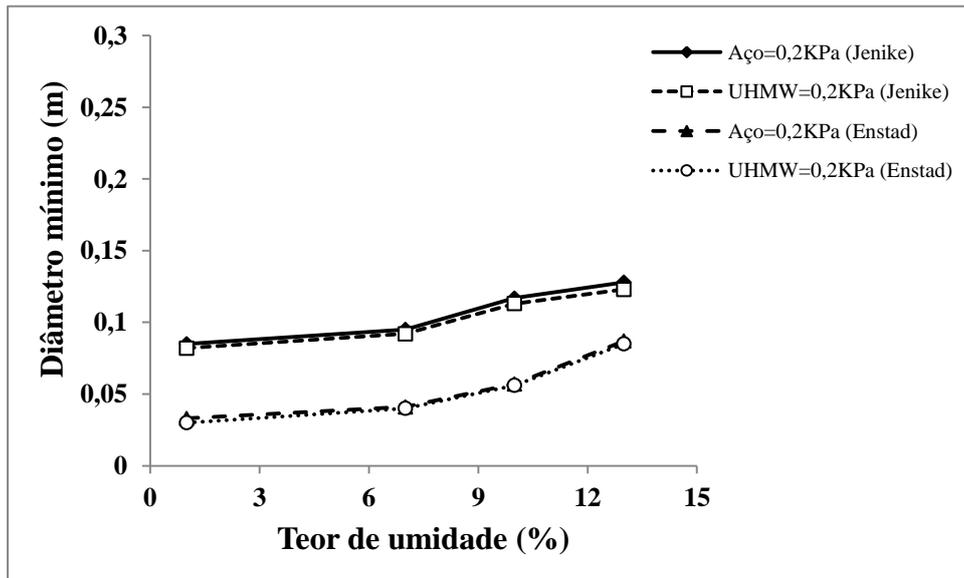


Figura 5.20 – Diâmetros mínimos de descarga para o Aço e UHMW (amostras inicialmente consolidadas a 0,2 KPa).

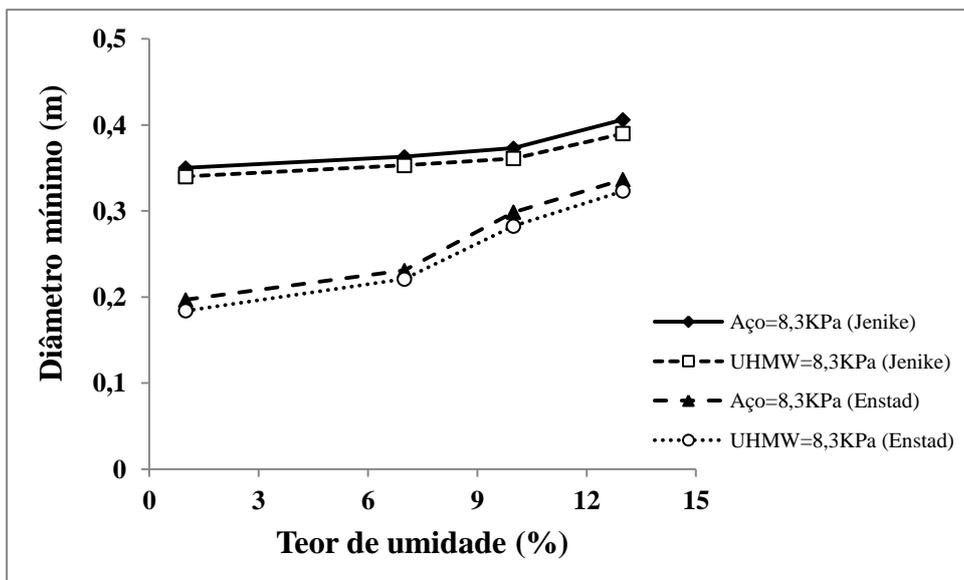


Figura 5.21 - Diâmetros mínimos de descarga para o Aço e UHMW (amostras inicialmente consolidadas a 8,3 KPa).

Analisando as figuras 5.20 e 5.21 se observa uma grande diferença nos resultados obtidos pelas duas teorias abordadas, onde se verificam variações nos resultados dos diâmetros de descarga para os quatro teores de umidades. Ressaltando que o material acrílico não é apropriado para o revestimento de silos, entretanto sua superfície é bem próxima em rugosidade a dos materiais aço liso e UHMW, fato que proporcionou a utilização de seus resultados obtidos para os diâmetros de descarga no dimensionamento do silo modelo de acrílico. Tendo este silo corpo fixo e cinco tremonhas móveis de diferentes diâmetros de descarga, cujos valores desses diâmetros se apresentam próximos de 29,8mm (teoria Enstad) e

não tão próximos de 81,5mm (teoria de Jenike), os quais são diâmetros mínimos obtidos pelas duas teorias. Em relação aos ângulos de inclinação da tremonha se utilizou 30° para obtenção de fluxo de massa e 45° e 60° para obtenção de fluxo de funil ou não fluxo.

5.6 ESCOAMENTO DA LV NO SILO PROTÓTIPO DE ACRÍLICO COM TREMONHAS DIFERENTES

Os experimentos realizados para o escoamento do produto LV foram realizados com amostras nos teores de umidade 1,0%, 7,0% e 13%. O que se pode observar no experimento com as amostras de LV a 1% de teor de umidade nos silos 1 e 4 ocorreu surgimento de arcos durante a descarga, fato que impossibilitou o escoamento total do produto. Em relação aos silos 2 e 3 se verificou ocorrência de fluxo de funil, enquanto que no silo 5 se obteve fluxo de massa. No experimento realizado com amostras de LV a 7% de teor de umidade não ocorre escoamento para os silos 1 e 4 devido a formação de arcos, logo no início da descarga. Em relação aos silos 2 e 3, novamente se observou a ocorrência de fluxo de funil, enquanto que no silo 5 se presencia fluxo de massa. Para experimento realizado com amostras de LV a 13% de teor de umidade se observa formação de arco logo no início da descarga para os silos 1, 2 e 4, obstruindo dessa forma o escoamento. O silo 3 escoado a LV em forma de fluxo de funil e o silo 5 escoado a LV em forma de fluxo de massa.

O comportamento dos resultados experimentais e teóricos do escoamento da LV em função dos diâmetros de descarga e dos ângulos de inclinação da tremonha estão mostrados nas figuras 5.22 e 5.23. Sendo o escoamento observado para os cinco tipos de tremonhas.

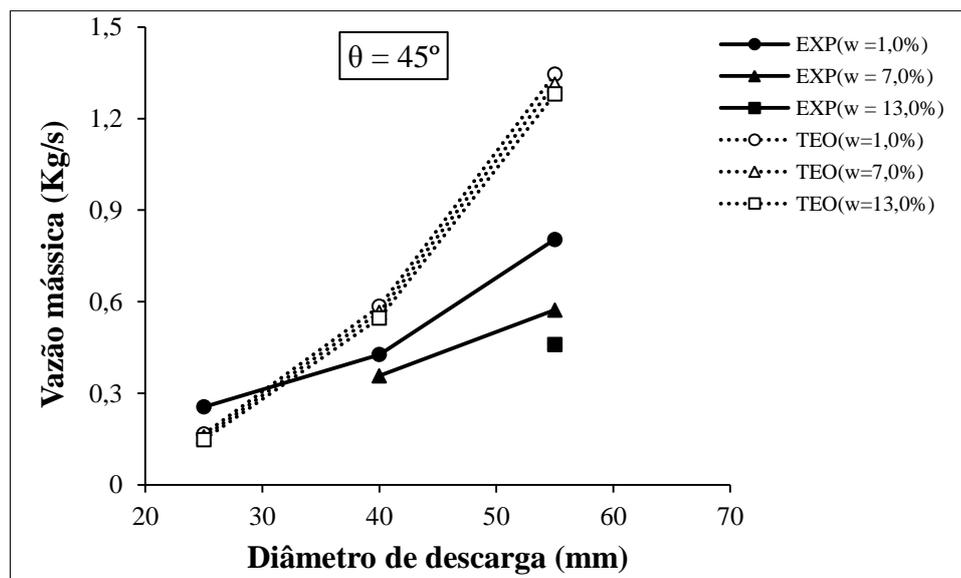


Figura 5.22 – Comportamento experimental e teórico de vazão de massa ($\theta = 45^\circ$).

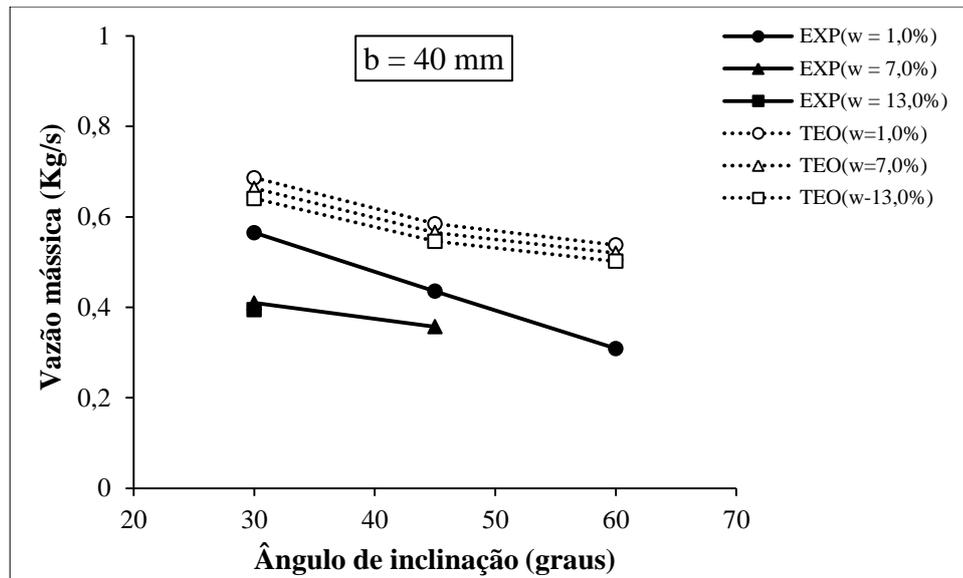


Figura 5.23 – Comportamento experimental e teórico de vazão de massa (b = 40mm).

Analisando os gráficos das figuras 5.20 e 5.21 obtidos com valores determinados pela abordagem de Jenike verifica-se que a medida que se eleva o teor de umidade o escoamento da LV tende a diminuir. Sendo 30° o ângulo de inclinação e 55mm o diâmetro de descarga, os valores onde ocorre o fluxo de massa. A LV não escoava para $b \leq 25\text{mm}$ e $\theta \geq 45^\circ$ quando submetida aos teores de umidade analisados. Os resultados experimentais e teóricos referentes a vazão de massa da LV no silo modelo de acrílico em relação a cada uma das cinco tremonhas cônicas são mostrados respectivamente nas tabelas 5.21 e 5.22.

Tabela 5.21 – Resultados experimentais das vazões de massa no silo piloto de acrílico.

Tremonha	dm/dt (kg/s) a w = 1,0%	dm/dt (kg/s) a w = 7,0%	dm/dt (kg/s) a w = 13,0%
	dm/dt _{EXP}	dm/dt _{EXP}	dm/dt _{EXP}
01	0,255 ± 0,023	0	0
02	0,426 ± 0,032	0,357 ± 0,039	0
03	0,803 ± 0,012	0,572 ± 0,016	0,459 ± 0,039
04	0,308 ± 0,026	0	0
05	0,564 ± 0,036	0,409 ± 0,033	0,394 ± 0,024

Aplicando a equação 5.8 se determinou a estimativa do erro que afeta a dm/dt do produto LV a 1,0% de umidade. Faz-se o mesmo procedimento para 7,0% e 13% de umidade.

$$\delta \frac{dm}{dt} = \left(\frac{1}{t} \right) \delta m + \left(\frac{m}{t^2} \right) \delta t \quad (5.8)$$

Nas mesmas condições de temperatura e pressão, se realizou o experimento para obtenção dos resultados da vazão de massa, juntamente com o erro de sua medida, os quais são provenientes das incertezas (δm e δt). O erro da vazão obtido para a tremonha (1) corresponde aproximadamente a $\delta dt/dm = \pm 0,023$, ou seja, $\delta(dm/dt)' = \pm 2,32\%$. Considerando os valores dos parâmetros: $m = 4180g$ e $t = 106,2s$; $\delta m = \pm 0,5g$; $\delta t = \pm 0,05s$.

Tabela 5.22 – Resultados teóricos das vazões de massa no silo piloto de acrílico.

Tremonha	dm/dt (kg/s) a 1,0%	dm/dt (kg/s) a 7,0%	dm/dt (kg/s) a 13,0%
	dm/dt _{TEO}	dm/dt _{TEO}	dm/dt _{TEO}
01	0,166	0,156	0,148
02	0,584	0,565	0,545
03	1,345	1,312	1,280
04	0,537	0,519	0,501
05	0,686	0,662	0,640

Uma observação interessante a ser feita esta relacionada a diminuição da vazão de massa da LV a medida que se eleva o teor de umidade das amostras, o que implica em maiores diâmetros de descarga a medida que aumenta a presença de água nas amostras de LV. O quadro 5.1 mostra um esquema dos resultados experimentais do escoamento ou não escoamento da LV, fazendo a relação entre os ângulos de inclinação e os diâmetros de descargas das cinco tremonhas utilizadas nos experimentos.

Quadro 5.1 – Análise experimental da vazão de massa em relação aos parâmetros teor de umidade, diâmetro mínimo de descarga e ângulo de inclinação da tremonha.

Ângulo	60°	X		w (%)	Escoamento	X	
				13,0%	Não (4)		
				7,0%	Não (5)		
	45°	w (%)	Escoamento	1,0%	Não (6)	w (%)	Escoamento
		13,0%	Não (1)	13,0%	Não (7)	13,0%	Sim (13)
		7,0%	Não (2)	7,0%	Sim (8)	7,0%	Sim (14)
	30°	1,0%	Não (3)	1,0%	Sim (9)	1,0%	Sim (15)
		X		13,0%	Sim (10)	X	
				7,0%	Sim (11)		
	1,0%			Sim (12)			
		25mm	40mm		55mm		
Diâmetro (mm)							

Sendo importante mencionar pela observação do quadro 1 que a LV vermelha escoar a partir de um diâmetro mínimo de descarga e de ângulo máximo de inclinação. Considerando-se ainda o teor de umidade da amostra que deve escoar.

A figura 5.24 mostra os experimentos de escoamento realizados nos silos modelos referentes ao quadro 5.1, onde se observa a ocorrência ou não de fluxo da LV.

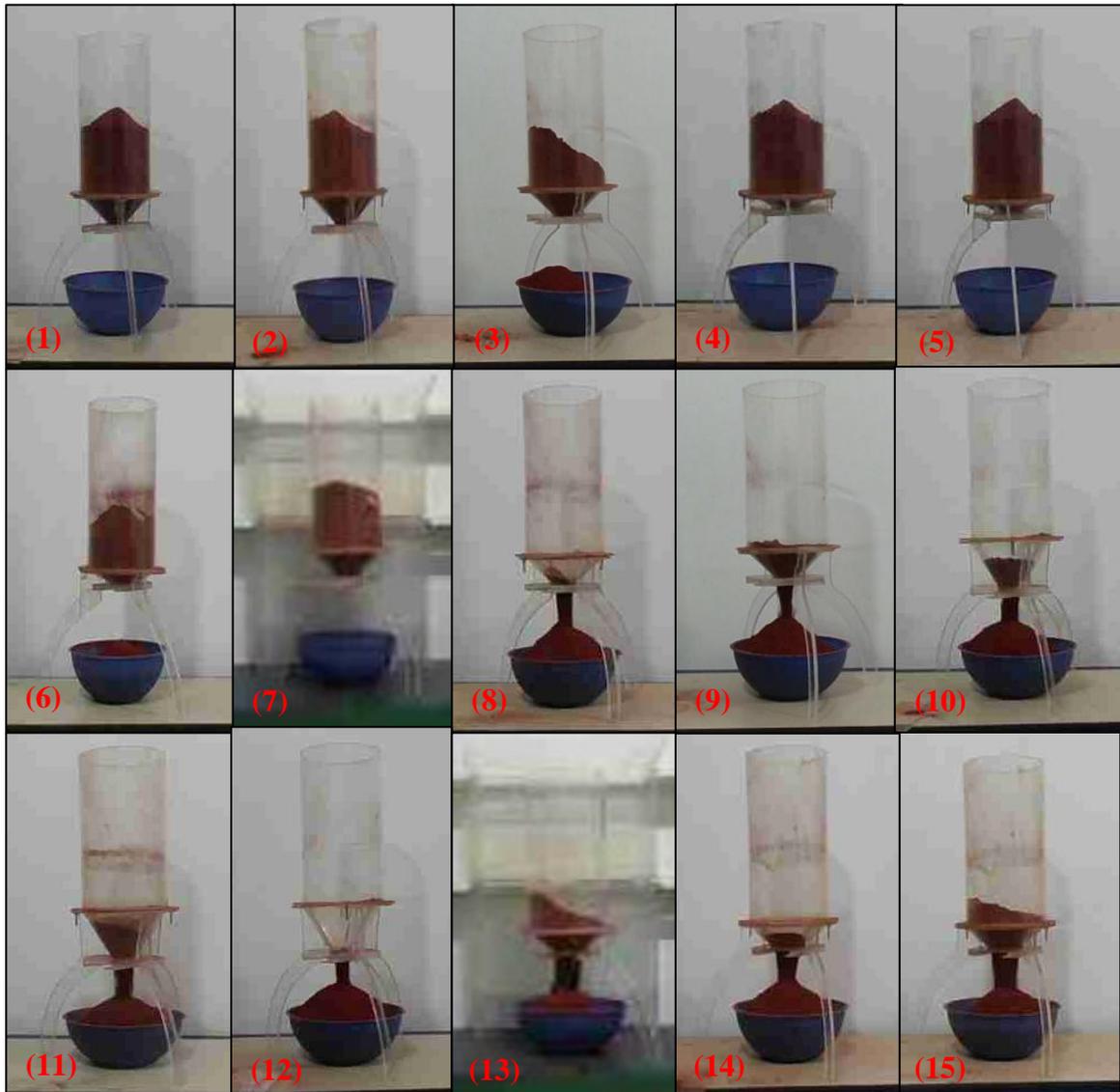


Figura 5.24 – Escoamento da LV em silos modelos.

5.7 DIMENSIONAMENTO DE UM SILO INDUSTRIAL

Por meio dos resultados experimentais se dimensiona um silo industrial, utilizando o ângulo de atrito efetivo correspondente à 30° (ver tabela 5.6), o qual resulta dos ensaios de cisalhamento material/material sob tensão de consolidação inicial de 8,3 kPa. O ângulo de inclinação da tremonha corresponde aproximadamente 30° e foi obtido por meio do gráfico (figura 3.5), sendo de $20,16^\circ$ o ângulo de atrito existente entre o produto LV e UHMW.

Sendo a tensão de consolidação inicial 8,3 kPa cerca de quarenta vezes a tensão 0,2 kPa. Então se estima a distância do vértice virtual da tremonha até a saída de descarga quarenta vezes maior que 0,04mm o que corresponde a 1,6m e a aceleração da gravidade tendo módulo $9,81\text{m/s}^2$. Aplicando a equação 3.7 (algoritmo I do capítulo III) determina-se o valor 10,359 kPa para a tensão atuante no arco e por meio do gráfico (figura 3.4) se define 1,6 para a função de fluxo da tremonha. Da relação $ff_c = \sigma_1 / \sigma_{1a}$ se obtém $\sigma_1 = 16,574$ kPa. Na figura 5.25 verifica-se o ponto de interseção entre o ff_c e a FF, corresponde a $\sigma_{cr} = 1,98$ kPa.

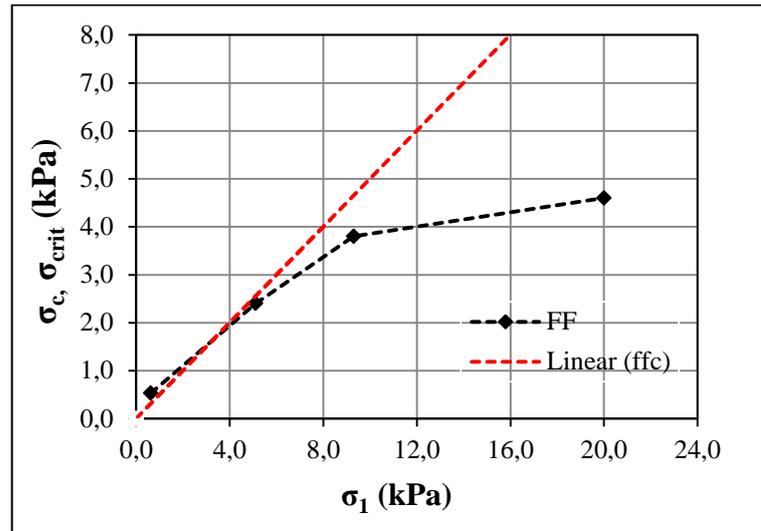


Figura 5.25 – Curva de FF e a sua interseção com a reta da inversa de $ff_c = 2$.

Com a figura 3.6 se determina a função $H(\theta) = 2,4$ e aplicando-se a equação 3.5 calcula-se o valor do diâmetro $b = 440$ mm, valor majorado em 20%. A figura 5.26 mostra as dimensões do silo industrial com revestimento de UHMW.

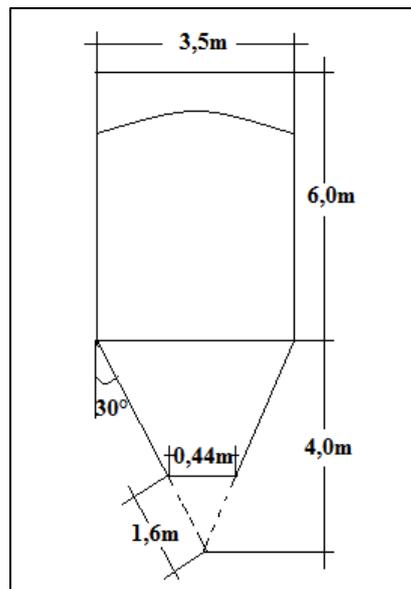


Figura 5.26 – Silo industrial.

De acordo com as dimensões do exemplo de silo industrial, onde se leva em consideração a maior tensão de consolidação inicial aplicada nas amostras durante o ensaio de cisalhamento material/material, a qual é da ordem de 8,3 kPa. Este silo teria dimensões de aproximadamente 10m de altura; 4,0 de altura para tremonha; 3,5m de diâmetro do corpo; 30° de inclinação da tremonha com a vertical e um diâmetro de descarga 0,44m. Essas dimensões proporcionam uma capacidade de armazenamento no silo de aproximadamente 150.000,00 Kg do produto LV.

Por final são feitas as conclusões dos resultados obtidos, mostrando os melhores parâmetros de dimensionamento e o material mais indicado para revestimento da tremonha, afim de que ocorra o fluxo de massa da LV.

CAPÍTULO IV

CONCLUSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à ausência de estudos relacionados ao escoamento do produto LV. O presente trabalho se volta para a determinação das propriedades de fluxo do produto LV e servem para proporcionar um conhecimento adequado do escoamento deste produto a baixos teores de umidades em tremonhas cônicas e silos. Neste trabalho pode-se afirmar que o produto LV nos teores de umidade analisados entre, 1 a 13% apresenta fluxo variável. A tensão de coesão tem pouca variação com a umidade, diminuindo suavemente o seu valor com o aumento do teor de umidade. Este comportamento está em acordo com observações experimentais em solos argilosos (SILVA e CARVALHO, 2007).

No entanto, o ângulo de atrito interno se eleva à medida que aumenta o teor de umidade das amostras, fato que implica na dificuldade de escoamento do produto, contrariamente com que se observa em solos argilosos. A tensão não confinada aumenta à medida que se eleva a consolidação das amostras e diminui suavemente com o aumento da umidade. A fluidez da LV quanto à granulometria, caracteriza-se como um produto pulverulento coesivo, com partículas médias de 0,149mm de diâmetro. Em relação ao ângulo de repouso, se observou que a medida que se eleva o teor de umidade da LV, o ângulo de repouso sofreu uma suave diminuição devido a própria queda da coesão, entretanto seu escoamento classifica-se como sendo difícil. Na comparação entre os materiais de parede o acrílico apresenta menor atrito no contato com a LV, seguido dos materiais UHMW e aço. Entretanto o material mais indicado para revestimento de tremonhas e o UHMW, devido ser ultra resistente e não corrosivo.

A dimensão mínima do diâmetro de descarga apresenta representativa variação quanto aos teores de umidades sofridos pelas amostras do produto LV. Os resultados obtidos pela teoria de Jenike para o diâmetro de descarga em comparação com os resultados obtidos pela abordagem de Enstad apresentam significativa diferença, ficando os maiores diâmetros determinados pela teoria de Jenike para amostras sob consolidação inicial de 0,2 KPa e para amostras consolidadas a 8,3 KPa os diâmetros determinados pela teoria de Enstand passam a ser maiores. Em consideração aos materiais de revestimento aço, UHMW e acrílico se verificou variações nos diâmetros referentes aos resultados obtidos por meio das duas teorias. Sendo os diâmetros de descarga das tremonhas do silo modelo de acrílico baseados nos

valores obtidos pela teoria de Enstad para amostras sob 0,2 kPa de tensão de consolidação inicial.

A melhor vazão mássica do produto LV corresponde ao escoamento de 4,18 Kg em aproximadamente 5,2 segundos o que representa aproximadamente 0,80 Kg/s. A tremonha com o melhor fluxo corresponde a de diâmetro de descarga 55mm e ângulo de inclinação 45°. Sendo que no experimento da vazão mássica do produto LV no silo modelo de acrílico se observou que os ótimos parâmetros de dimensionamento da tremonha para que se tenha ocorrência de fluxo de massa, devem apresentar valores correspondentes a: $\theta \leq 30^\circ$ e $b_{\min} \geq 40\text{mm}$.

6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como continuidade do trabalho, recomendam-se:

1. Dimensionar um silo protótipo de maiores dimensões.
2. Fazer uma análise experimental do comportamento da vazão de massa da LV em silos protótipos, levando-se em consideração o tempo de consolidação da amostra no silo;
3. Estudos de outros tipos de produtos armazenados que não apresentem as mesmas características dos produto LV apresentado nesta pesquisa (pulverulentos coesivos finos e extra finos);
4. Realizar um estudo para dimensionar a abertura de descarga da tremonha para o produto LV levando-se em consideração os efeitos durante a descarga no silo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (NBR 6502), **Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 2005.

AMORÓS, J. L.; MALLOL, G. SÁNCHEZ, S. e GARCÍA, J. **Projeto de Silos para o Armazenamento de Materiais na Forma de Pó**. Problemas Associados à Etapa de Descarga. *Cerâmica Industrial*, 7 (1) Janeiro/Fevereiro, 2002.

ASTM, Standard D6128-97, **American Society for Testing and Materials**, 1997.

BATISTA, C. S. **Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulados em silos verticais**. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB. Novembro, 2009.

BENEDETTI, B.C. 1987, **Influência do teor de umidade sobre propriedades físicas de vários grãos**. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP.

BENINK, E.J. **Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes**. 162p. Tese (Doutorado). Universiteit Twente. The Netherlands, (1989).

BITENCOURT, C. S.; TEIDER, B. H. GALLO, J. B. PANDOLFELLI, V. C. **A geopolimerização como técnica para a aplicação do resíduo de bauxita**. *Cerâmica* 58 (2012).

CALIL Jr., C. **Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais**. EESC – USP, 1990.

CALIL Jr., C.; NASCIMENTO, J.W.B; ARAÚJO, E. C. **Silos Metálicos Multicelulares**. Serviço Gráfico - EESC / USP – São Carlos – SP, 1997.

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

CAMPOS, M. M. **Análise da escoabilidade de Pós**. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos – SP. 2012.

CHAVES, A. G. F., “**A lama vermelha e sua eliminação da fábrica de alumina**”, In: 2º semana de estudos. Alumínio e Zinco. Sociedade de Intercâmbio Cultural e Estudos Geológicos dos Alunos da Escola de Minas de Ouro Preto, n. 2, Ouro Preto, Minas Gerais, 1962.

COSTA, T. F. **Estudo das propriedades físicas da alumina através da célula Jenike de cisalhamento para predição de fluxo em silos.** Universidade Federal do Pará. Belém, PA. 2008.

DALBELLO, O.; OLIVEIRA, M.J.G.; BENEDETTI, B.C. **Determinação do ângulo de taluda e coeficiente de atrito para amendoim e aveia preta em diferentes teores de umidade.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, XXIII, 1994, Campinas – SP, 1994.

DE JESUS, I. M., SANTOS, E.C.O, BRABO, E. S., LIMA, M. O., MENDES, R. A., FAIAL, K. R. F., CARNEIRO, B. S., MASCARENHAS, A. S., SILVA, J. K. R., CARNEIRO, J. S., RODRIGUES, A. V., BATISTA, E. F., FAIAL, K. F., BARBOSA, F. F. S., “**Avaliação dos impactos ambientais no rio Murucupi em decorrência do transbordo de efluentes de uma bacia de resíduos sólidos no município de Barcarena-Pará**”, In: Congresso da Associação Brasileira de Química, Fortaleza, Ceará, Brasil, 2004.

DRESCHER, A.J. WATERS, C. A. RHOADES, *Archiving in hoppers: I. Archiving theories and bulk material flow properties*, Powder Technology, 84, 1995.

DRESCHER, A.J. WATERS, C. A. RHOADES, *Archiving in hoppers: II. Archiving theories and critical outlet size*, Powder Technology, 84, 1995.

DUTRA, F. C. e CARDOSO, A. V. **Caracterização Físico - Química do rejeito lama vermelha para aplicação como pigmento inorgânico.** Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal – RN. Novembro, 2002.

ENSTAD, G. G. **A novel theory on the arching and doming in mass flow hoppers.** Bergen: The Michelsen Institute, 1981.

FEKETE, R. PECIAR, M. HANZEL, M. **Influence of Powder Material Moisture on the Angle of Wall Friction.** ppsc-journal, pp. 322 – 338. 2007.

FILHO, S; ALVES, M. C. M.; Da Motta, M. **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas.** Revista Matéria, v. 12, n. 2, pp. 322 – 338. COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

FORTES FILHO, J. **Uma introdução ao estudo dos silos.** Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1985.

FREITAS, E. G. A. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano**. Escola de Engenharia de São Carlos. USP, São Carlos, 2001.

GOMIDE, R. Operações Unitárias - 1º volume: **Operações com sistemas sólidos granulares**. São Paulo: Reynaldo Gomide, 1983.

HEZEL, C. R. **Avaliação das pressões em silos verticais conforme diferentes normas internacionais**. UNIOESTE - Cascavel – PR, 2007.

IBRACON. **Estruturas e Materiais**. Volume 5, Number 4. August, 2012 ISSN 1983-4195.

JENIKE, A.W. **New developments in the theory of particulate solids flow**. EFCE, Serie N° 49, Bergen, Norway, 1985.

JENIKE, A. W. **Storage and flow of solids**. Salt Lake City, University of Utah. 1964. (Bulletin. Utah Engineering Experiment Station, n°123).

JING, J. LI, H., **An experimental study on the mechanics of arching in hoppers connected to a moving bed with negative gradient**, Powder Technol. 95 (1998)

KLINE, S. J. F. A. MCCLINTOCK. “**Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments.**” *Mechanical Engineering*, Vol. 75, No. 1, January 1953.

LOPES NETO, J. P.; SILVA, V. R.; NASCIMENTO, J. W. B. **Propriedades de fluxo de produtos pulverulentos alimentícios**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, PB. Abril, 2008.

MACÊDO, A. N.; COSTA, D. H. P.; TRINDADE, S. S. R.; SOUZA, J. A. S.; CARNEIRO, R. J. F. M. **Comportamento de blocos cerâmicos estruturais produzidos a partir da mistura de lama vermelha e argila**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre - RS, v. 11, n. 4, p. 27, out./dez. 2011.

MARINELLI, J. & CARSON, J. W. **Solve Solids Flow Problems in Bins, Hoppers, and Feeders**. Westford, American Institute of Chemical Engineer. Copyright, 1992.

MASUDA, H. HIGASHITANI, K. YOSHIDA, H., **Powder Technology Handbook**, 3rd edition, CRC Press, FL, 2006.

MCGLINCHEY, D. **Characterisation of Bulk Solids**, 2005 by Blackwell Publishing Ltd.

- MILANI, A. P. (1993). **Determinação das propriedades de produtos armazenados para projeto de pressões e fluxo em silos**. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. (1993).
- MONTEIRO, M. H. e FERREIRA, M. C. **Investigação Sobre o Escoamento Gravitacional de Sólidos na Descarga de Silos**. VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. São Carlos – SP. 2005.
- NAKA, S. **Determinação das propriedades físicas dos grãos de mamona ‘guarani’ visando armazenagem em silos verticais**. Universidade Estadual de Campinas – SP, 2010.
- NASCIMENTO, F. C. **A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: o parâmetro K**. Escola de Engenharia de São Carlos. USP, São Carlos, 2008.
- NEDDERMAN, R. M. **Statics and kinematics of granular materials**. New York, Cambridge University Press, 1992. 9p.
- NEIVA, A. C. B. **Estudo de alimentadores de bagaço de cana para reatores atmosféricos**. Universidade Estadual de Campinas – SP, 1998.
- PALMA, G. **Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d > 1,5$)**. Escola de Engenharia de São Carlos. USP, São Carlos, 2005.
- RIVAS MERCURY, J. M.; GALDINO, L.G.; VASCONCELOS, N. S. L. S.; PAIVA, A. E. M.; CABRAL, A. A.; ANGÉLICA, R. S. **Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha**. Revista Matéria, v. 15, n. 3, Rio de Janeiro – RJ. Abril, 2010.
- ROBERTS, A.W., 1991, **Bulk solids handling: recent developments and future directions**, **Bulk Solids Handling**, 10th Anniversary Edition, 10(1): 17-35.
- ROSÁRIO, E .S. B., BESERRA, F. V. V. **Construção de um dispositivo para medir tensão cisalhante em sólidos a granel**. Curso de Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2004.
- ROSSI, C. R. C.; RAMOS, M. A.; OLIVEIRA. D. R. C. **Agregados de lama vermelha para concretos**. Universidade Federal do Pará, Belém – PA.
- SCALABRIN, L. A. **Dimensionamento de Silos Metálicos Para Armazenagem de Grãos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, junho, 2008.

SILVA, R. B. DIAS JUNIOR, M. S. SANTOS, F. L. FRANZ, C. A. B. **Resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes uso e manejo.** R. Bras. Ci. Solo, 28:165-173, 2004.

SOUZA, K. C. ANTUNES, L. P. **Utilização de Lama Vermelha Tratada com Peróxido de Hidrogênio e Ativada por Tratamento Térmico como Meio Adsorvedor do Corante Reativo Blue 19.** “CLEANER PRODUCTION INITIATIVES AND CHALLENGES FOR A SUSTAINABLE WORLD” São Paulo – Brazil – Maio, 2011.

SCHULZE, D. **Powders and Bulk Solids** (Behavior, Characterization, Storage and Flow). New York, Springer, 2007.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M., **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas.** Revista Matéria, v. 12, n. 2, 2007.

SILVA, E. B. F.; ALVES, M. C. M.; MOTTA, M.; OLIVEIRA, E. H. C. **Estudo sobre a utilização da lama vermelha para a remoção de corantes em efluentes têxteis.** Química Nova, Vol. 31, Nº. 5, 985-989, 2008.

SILVA, A. J. N. CARVALHO, F. G. **Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um latossolo amarelo de tabuleiro costeiro.** R. Bras. Ci. Solo, 31:853-862, 2007.

SOUZA, J. A. S. **Estudo e Avaliação do uso de Resíduos do Processo Bayer como Matéria Prima na Produção de Agregados Sintéticos Para a Construção Civil.** Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém – PA, 2010.

TEIXEIRA, L. G. R. **Determinação das propriedades físicas e de fluxo do café para projeto estrutural de silos e equipamentos.** Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras – MG, 2006.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos.** 2. ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1993.

WANG, S.; ANG, H. M.; TADÉ, M. O. **Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes.** Chemosphere, v. 72, p. 1621-1635, 2008.

<http://www.fem.unicamp.br> acesso 21/01/2012 às 23:46hs.

APÊNDICE I

CAMPO DE TENSÕES

2.1. Tensão

A figura 1A mostra um corpo qualquer, que se encontra sob a ação de forças externas. A parte inferior está em equilíbrio sob a ação de forças externas, bem como de forças internas, que são as que têm ponto de aplicação na secção transversal determinada pelo plano. Na área elementar dA dessa secção, cuja normal é \mathbf{n} , a força atuante elementar interna dF pode ser decomposta nos componentes dN , segundo a normal \mathbf{n} , e dT , contida na secção transversal do corpo. As equações (A1) e (A2) definem respectivamente as tensões normal e cisalhante, segundo o plano A.

$$\sigma_n = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dN}{dA} \quad (A1)$$

$$\tau = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dT}{dA} \quad (A2)$$

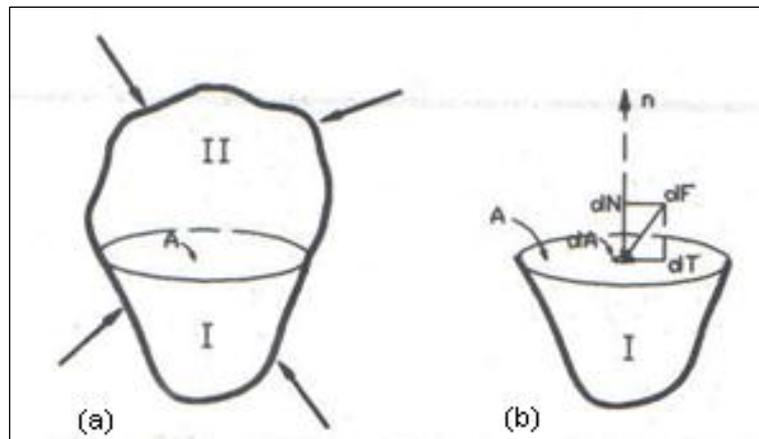


Figura 1A - (a) Condições de equilíbrio no meio contínuo sujeito a forças externas; (b) decomposição de forças internas em uma área elementar dA . (Fonte: ORTIGÃO, 1993).

Decompondo dT segundo dois eixos coordenados x e y . Obtêm-se as equações de cisalhamento (3A) e (4A) correspondentes aos eixos x e y do plano.

$$\tau_x = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dT_x}{dA} \quad (3A)$$

$$\tau_y = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dT_y}{dA} \quad (4A)$$

Segundo ORTIGÃO (1993), o objetivo é conhecer o estado de tensões em qualquer ponto do sólido, o que implica conhecer as equações (1A) e (2A) em qualquer plano que passe pelo ponto de aplicação. A figura 2A apresenta o estado de tensão se forem conhecidas suas componentes segundo os eixos x, y e z, mutuamente ortogonais.

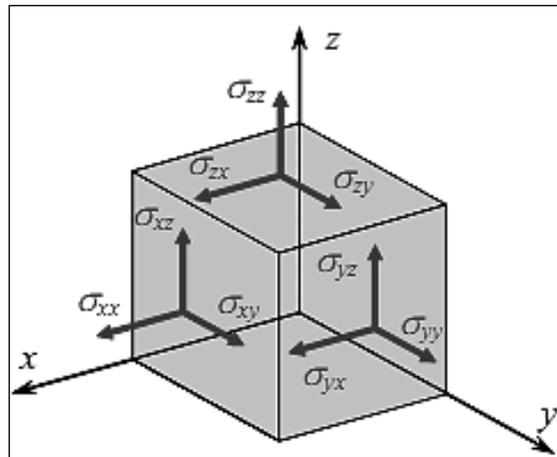


Figura 2A - Estado triaxial de tensão (Fonte: BRAGA, 2007).

Para cada tensão normal estão associadas duas tensões cisalhantes. Então para um plano tridimensional têm-se um total de nove componentes de tensões descritas na matriz 5A (NEDDERMAN, 1992).

$$|\sigma| = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} \quad (5A)$$

A grandeza σ_x é chamada tensão normal e as grandezas τ_{xy} e τ_{xz} são chamadas tensões tangenciais (cisalhantes). Nota-se que nestas grandezas os índices têm o seguinte significado: τ_{ij} onde, i = indica o plano normal (tensão normal) e j = indica o eixo (sentido) da tensão tangencial, (NEDDERMAN, 1992). No (SI) σ é determinado em Pascal (Pa), onde $\text{Pa} = 1 \text{ N.m}^{-2}$. Na condição de equilíbrio: $\tau_{xy} = \tau_{yx}$; $\tau_{yz} = \tau_{zy}$; $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ (TEOREMA DE CAUCHI).

2.2 Círculo de Mohr

O círculo de tensões de Mohr é uma representação gráfica do estado de tensão em um ponto do meio contínuo (porção de material cujo comportamento se pode descrever adequadamente por um modelo matemático), extremamente útil para todos os problemas de tensão e deformação. Na figura 3A (prisma de base retangular) as forças atuantes em cada face do triângulo, estão em equilíbrio (resultante das forças nula) em cada direção transformada.

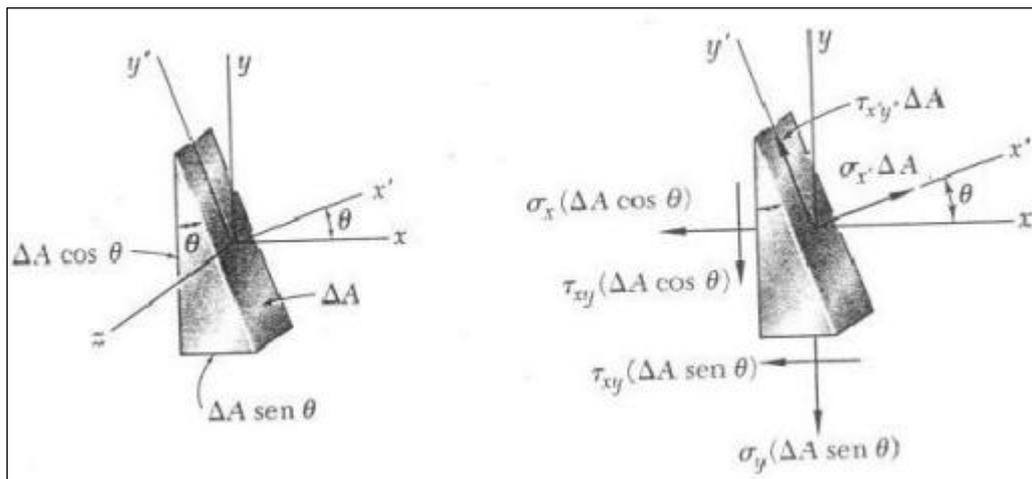


Figura 3A - Representação das tensões num sistema rotacionado de um ângulo θ

(Fonte: <http://www.fem.unicamp.br>).

Da condição de equilíbrio nos eixos x ($\sum F_x' = 0$) e y ($\sum F_y' = 0$), se obtém as equações (6A) e (7A), que relacionam as tensões normal e tangencial, respectivamente de um sistema $xy \rightarrow x'y'$, rotacionado de um ângulo θ qualquer.

$$\sigma_{x'} \Delta A - \left[\begin{array}{l} \sigma_x (\Delta A \cos \theta) \cos \theta + \tau_{xy} (\Delta A \cos \theta) \sin \theta + \sigma_y (\Delta A \sin \theta) \sin \theta + \\ \tau_{xy} (\Delta A \sin \theta) \cos \theta \end{array} \right] = 0 \quad (6A)$$

$$\tau_{x'y'} \Delta A - \left[\begin{array}{l} \sigma_x (\Delta A \cos \theta) \sin \theta - \tau_{xy} (\Delta A \cos \theta) \cos \theta + \tau_{xy} (\Delta A \sin \theta) \sin \theta - \\ \sigma_y (\Delta A \sin \theta) \cos \theta \end{array} \right] = 0 \quad (7A)$$

Resolvendo a equação 6A.

$$\sigma_{x'} - \left[\sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \right] = 0 \quad (8A)$$

Aplicando as relações trigonométricas abaixo na equação 8A se obtém a equação 9A.

$$\text{sen}2\theta = 2\text{cos}\theta\text{sen}\theta$$

$$\text{sen}^2 = \frac{1 - \text{cos}2\theta}{2}$$

$$\text{cos}^2\theta = \frac{1 + \text{cos}2\theta}{2}$$

$$\sigma'_x = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \text{cos}2\theta + \tau_{xy} \text{sen}2\theta \quad (8A)$$

Resolvendo a equação 7A.

$$\tau_{xy'} - [\sigma_y \text{sen}\theta \text{cos}\theta - \sigma_x \text{cos}\theta \text{sen}\theta - 2\tau_{xy} \text{sen}^2\theta + 2\tau_{xy} \text{cos}^2\theta -] = 0 \quad (10A)$$

Aplicando as mesmas relações trigonométricas na equação 10A se obtém a equação 11A.

$$\tau_{xy'} = - \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \text{sen}2\theta + \tau_{xy} \text{cos}2\theta \quad (11A)$$

Agora se derivando a equação 8A em função de θ se obtém a equação (12A).

$$\frac{d\sigma'_x}{d\theta} + \frac{d}{d\theta} \left[\sigma'_x = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \text{cos}2\theta + \tau_{xy} \text{sen}2\theta \right]$$

$$(\sigma_x - \sigma_y) \text{sen}2\theta = 2\tau_{xy} \text{cos}2\theta$$

$$\text{tg}2\theta = \frac{\tau_{xy}}{\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}} \quad (12A)$$

Então para se determinar um máximo ou um mínimo na equação 8A, um ângulo $\theta = \theta_{p1}$ (que pode ser obtido resolvendo-se a expressão) deverá ser usado na rotação do sistema de coordenadas (transformação). As expressões do seno e do cosseno de θ associadas à equação 12A podem ser facilmente obtidas se interpretarmos esta equação como na figura abaixo. Isto é, a equação 12A dá a inclinação da tangente ao ângulo $2\theta_{p1}$ num sistema τ - σ .

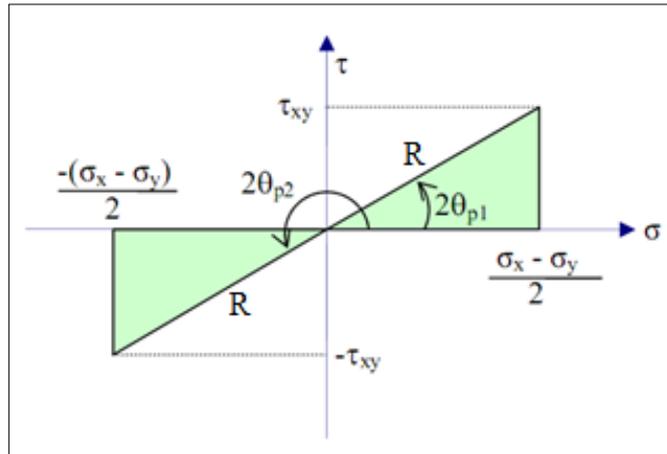


Figura 4A - Representação da tangente dos ângulos $2\theta_{p1}$ e $2\theta_{p2}$ num sistema τ - σ , adaptado
(Fonte: <http://www.fem.unicamp.br>).

Sendo seno e cosseno determinados por:

$$\operatorname{sen}2\theta_{p1} = \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}}$$

$$\operatorname{cos}2\theta_{p1} = \frac{\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}}$$

$$\operatorname{sen}2\theta_{p2} = \frac{-\tau_{xy}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}}$$

$$\operatorname{cos}2\theta_{p2} = \frac{-\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}}$$

Como o raio é definido por:

$$R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Ambos os ângulos, θ_{p1} e θ_{p2} , caracterizam a mesma declividade no gráfico da figura 4A, estando defasados de 180° , ou seja, $2\theta_{p2} = 2\theta_{p1} + 180^\circ$. Substituindo-se, primeiramente, as expressões referentes a θ_{p1} na equação 8A, obtém-se a equação 13A.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}} \right) + \tau_{xy} \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}}$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + R \quad (12A)$$

Agora substituindo as expressões referentes a θ_{p2} na equação 8A, obtém-se a equação 14A.

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}} \right) - \tau_{xy} \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - R \quad (13A)$$

Sendo a equação 14A a tensão média.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \quad (14A)$$

Apresentando as equações 12A e 13A na forma compacta se obtém a equação 15A.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{1,2} = \sigma_m \pm R \quad (14A)$$

A Figura 5A mostra um elemento de massa confinado num recipiente com os seguintes pressupostos: altura de enchimento infinito, sem atrito nas paredes internas. No sentido vertical, tensão normal positiva ($\sigma_y > 0$, a tensão de compressão) é exercida sobre a massa.

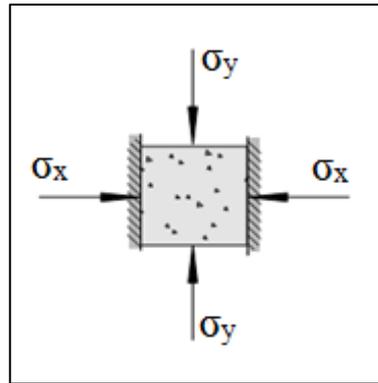


Figura 5A. Massa granular confinada. (Fonte: SHULZE, 2007)

Segundo Nascimento (2005), A tensão, σ_x resulta da ação de σ_y , sendo a tensão resultante horizontal, inferior que a tensão vertical exercida sobre a massa. A relação entre σ_x e σ_y , é o parâmetro K (equação 15A).

$$k = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad (15A)$$

Tanto a equação 14A como as relações trigonométricas senos e cossenos de θ são equações de um círculo num sistema coordenado retangular σ - τ . Na equação 14A, o centro do círculo é dado por σ_m , e o seu raio R. As tensões principais localizam-se nos pontos de intersecção do círculo com o eixo das abscissas, ou seja, implicando em tensões cisalhantes nulas, como previsto anteriormente. Isto é ilustrado na figura 6A.

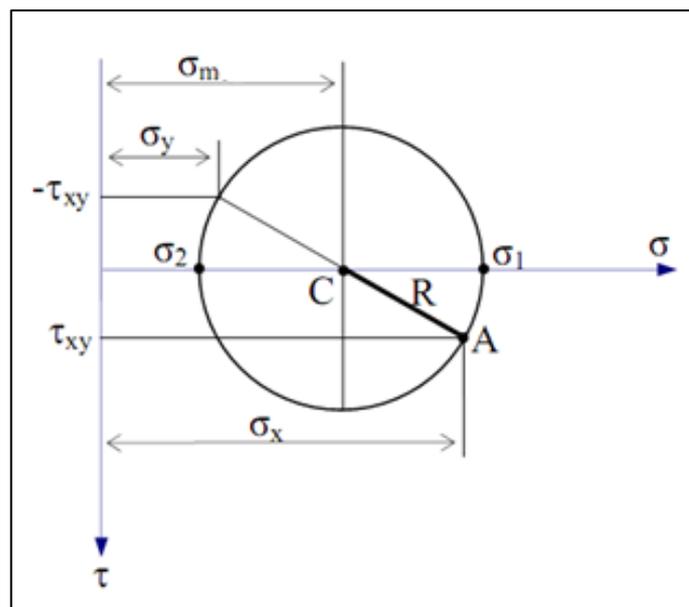


Figura 6A - Representação do círculo de tensões de Mohr num sistema τ - σ , adaptado (Fonte: <http://www.fem.unicamp.br>).

Os infinitos pontos que compõem o círculo traçado no sistema σ - τ representam todas as possíveis transformações de um estado de tensões. Considerando o estado de tensões representado pelo ponto A na figura 6A e outro qualquer estado resultante de uma transformação (giro de um ângulo θ) estaria localizado a 2θ , a partir da direção CA, já que as relações trigonométricas observadas nas equações de transformação devem ser para o dobro do ângulo. Na dedução das equações, foi estipulado que o ângulo θ cresça no sentido anti-horário, e assim deve ser observado no círculo de Mohr.

APÊNDICE II

Quadros com os resultados das tensões de consolidação e cisalhamento referente aos ensaios de cisalhamento material/material para a LV submetida a tensão inicial consolidação de 0,3 kPa

Tabela 1A (1,0% de umidade)

Tensões (σ)	m(kg)	Tensão medida [kg]					Média	[%]
$\sigma \rightarrow$ pré	0,2	0,25	0,22	0,18	0,22	0,23	0,22	80%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,16	0,21	0,18	0,19	0,2	0,21	0,198	
$\sigma \rightarrow$ pré	0,2	0,21	0,23	0,23	0,22	0,24	0,226	60%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,12	0,19	0,17	0,2	0,18	0,19	0,186	
$\sigma \rightarrow$ pré	0,2	0,23	0,21	0,18	0,2	0,21	0,206	40%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,08	0,15	0,16	0,18	0,15	0,16	0,16	

Tabela 2A (7,0% de umidade)

Tensões (σ)	m(kg)	Tensão medida [kg]					Média	[%]
$\sigma \rightarrow$ pré	0,2	0,19	0,21	0,23	0,24	0,22	0,218	80%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,16	0,19	0,2	0,18	0,19	0,2	0,192	
$\sigma \rightarrow$ pré	0,2	0,21	0,22	0,28	0,18	0,19	0,216	60%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,12	0,18	0,17	0,17	0,19	0,19	0,18	
$\sigma \rightarrow$ pré	0,2	0,18	0,19	0,19	0,22	0,2	0,196	40%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,08	0,12	0,15	0,16	0,15	0,16	0,148	

Tabela 3A (10,0% de umidade)

Tensões (σ)	m(kg)	Tensão medida [kg]					Média	[%]
$\sigma \rightarrow$ pré	0,2	0,2	0,21	0,2	0,23	0,21	0,21	80%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,16	0,17	0,18	0,18	0,2	0,21	0,188	
$\sigma \rightarrow$ pré	0,2	0,21	0,2	0,2	0,19	0,18	0,196	60%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,12	0,16	0,17	0,15	0,18	0,19	0,17	
$\sigma \rightarrow$ pré	0,2	0,2	0,21	0,19	0,17	0,19	0,192	40%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,08	0,12	0,15	0,13	0,16	0,14	0,14	

Tabela 4A (13,0% de umidade)

Tensões (σ)	m(kg)	Tensão medida [kg]					Média	[%]
$\sigma \rightarrow$ pré	0,2	0,2	0,21	0,19	0,19	0,22	0,202	80%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,16	0,18	0,19	0,17	0,2	0,19	0,186	
$\sigma \rightarrow$ pré	0,2	0,22	0,23	0,22	0,21	0,21	0,218	60%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,12	0,16	0,17	0,16	0,18	0,16	0,166	
$\sigma \rightarrow$ pré	0,2	0,23	0,19	0,18	0,17	0,17	0,188	40%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,08	0,14	0,13	0,14	0,15	0,12	0,136	

Quadros com os resultados das tensões de consolidação e cisalhamento referente aos ensaios de cisalhamento material/material para a LV submetida a tensão inicial consolidação de 2,1 kPa

Tabela 1B (1,0% de umidade)

Tensões (σ)	m(kg)	Tensão medida [kg]					Média	[%]
$\sigma \rightarrow$ pré	1,5	1,47	1,47	1,4	1,41	1,42	1,434	80%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	1,2	1,35	1,49	1,22	1,28	1,19	1,306	
$\sigma \rightarrow$ pré	1,5	1,43	1,48	1,5	1,48	1,38	1,454	60%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,9	1,08	1,34	1,19	1,18	1,12	1,182	
$\sigma \rightarrow$ pré	1,5	1,47	1,45	1,49	1,37	1,41	1,438	40%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,6	0,98	1,02	0,94	1,01	1,08	1,01	

Tabela 2B (7,0% de umidade)

Tensões (σ)	m(kg)	Tensão medida [kg]					Média	[%]
$\sigma \rightarrow$ pré	1,5	1,45	1,48	1,53	1,56	1,47	1,498	80%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	1,2	1,43	1,32	1,39	1,41	1,37	1,384	
$\sigma \rightarrow$ pré	1,5	1,55	1,58	1,48	1,45	1,48	1,508	60%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,9	1,09	1,06	1,07	1,11	1,04	1,074	
$\sigma \rightarrow$ pré	1,5	1,48	1,54	1,56	1,49	1,51	1,516	40%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,6	0,87	0,91	0,97	0,96	0,99	0,94	

Tabela 3B (10,0% de umidade)

Tensões (σ)	m(kg)	Tensão medida [kg]					Média	[%]
$\sigma \rightarrow$ pré	1,5	1,62	1,62	1,64	1,61	1,63	1,624	80%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	1,2	1,48	1,46	1,39	1,47	1,41	1,442	
$\sigma \rightarrow$ pré	1,5	1,67	1,56	1,61	1,72	1,59	1,63	60%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,9	1,27	1,18	1,22	1,3	1,23	1,24	
$\sigma \rightarrow$ pré	1,5	1,72	1,56	1,6	1,52	1,62	1,604	40%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,6	1,04	0,98	0,92	0,88	0,94	0,952	

Tabela 4B (13,0% de umidade)

Tensões (σ)	m(kg)	Tensão medida [kg]					Média	[%]
$\sigma \rightarrow$ pré	1,5	1,61	1,63	1,62	1,64	1,65	1,63	80%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	1,2	1,42	1,39	1,46	1,38	1,47	1,424	
$\sigma \rightarrow$ pré	1,5	1,72	1,62	1,69	1,65	1,66	1,668	60%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,9	1,05	1,09	1,08	1,11	0,98	1,062	
$\sigma \rightarrow$ pré	1,5	1,66	1,68	1,64	1,66	1,62	1,652	40%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	0,6	0,9	0,85	0,82	0,86	0,98	0,882	

Quadros com os resultados das tensões de consolidação e cisalhamento referente aos ensaios de cisalhamento material/material para a LV submetida a tensão inicial consolidação de 4,1 kPa

Tabela 1C (1,0% de umidade)

Tensão (σ)	m(kg)	Tensão média [kg]					Média	[%]
$\sigma \rightarrow$ pré	3	2,44	2,45	2,51	2,48	2,49	2,474	80%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	2,4	2,24	2,26	2,22	2,26	2,21	2,238	
$\sigma \rightarrow$ pré	3	2,52	2,48	2,54	2,45	2,49	2,496	60%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	1,8	1,78	1,75	1,69	1,74	1,7	1,732	
$\sigma \rightarrow$ pré	3	2,54	2,48	2,51	2,53	2,56	2,524	40%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	1,2	1,59	1,52	1,56	1,57	1,54	1,556	

Tabela 2C (7,0% de umidade)

Tensão (σ)	m(kg)	Tensão média [kg]					Média	[%]
$\sigma \rightarrow$ pré	3	2,64	2,68	2,72	2,71	2,74	2,698	80%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	2,4	2,34	2,39	2,41	2,33	2,44	2,382	
$\sigma \rightarrow$ pré	3	2,75	2,78	2,79	2,68	2,69	2,738	60%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	1,8	1,74	1,76	1,79	1,81	1,84	1,788	
$\sigma \rightarrow$ pré	3	2,69	2,64	2,71	2,63	2,65	2,664	40%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	1,2	1,42	1,46	1,48	1,49	1,39	1,448	

Tabela 3C (10,0% de umidade)

Tensão (σ)	m(kg)	Tensão média [kg]					Média	[%]
$\sigma \rightarrow$ pré	3	2,78	2,8	2,9	2,86	2,79	2,826	80%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	2,4	2,65	2,63	2,73	2,69	2,68	2,676	
$\sigma \rightarrow$ pré	3	2,88	2,83	2,81	2,85	2,89	2,852	60%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	1,8	2,04	1,98	2,08	2,05	1,96	2,022	
$\sigma \rightarrow$ pré	3	2,92	2,89	2,86	2,97	2,81	2,89	40%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	1,2	1,65	1,71	1,62	1,64	1,67	1,658	

Tabela 4C (13,0% de umidade)

Tensão (σ)	m(kg)	Tensão média [kg]					Média	[%]
$\sigma \rightarrow$ pré	3	2,96	2,98	3,03	3,01	2,99	2,994	80%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	2,4	2,71	2,69	2,67	2,72	2,63	2,684	
$\sigma \rightarrow$ pré	3	2,98	2,98	2,94	2,96	3,02	2,976	60%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	1,8	2,29	2,19	2,14	2,21	2,24	2,214	
$\sigma \rightarrow$ pré	3	3,02	2,99	3,03	3,02	2,98	3,008	40%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	1,2	1,49	1,48	1,57	1,55	1,52	1,522	

Quadros com os resultados das tensões de consolidação e cisalhamento referente aos ensaios de cisalhamento material/material para a LV submetida a tensão inicial consolidação de 8,3 kPa

Tabela 1D (1,0% de umidade)

Tensão (σ)	m(kg)	Tensão média [kg]					Média	[%]
$\sigma \rightarrow$ pré	6	4,89	4,79	4,83	4,88	4,87	4,852	80%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	4,8	4,13	4,15	4,17	4,16	4,18	4,158	
$\sigma \rightarrow$ pré	6	4,98	4,9	4,88	4,93	4,99	4,936	60%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	3,6	3,1	3,09	3,08	3,11	3,06	3,088	
$\sigma \rightarrow$ pré	6	4,81	4,86	4,82	4,76	4,72	4,794	40%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	2,4	2,47	2,54	2,58	2,59	2,65	2,566	

Tabela 2D (7,0% de umidade)

Tensão (σ)	m(kg)	Tensão média [kg]					Média	[%]
$\sigma \rightarrow$ pré	6	5,37	5,35	5,27	5,26	5,33	5,316	80%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	4,8	4,72	4,67	4,74	4,72	4,65	4,7	
$\sigma \rightarrow$ pré	6	5,29	5,21	5,23	5,17	5,19	5,218	60%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	3,6	3,35	3,38	3,43	3,42	3,46	3,408	
$\sigma \rightarrow$ pré	6	5,25	5,34	5,31	5,32	5,29	5,302	40%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	2,4	2,78	2,73	2,79	2,78	2,84	2,784	

Tabela 3D (10,0% de umidade)

Tensão (σ)	m(kg)	Tensão média [kg]					Média	[%]
$\sigma \rightarrow$ pré	6	5,48	5,49	5,41	5,39	5,41	5,436	80%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	4,8	4,88	4,83	4,91	4,89	4,94	4,89	
$\sigma \rightarrow$ pré	6	5,54	5,48	5,53	5,49	5,51	5,51	60%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	3,6	3,93	3,92	4,01	3,97	3,94	3,954	
$\sigma \rightarrow$ pré	6	5,58	5,47	5,59	5,45	5,55	5,528	40%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	2,4	2,69	2,75	2,74	2,75	2,76	2,738	

Tabela 4D (13,0% de umidade)

Tensão (σ)	m(kg)	Tensão média [kg]					Média	[%]
$\sigma \rightarrow$ pré	6	5,6	5,68	5,56	5,66	5,71	5,642	80%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	4,8	5,07	5,02	5,12	5,09	5,02	5,064	
$\sigma \rightarrow$ pré	6	5,57	5,62	5,51	5,67	5,7	5,614	60%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	3,6	4,64	4,68	4,65	4,56	4,58	4,622	
$\sigma \rightarrow$ pré	6	5,67	5,59	5,55	5,73	5,58	5,624	40%
$\sigma \rightarrow$ cisalhante	2,4	2,68	2,53	2,59	2,55	2,69	2,608	

Quadros com os resultados das tensões de consolidação e cisalhamento referente aos ensaios de cisalhamento material/parede com aço para a LV.

Tabela 1E (1,0% de umidade)

Massas	1	2	3	4	5	Média
5kg	2,38	2,33	2,35	2,39	2,38	2,366
4kg	2,08	1,97	1,96	2,02	2,01	2,008
3kg	1,62	1,66	1,58	1,62	1,55	1,606
2kg	1,05	1,09	1,12	1,09	1,1	1,09
1kg	0,68	0,59	0,58	0,67	0,59	0,622
0,5kg	0,4	0,36	0,37	0,36	0,32	0,362

Tabela 2E (7,0% de umidade)

Massas	1	2	3	4	5	Média
5kg	2,5	2,52	2,48	2,5	2,49	2,498
4kg	2,1	2,1	2,08	2,12	2,09	2,098
3kg	1,6	1,62	1,61	1,59	1,6	1,604
2kg	1,16	1,14	1,14	1,09	1,16	1,138
1kg	0,63	0,63	0,61	0,64	0,62	0,626
0,5kg	0,37	0,42	0,36	0,37	0,36	0,376

Tabela 1D (10,0% de umidade)

Massas	1	2	3	4	5	Média
5kg	2,48	2,5	2,52	2,53	2,49	2,504
4kg	2,1	2,11	2,13	2,15	2,12	2,122
3kg	1,57	1,55	1,6	1,59	1,61	1,584
2kg	1,09	1,1	1,12	1,04	1,11	1,092
1kg	0,6	0,59	0,61	0,59	0,62	0,602
0,5kg	0,37	0,35	0,36	0,34	0,35	0,354

Tabela 1D (13,0% de umidade)

Massas	1	2	3	4	5	Média
5kg	2,61	2,6	2,6	2,58	2,62	2,602
4kg	2,22	2,23	2,2	2,19	2,21	2,21
3kg	1,68	1,66	1,63	1,62	1,64	1,646
2kg	1,18	1,19	1,18	1,2	1,19	1,188
1kg	0,69	0,67	0,65	0,64	0,63	0,656
0,5kg	0,41	0,39	0,38	0,41	0,39	0,396

Quadros com os resultados das tensões de consolidação e cisalhamento referente aos ensaios de cisalhamento material/parede com UHMW para a LV.

Tabela 1F (1,0% de umidade)

Massas	1	2	3	4	5	Média
5kg	2,12	2,22	2,25	2,23	2,22	2,208
4kg	1,79	1,84	1,92	1,91	1,88	1,868
3kg	1,38	1,42	1,47	1,44	1,39	1,42
2kg	0,91	0,97	0,98	0,99	0,98	0,966
1kg	0,51	0,55	0,51	0,5	0,6	0,534
0,5kg	0,28	0,3	0,31	0,32	0,31	0,304

Tabela 2F (7,0% de umidade)

Massas	1	2	3	4	5	Média
5kg	2,38	2,36	2,38	2,34	2,36	2,364
4kg	1,98	1,96	2,02	1,99	1,94	1,978
3kg	1,58	1,52	1,58	1,55	1,48	1,542
2kg	1,08	1,05	1,06	1,01	1,04	1,048
1kg	0,6	0,57	0,61	0,59	0,57	0,588
0,5kg	0,36	0,33	0,33	0,34	0,36	0,344

Tabela 3F (10,0% de umidade)

Massas	1	2	3	4	5	Média
5kg	2,37	2,38	2,4	2,38	2,41	2,388
4kg	1,96	1,92	1,94	2,01	1,98	1,962
3kg	1,39	1,45	1,41	1,49	1,47	1,442
2kg	1,04	1,05	0,95	1,03	1,01	1,016
1kg	0,5	0,52	0,53	0,55	0,54	0,528
0,5kg	0,28	0,31	0,34	0,3	0,31	0,308

Tabela 4F (13,0% de umidade)

Massas	1	2	3	4	5	Média
5kg	2,43	2,39	2,38	2,4	2,42	2,404
4kg	1,98	1,99	1,97	1,96	1,92	1,964
3kg	1,39	1,4	1,37	1,38	1,41	1,39
2kg	1,04	1,05	1,03	1,02	1,08	1,044
1kg	0,55	0,53	0,54	0,56	0,51	0,538
0,5kg	0,32	0,3	0,35	0,33	0,34	0,328

Quadros com os resultados das tensões de consolidação e cisalhamento referente aos ensaios de cisalhamento material/parede com acrílico para a LV.

Tabela 1G (1,0% de umidade)

Massas	1	2	3	4	5	Média
5kg	2,54	2,69	2,68	2,69	2,64	2,648
4kg	2,15	2,24	2,2	2,21	2,19	2,198
3kg	1,6	1,68	1,7	1,72	1,71	1,682
2kg	1,17	1,19	1,18	1,2	1,21	1,19
1kg	0,65	0,67	0,69	0,66	0,7	0,674
0,5kg	0,37	0,41	0,41	0,4	0,39	0,396

Tabela 2G (7,0% de umidade)

Massas	1	2	3	4	5	Média
5kg	2,34	2,37	2,39	2,38	2,32	2,36
4kg	2,15	2,21	2,17	2,22	2,17	2,184
3kg	1,6	1,71	1,64	1,67	1,67	1,658
2kg	1,17	1,21	1,22	1,15	1,19	1,197
1kg	0,65	0,62	0,68	0,63	0,65	0,646
0,5kg	0,37	0,39	0,34	0,38	0,41	0,378

Tabela 3G (10,0% de umidade)

Massas	1	2	3	4	5	Média
5kg	2,32	2,38	2,33	2,35	2,32	2,34
4kg	2,17	2,19	2,13	2,07	2,14	2,14
3kg	1,69	1,73	1,66	1,62	1,7	1,68
2kg	1,15	1,23	1,12	1,19	1,16	1,17
1kg	0,64	0,69	0,63	0,66	0,65	0,654
0,5kg	0,4	0,4	0,37	0,41	0,45	0,406

Tabela 4G (13,0% de umidade)

Massas	1	2	3	4	5	Média
5kg	2,32	2,34	2,39	2,35	2,32	2,344
4kg	2,01	2,1	2,2	2,19	2,19	2,138
3kg	1,63	1,7	1,67	1,64	1,62	1,652
2kg	1,1	1,2	1,11	1,13	1,15	1,138
1kg	0,64	0,71	0,61	0,65	0,68	0,658
0,5kg	0,38	0,41	0,4	0,35	0,42	0,392

APÊNDICE III**ESCOAMENTO DA LV NOS SILOS MODELOS**

As figuras 1B, 2B, 3B, 4B e 5B ilustram o escoamento da LV a 1% de umidade.

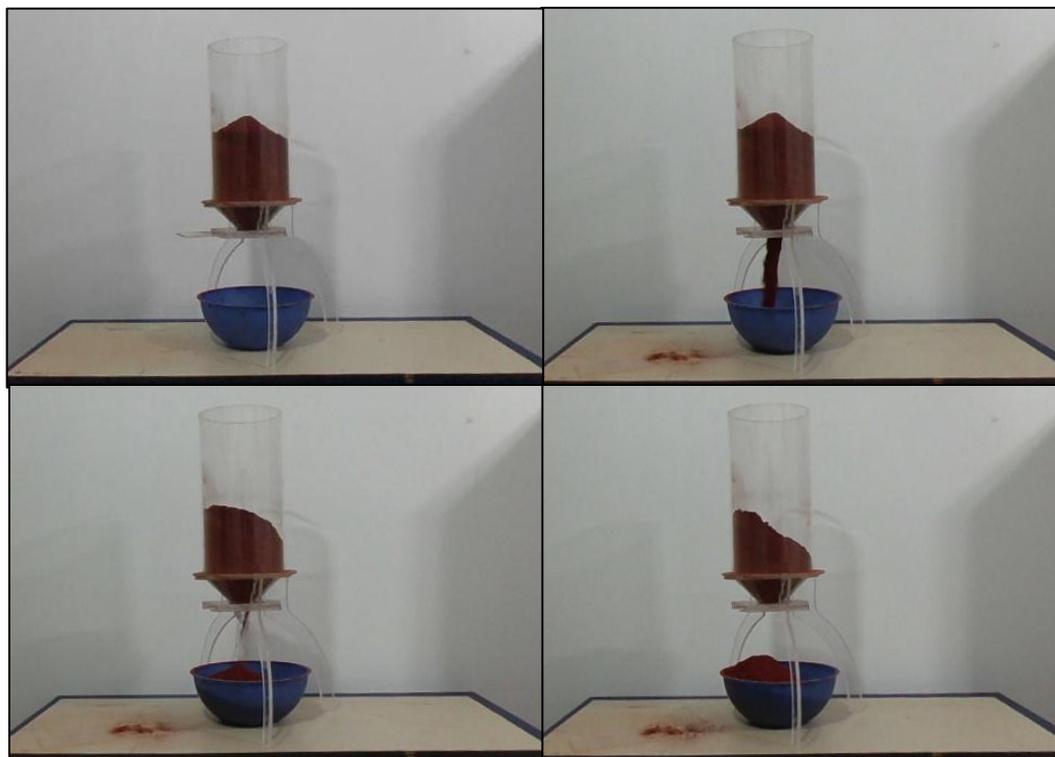


Figura 1B – Escoamento da LV no silo 1.

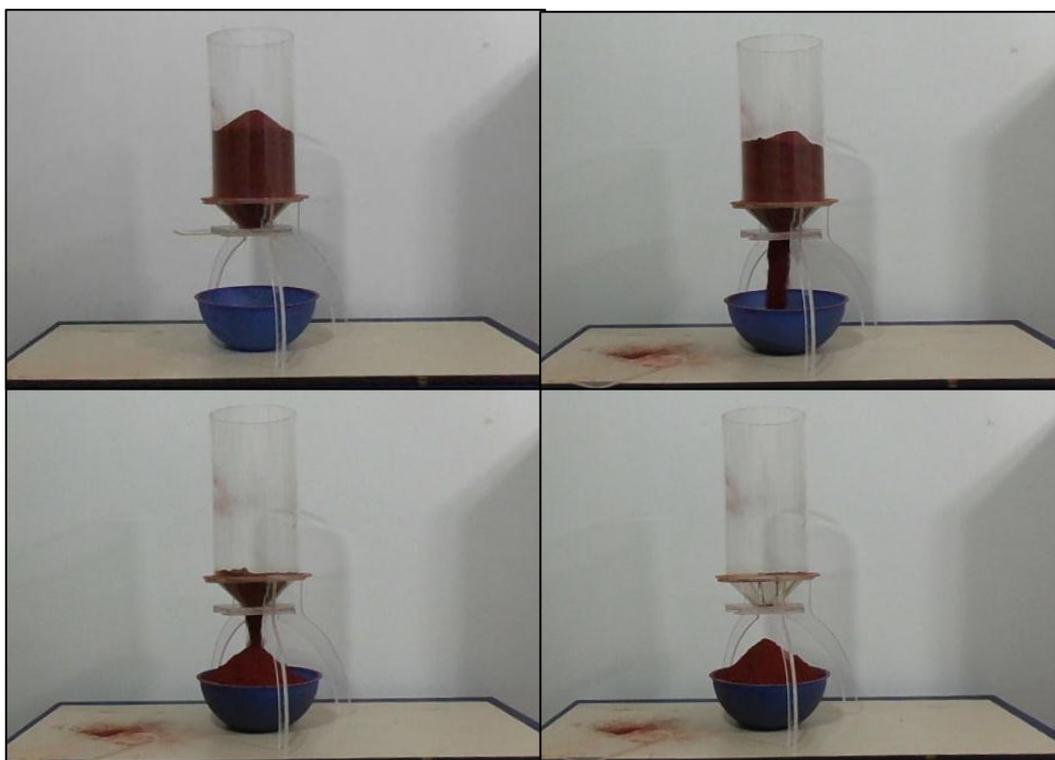


Figura 2B – Escoamento da LV no silo 2.

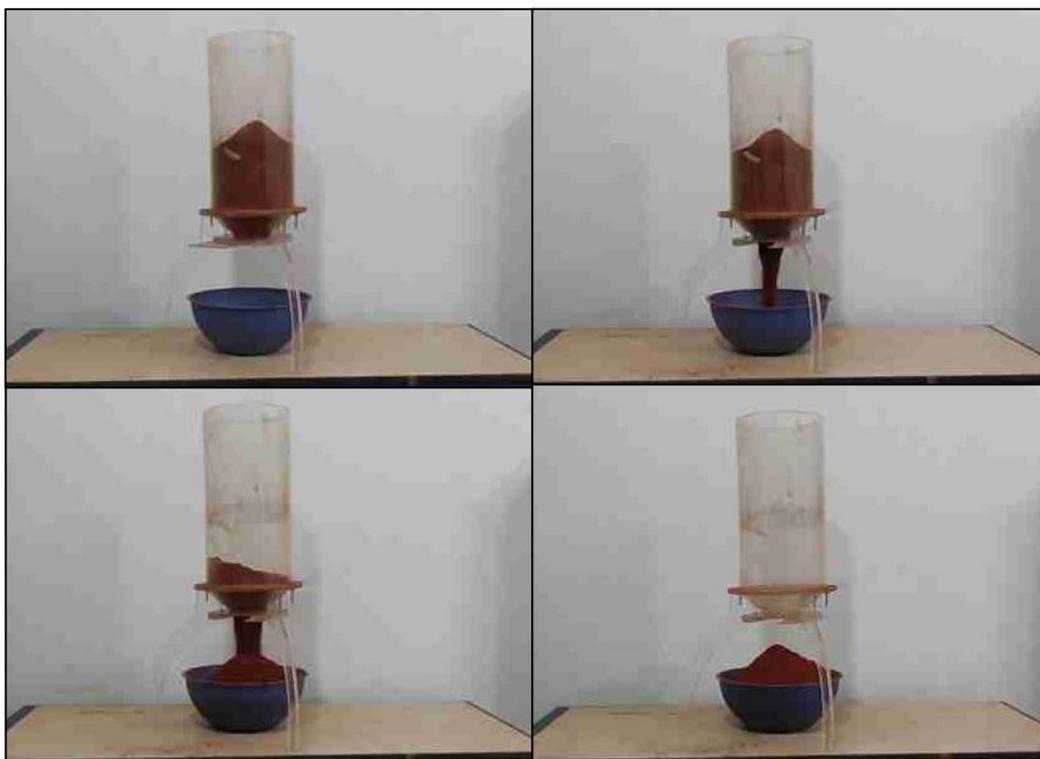


Figura 3B – escoamento da LV no silo 3.

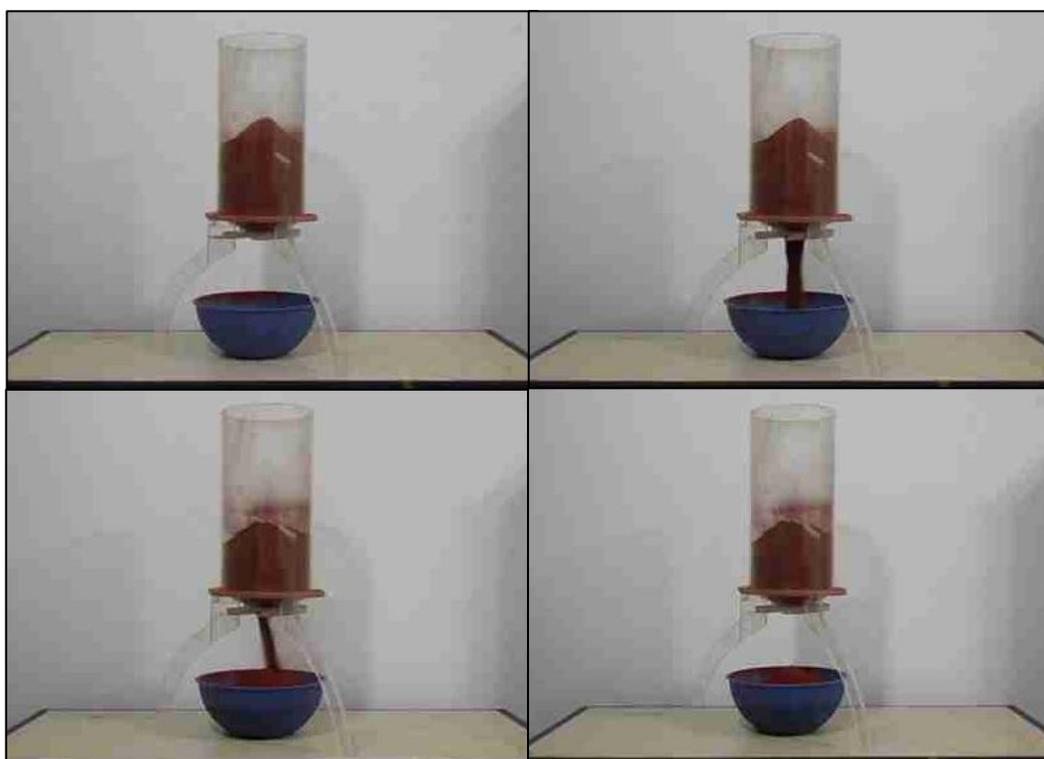


Figura 4B – escoamento da LV no silo 4.

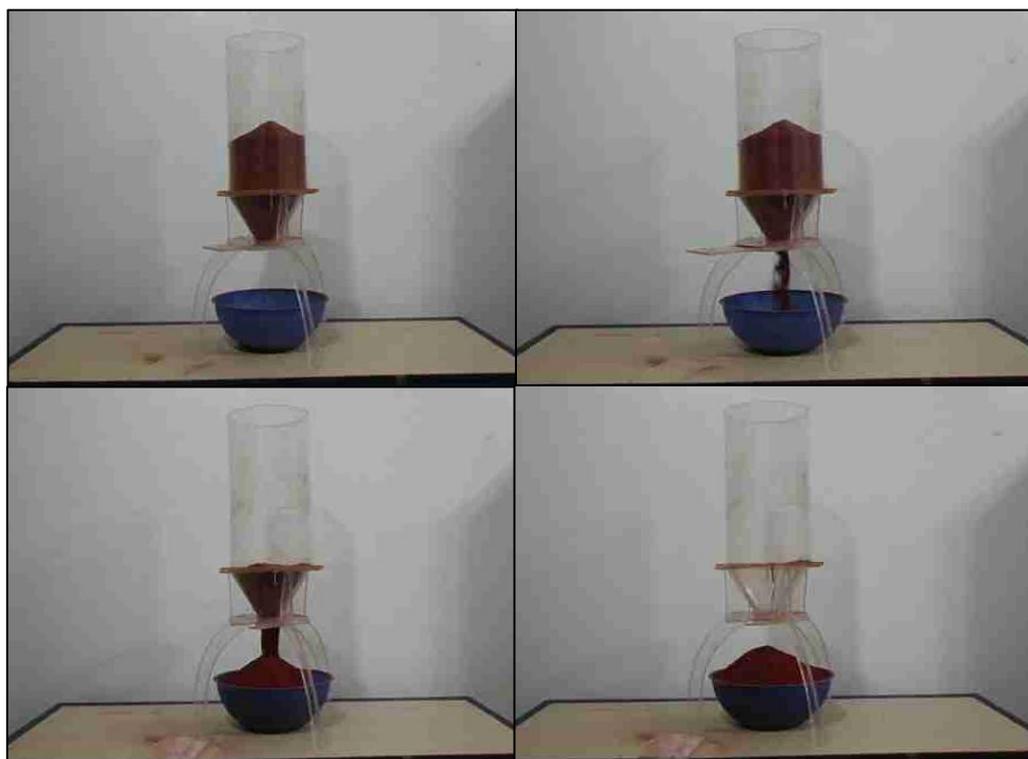


Figura 5B – escoamento da LV no silo 5.

As figuras 1C, 2C, 3C, 4C e 5C ilustram o escoamento da LV a 7% de umidade.

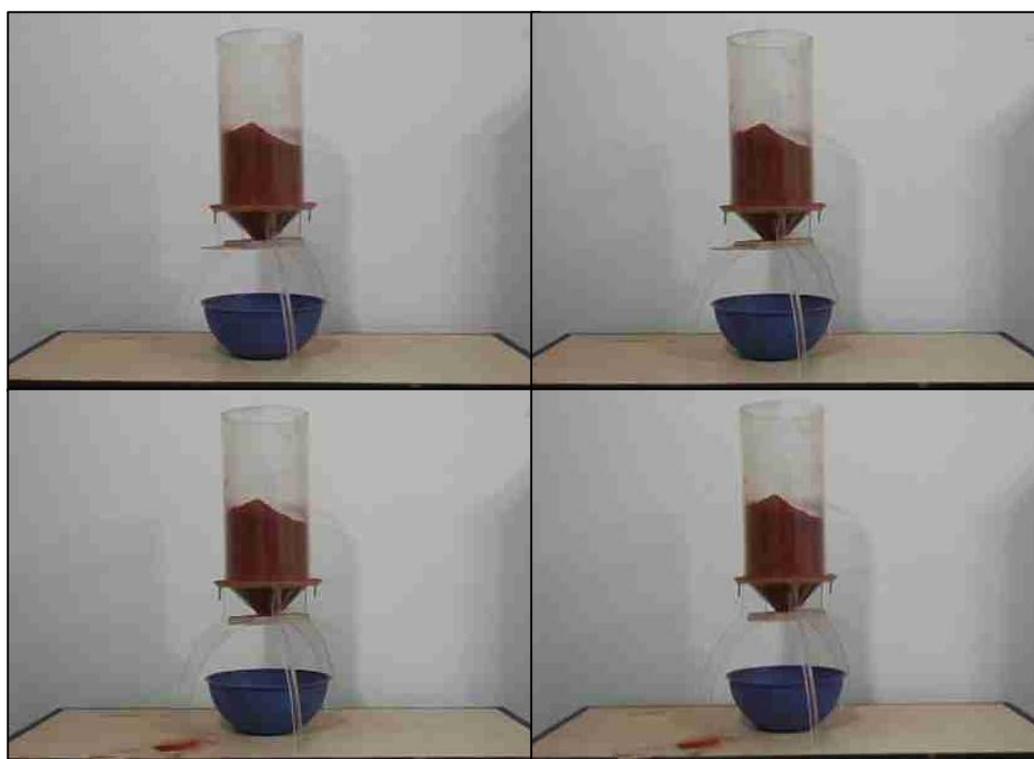


Figura 1C – escoamento da LV no silo 1.

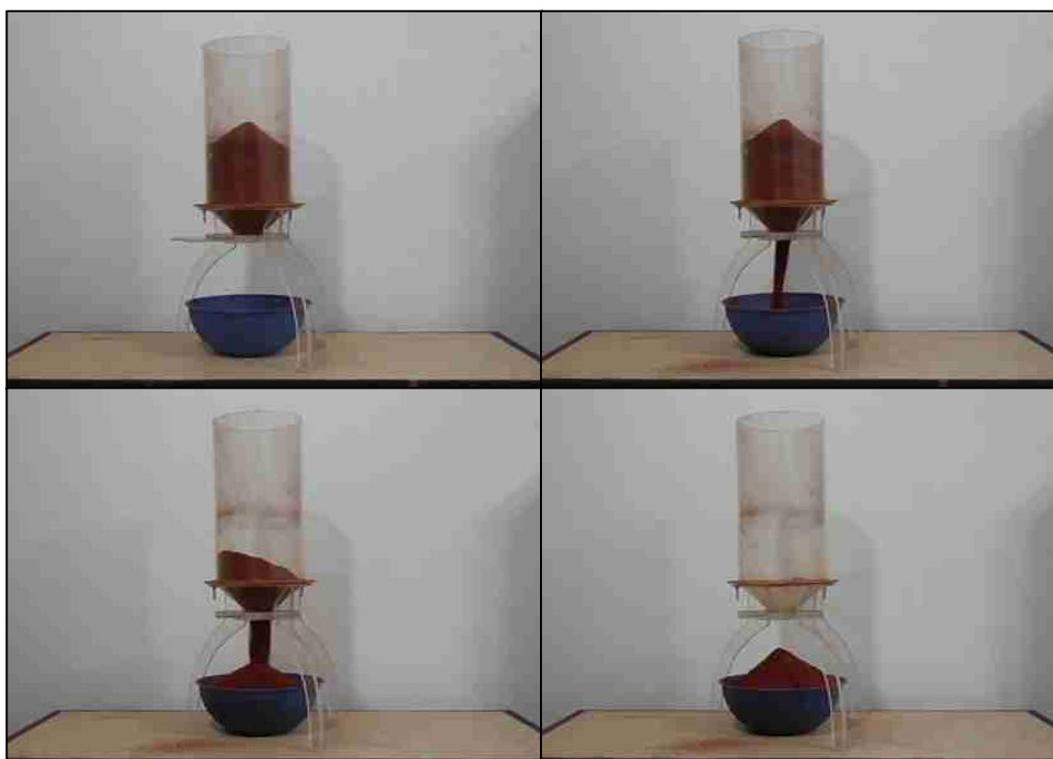


Figura 2C – Escoamento da LV no silo 2.

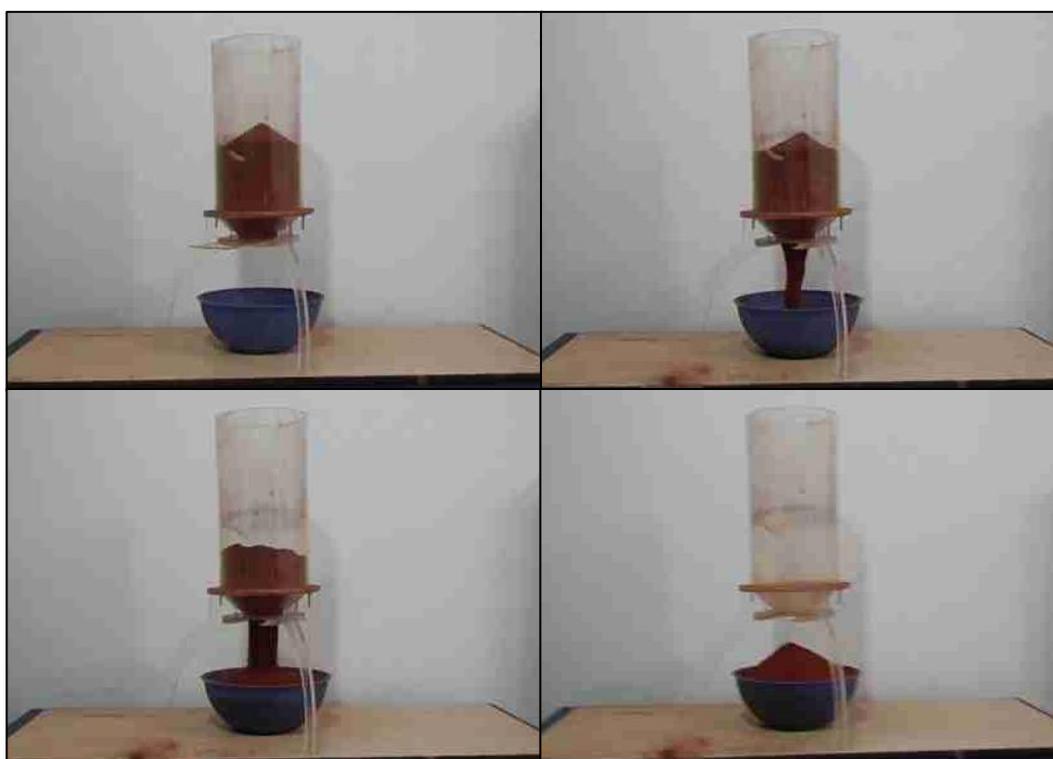


Figura 3C – Escoamento da LV no silo 3.

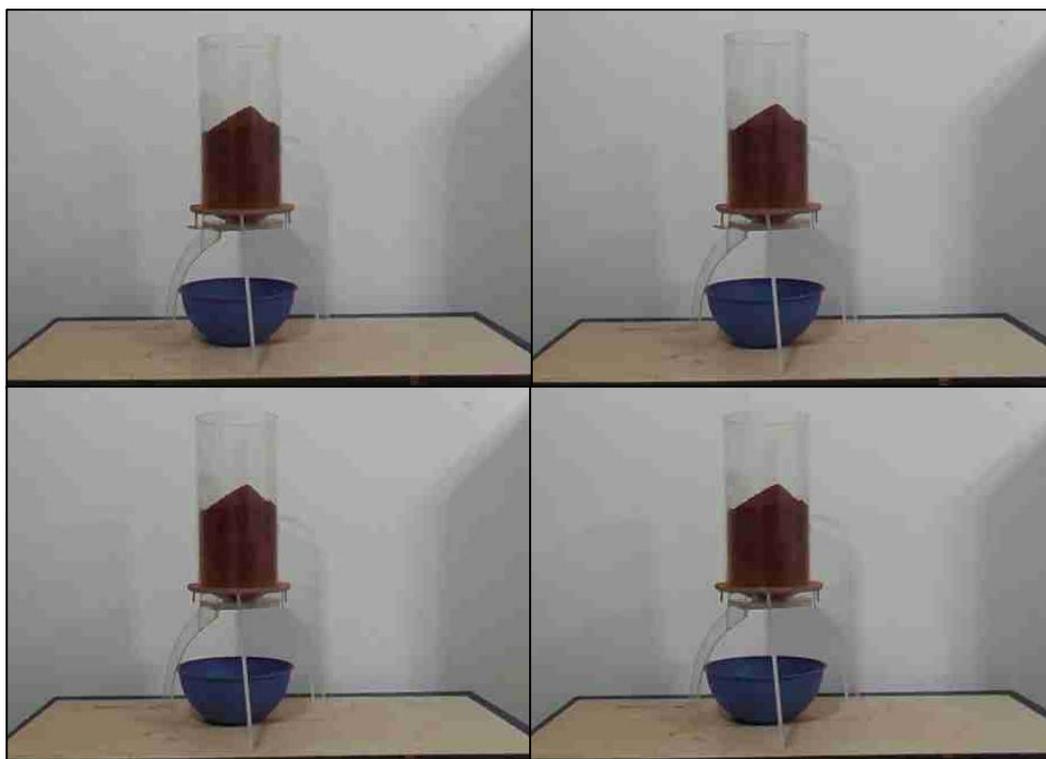


Figura 4C – escoamento da LV no silo 4.

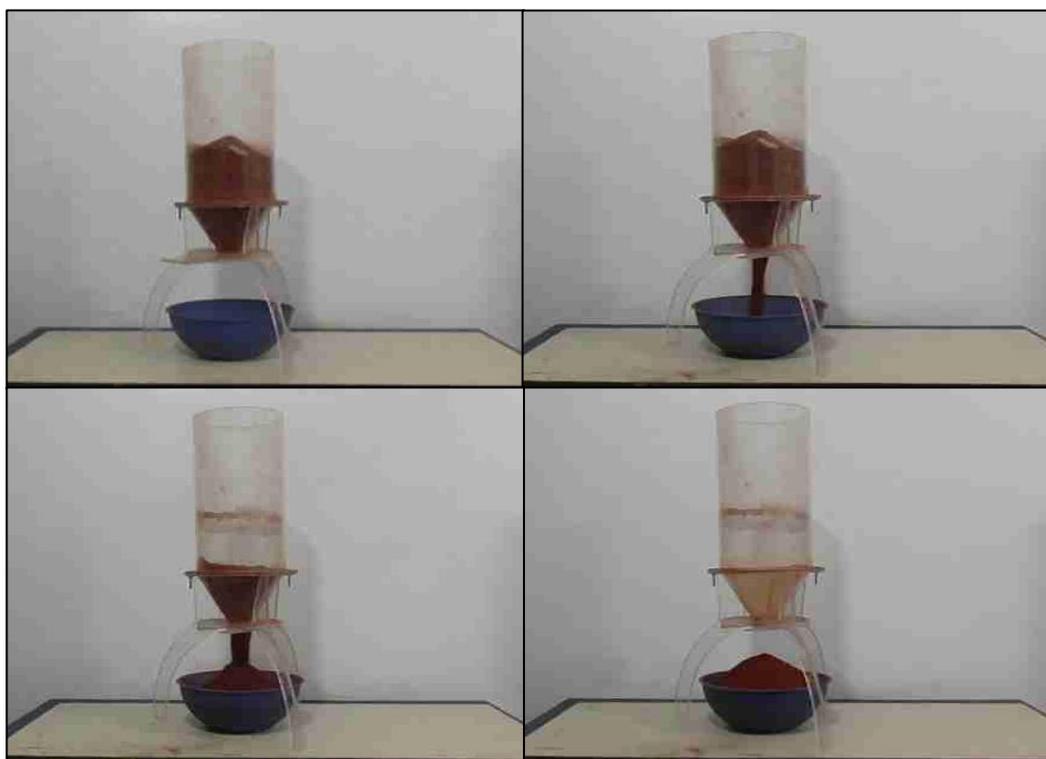


Figura 5C – escoamento da LV no silo 5.

As figuras 1D, 2D, 3D, 4D e 5D ilustram o escoamento da LV a 13% de umidade.

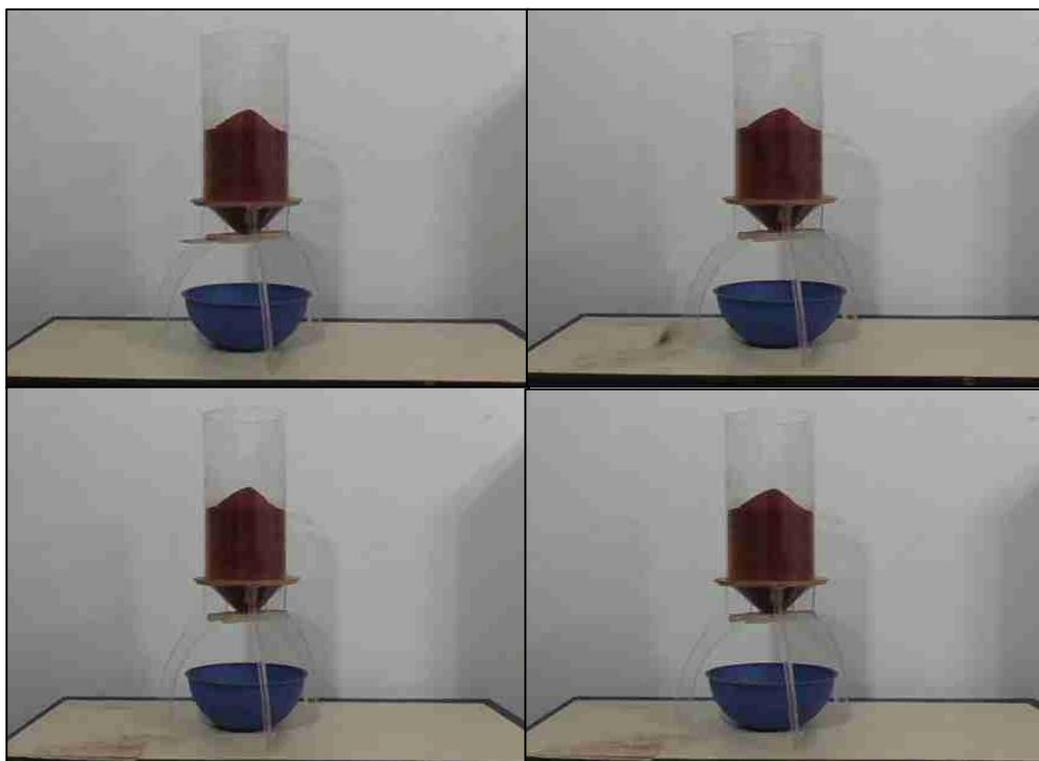


Figura 1D – Escoamento da LV no silo 1.



Figura 2D – Escoamento da LV no silo 2.

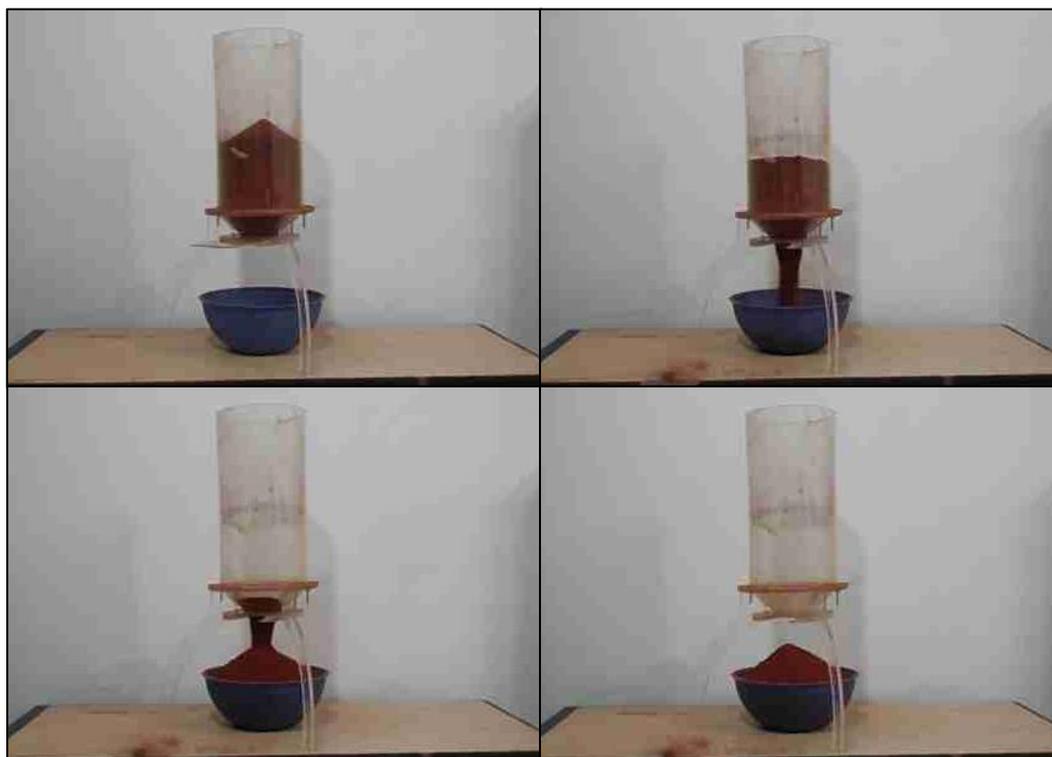


Figura 3D – Escoamento da LV no silo 3.

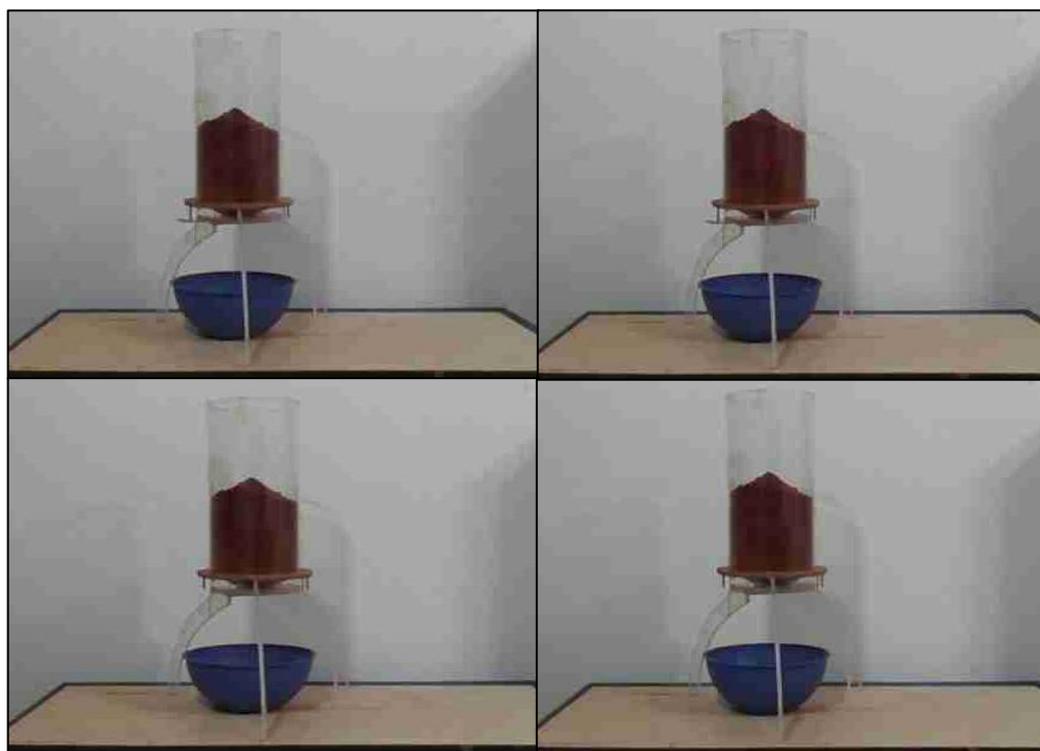


Figura 4D – Escoamento da LV no silo 4.

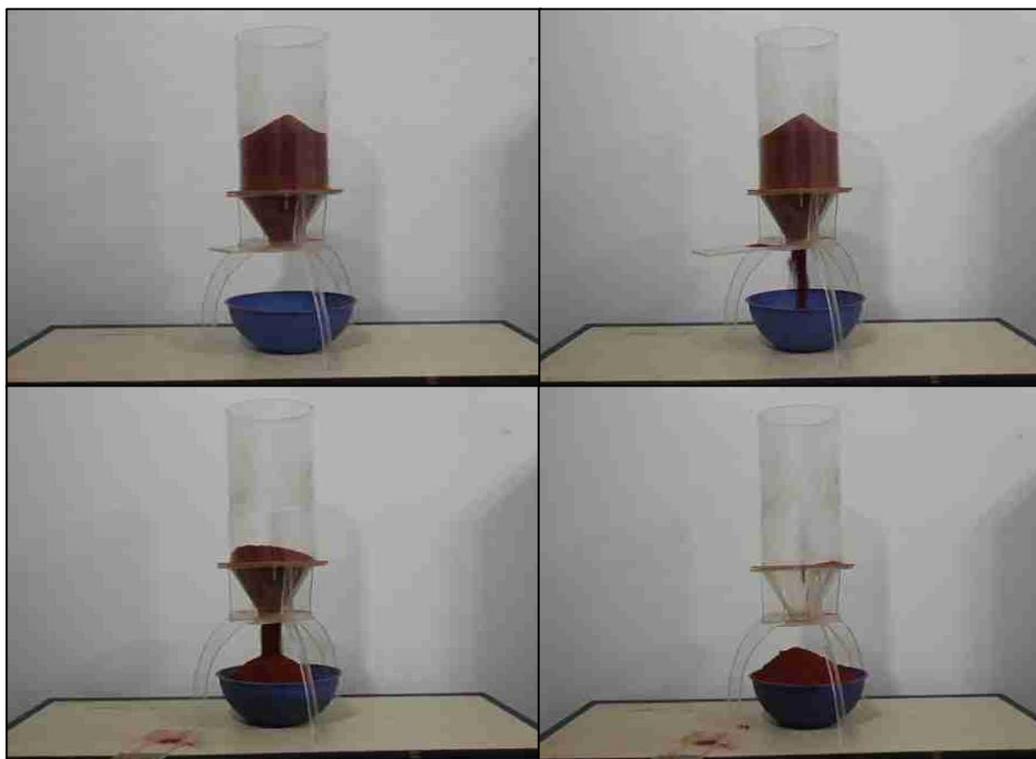


Figura 5D – Escoamento da LV no silo 5.