

ANTONIO CARLOS STRABELLI JUNIOR

Estudo de sistema auxiliar de descarga de silos de biomassa

Antonio Carlos Strabelli Junior

Estudo de sistema auxiliar de descarga de silos de biomassa

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Me. Everton Coelho de Medeiros

S894e	Strabelli Junior, Antonio Carlos Estudo de sistema auxiliar de descarga de silos de biomassa / Antonio Carlos Strabelli Junior – Guaratinguetá, 2019. 69 f : il. Bibliografia: f. 68 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientador: Me. Everton Coelho de Medeiros 1. Biomassa. 2. Escoamento. 3. Silos. I. Título. CDU 620.91
-------	--

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

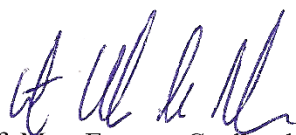
ANTONIO CARLOS STRABELLI JUNIOR

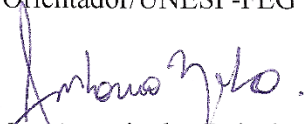
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Msc. Everton Coelho de Medeiros
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Msc. Antonio dos Reis de Faria Neto
UNESP-FEG


Prof. Msc. Anderson Zenken Nakazato
UNESP-FEG

Dezembro - 2019

Ao meu filho Antonio Carlos, fonte de inspiração e alegria em minha vida;

À minha mulher Daiana, pelos esforços e sacrifícios de nossa caminhada;

Aos meus pais e meus irmãos, pelos incentivos e apoio;

À minha avó Zelinda, fonte de honestidade e perspicácia;

A todos os engenheiros, em especial, os oriundos da UNESP;

A Deus!

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Msc. Everton Coelho de Medeiros, pela paciência e compreensão.

Aos engenheiros Gustavo Luchini, Jaime Toscano de Sá e Daniel Oliveira pelas grandes contribuições neste trabalho.

Aos meus amigos e futuros engenheiros Luís Guilherme Damasceno e Gabriel da Silva Silveira.

Aos funcionários e professores da UNESP de Guaratinguetá (FEG/UNESP), que muito ajudaram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Motivado pela ineficiência de silos de biomassa de determinada unidade produtora de papel e celulose, este trabalho aborda teorias e conceitos a respeito das forças inseridas no escoamento de materiais no interior destes equipamentos, informações que foram aplicadas na proposição de um modelo analítico capaz de determinar os esforços mecânicos necessários para com o funcionamento dos sistemas auxiliares de descarregamento localizados no interior destes silos. Estes sistemas auxiliares, os quais contribuem junto às roscas extratoras a dar vazão à biomassa que alimentam as caldeiras da unidade, passaram por alterações estruturais ao longo dos anos que inviabilizaram a utilização da capacidade nominal dos equipamentos, reduzindo a autonomia destes. Os resultados obtidos com o modelo serviram de base para a compreensão dos malefícios das alterações, bem como para com o reconhecimento da eficiência do sistema original dos silos.

PALAVRAS-CHAVE: Silo. Biomassa. Escoamento. Esforços mecânicos

ABSTRACT

Motivated by the inefficiency of biomass silos in a pulp and paper production unit, this work addresses theories and concepts about the forces associated in the flow of materials inside these kind of equipment. These information was applied in a proposal of an analytical model capable of testing the mechanical efforts required for the operation of auxiliary unloading systems, located inside these silos. These auxiliary systems contribute with the biomass extraction threads that feed the boilers of the plant. Over the years, these auxiliary systems passed through many changes that prevented the use of the silos' nominal capacities. The results obtained with the model served as a basis for understanding the harmful effects of the changes, as well as for recognizing the efficiency of the original silos' system.

KEYWORDS: Silo. Biomass. Flow. Mechanical efforts

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição de pressão em líquidos e sólidos	15
Figura 2: Modelo de Janssem- Análise de forças em uma faixa da coluna de sólidos em um silo cilíndrico.	16
Figura 3: Relação entre a pressão de um ponto na parede de um silo cilíndrico mediante a altura da coluna de sólido acima deste.	18
Figura 4: Registro de células de pressão dispostas ao longo da altura de um silo durante diferentes regimes de ocupação.	19
Figura 5: Ilustração da formação de buracos de rato (Rathole) no interior de um silo.	20
Figura 6: Formação de arcos	20
Figura 7: a) Força aplicada F. b) Tensões oriundas de F.....	22
Figura 8: Exemplos de Tensões.....	22
Figura 9: Elemento sólido com carregamento normal	23
Figura 10: a) Equilíbrio de forças no elemento de massa sólida. b) Círculo de Mohr de tensão.....	24
Figura 11: Tensão de consolidação uniaxial de uma massa sólida.....	25
Figura 12: a) Comportamento elástico de um material. b) Comportamento plástico.....	26
Figura 13: Ensaio de Compressão Uniaxial	27
Figura 14: Amostras de ensaios de compressão uniaxial de alguns tipos de biomassa mundialmente utilizados. a) Lascas de pinho silvestre. b) Pó de pinho silvestre c) palha de capim amarelo.....	28
Figura 15: Densidade, p_b , e resistência de escoamento não confinado, σ_c , em função da tensão de consolidação, σ_1	29
Figura 16: Medida da resistência ao escoamento não confinado em um Círculo de Mohr.....	30
Figura 17: Relação entre o círculo de Mohr de tensão, limite de escoamento e o plano de falha.	31
Figura 18: a) Pré-cisalhamento da amostra. b) Deformação por cisalhamento.....	32
Figura 19: Comportamentos diferentes durante o cisalhamento. a) Amostra subconsolidada. b) Amostra superconsolidada.....	33
Figura 20: Tensão de Cisalhamento, pré-cisalhamento e falha por cisalhamento.....	34
Figura 21: Diagrama σ, τ com a demarcação dos pontos de pré-cisalhamento e escoamento incipiente (ponto de cisalhamento).....	35

Figura 22: Determinação dos limites de escoamentos mediante diferentes tensões normais de cisalhamento, porém, sob mesma tensão de pré-cisalhamento	37
Figura 23: Procedimento de medição para vários pontos em um único material de amostra. .	37
Figura 24: Círculos de Mohr durante a etapa de pré-cisalhamento. Construção do lócus de escoamento	39
Figura 25: Círculos de Mohr durante o cisalhamento de falha.....	40
Figura 26: Exemplificação da falha por meio do critério de Coulomb. a) Aplicação da força no sólido. b) Deslizamento de plano dividindo o material em dois.	41
Figura 27: Círculo de Mohr e a linha de Coulomb. Exemplo das possibilidades de carregamento e falha.....	43
Figura 28: Critério de falha de Mohr-Coulomb	44
Figura 29: Silos de Biomassa das caldeiras de força.....	45
Figura 30: Dimensões do Silo. Detalhe do tambor do dispositivo de auxílio de descarregamento e demarcação da altura útil de armazenamento.	46
Figura 31: Desenho de topo do interno do Silo. Destaque para com o sistema rotor que auxilia as roscas na operação de descarregamento.....	47
Figura 32: Rotor- equipamento que auxilia no descarregamento de materiais.	48
Figura 33: Confecção dos braços de arraste do rotor. (Cortesia SHW)	48
Figura 34: Sistema auxiliar de descarregamento atual.- Destaque para os braços rígidos soldados no tambor.....	49
Figura 35: Conjunto motriz do Rotor de um silo.	50
Figura 36: Biomassa. a) Registro do interior do Silo durante período de inspeção. B) Detalhe da composição da biomassa.....	52
Figura 37: Modelo adotado para estudo do silo. a) Disposição do rotor no silo. b) Rotor em detalhe.....	53
Figura 38: Volume de controle adotado no modelamento. Anel de biomassa para com determinado nível de braços alimentadores.....	54
Figura 39: Representação do silo para com o modelo proposto.....	55
Figura 40: Representação das forças sobre parte do volume de controle.....	56
Figura 41: Teoria de Mohr-Coulomb na determinação da tensão de cisalhamento da face superior do anel superior.	59
Figura 42: Ilustração do aumento da tensão na região central dos silos.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos silos de biomassa	46
Tabela 2: Dados mecânicos do Sistema Rotor dos silos.	50
Tabela 3: Torques e Potências máximas a serem fornecidos no sistema instalado	51
Tabela 4: Determinação das pressões nas faces do anel superior e angulo de atrito interno. ..	58
Tabela 5: Valores oriundos da análise de Mohr-Coulomb para com o anel superior. Destaque para a obtenção das tensões de cisalhamento nas faces.....	60
Tabela 6: Forças e Torques de cisalhamento nas faces do anel superior	61
Tabela 7: Valores oriundos da análise de Mohr-Coulomb para com o anel inferior. Destaque para a obtenção da tensão de cisalhamento na face superior.....	62
Tabela 8: Obtenção da força e torque de cisalhamento na face superior do anel inferior.....	62
Tabela 9: Valores de forças e torques de atritos no tambor do rotor.....	64
Tabela 10: Resumo das forças e torques aplicados no modelo.	65
Tabela 11: Simulação do silo em seu estado atual por meio do modelamento adotado.	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	MOTIVAÇÃO	12
1.2	OBJETIVO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	A TECNOLOGIA DE SÓLIDOS E PÓS	13
2.2	PROBLEMAS DE SILOS	19
2.3	ESCOAMENTO DE SÓLIDOS	21
2.3.1	Abordagem contínua	21
2.3.2	Aplicação do círculo de Mohr no estudo dos sólidos	23
2.3.3	Deformação elástica e plástica de uma massa sólida.	25
2.3.4	Escoamento de Material	26
2.4	TESTE DE COMPRESSÃO UNIAXIAL	27
2.4.1	Tempo de Consolidação.....	29
2.4.2	Representação das tensões por meio de círculo de Mohr.....	29
2.5	ENSAIOS DE CISALHAMENTO.....	31
2.5.1	Cisalhamento de falha	35
2.5.2	Propriedades e Locus de Escoamento	38
2.6	O CRITÉRIO DE ESCOAMENTO DE COULOMB	40
3	PROPOSIÇÃO (ESTUDO DE CASO)	45
3.1	O PROJETO ORIGINAL E AS ALTERAÇÕES (SISTEMA ATUAL)	45
3.2	SUGESTÃO DO FABRICANTE.....	51
4	METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	NOVO SISTEMA	52
5	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS	68
	ANEXO A - DESENHO DE CONJUNTO DO SILO	69

1 INTRODUÇÃO

Mediante a necessidade de armazenamento de materiais em silos, operações de preenchimento, disposição e descarregamento configuram importantes etapas no planejamento e funcionamento destes equipamentos, sobretudo no impedimento de efeitos de arco, tunelamento e descarregamento excêntrico, ocorrências indesejáveis que diminuem o fluxo de material e que contribuem, em muitos casos, para o colapso destas estruturas.

Pensando nos eventuais problemas oriundos do fluxo de materiais no interior destas estruturas, a utilização de dispositivos que auxiliam no regime dos silos é muito empregada na tentativa de se evitar qualquer anomalia que possa comprometer o abastecimento ou funcionamento dos mesmos. Dispositivos pneumáticos, vibratórios e mecânicos são empregados no interior destes equipamentos mediante o tipo de material armazenado, fato que contribuiu, ao longo dos anos, para que a tecnologia de armazenamento tivesse grandes avanços.

Além do armazenamento, propósito mais corriqueiro a que se destina este equipamento, os silos também podem ter outros papéis importantes em um fluxo de operação, como o controle de vazão e garantia de fornecimento de materiais em casos de interrupções da alimentação externa ao processo, situação encontrada em plantas movidas por caldeiras de queima de biomassa, sendo um panorama comum em indústrias integradas de papel e celulose, setor que detém o mote deste trabalho.

Focando na necessidade de controle e garantia do fornecimento de biomassa para uma caldeira, este trabalho tem como objeto de estudo as condições dos silos de uma unidade fabricante de papel e celulose, pertencentes a uma das maiores companhias do setor no país, os quais trabalham em regime inferior às suas capacidades nominais. Atualmente, os silos desta unidade têm como média a utilização de somente 35% de seus volumes, sendo esta uma medida de proteção contra o desarme dos motores de seus sistemas auxiliares de descarregamento, fato que compromete os propósitos destes equipamentos e que possuem como principal causa as alterações que estes mecanismos sofreram ao longo dos anos.

Inicialmente, serão destacados os fatores que influenciam no regime de escoamento de um material armazenado, bem como algumas teorias que possibilitam a modelagem deste tipo de problema. Utilizando-se das informações presentes na Revisão Bibliográfica, bem como dos conhecimentos de mecânica, será proposto um modelo de descarregamento, o qual será comparado ao sistema atual, bem como à uma solução proposta pelo fabricante original do equipamento

1.1 MOTIVAÇÃO

Conferir às caldeiras de combustão da unidade de papel e celulose, estas, movimentadas por biomassa de eucalipto, maior autonomia de funcionamento de suas fornalhas, bem como reduzir os custos de produção de vapor.

As caldeiras em questão são abastecidas por silos dotados de sistemas de descarregamento por roscas sem-fim, os quais são auxiliados por sistemas auxiliares, sendo estes últimos chamados de rotores, os quais compreendem um tambor com braços radiais que gira no interior do equipamento, conferindo o arraste da biomassa para as calhas das roscas de descarregamento, bem como atuando na prevenção de qualquer anomalia que possa impedir o fluxo de material.

Os silos, ao longo do tempo, passaram por alterações em seus sistemas auxiliares (rotores), os quais:

- Inviabilizaram a utilização de suas capacidades nominais, reduzindo a autonomia das fornalhas.
 - Relatos apontam autonomia de menos de 10 minutos de abastecimento;
 - Aumento da utilização de Queima Auxiliar (óleo combustível);
 - Aumento nos custos de produção;
- Aumentaram os esforços mecânicos sobre o mecanismo de descarga.
 - Desgaste prematuro de componentes;
 - Maiores Intervenções da Manutenção;

1.2 OBJETIVO

Estudar o sistema auxiliar de descarregamento dos transportadores de rosca sem-fim (rotores) dos silos de biomassa de uma unidade produtora de papel e celulose;

Determinar torques e forças necessárias para acionamento do sistema auxiliar de descarregamento dos silos de biomassa, tendo o intuito em se determinar a forma e a influência de fatores sobre o dispositivo mecânico de acionamento, possibilitando comparação entre diferentes alternativas de montagem deste equipamento

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A TECNOLOGIA DE SÓLIDOS E PÓS

Qualquer operação que envolva particulados, em especial, armazenagem, fluxo e manuseio de materiais sólidos configurará uma das principais e essenciais etapas de projeto de uma planta industrial.

O próprio projeto do equipamento de armazenagem e manuseio de sólidos requer o conhecimento específico das propriedades do particulado a ser trabalhado, além do entendimento de suas condições estáticas e dinâmicas que o mesmo será submetido. Dentre as propriedades, destacam-se:

- Tamanho de partícula, forma, distribuição de tamanho e área superficial;
- Densidade da partícula e da massa;
- Propriedades coesivas, fluidez e fluidização;
- Dureza e compressibilidade;
- Toxicidade, flamabilidade, explosividade;
- Características químicas, térmicas, ópticas e magnéticas;
- Higroscopia.

Shamlou (1988) confere maior importância a algumas destas propriedades dependendo do tipo de operação em consideração, por exemplo, para operação de armazenagem e descarregamento de silos, as principais propriedades se relacionam ao formato e tamanho da partícula, bem como à suas propriedades coesivas e tribológicas.

Estes termos conferem indicação qualitativa do tamanho dos corpos, sendo usados de forma imprecisa na tomada de uma dimensão média do particulado. Diferentemente de esferas que possuem uma dimensão bem definida, o tamanho de um particulado é tomado através de seu diâmetro equivalente, o qual corresponde à um diâmetro de uma esfera ideal e que possa exibir os mesmos comportamentos da partícula, levando em conta as condições impostas à esta última ou, que apresenta as mesmas características descritivas do corpo que se deseja medir.

Um exemplo deste conceito pode ser exemplificado pela utilização do diâmetro volumétrico (d_v), o qual é definido por meio de um diâmetro de esfera que apresente o mesmo volume do particulado medido, dado pela Equação 1.

$$d_v = \left(\frac{6V_p}{\pi}\right)^{1/3} \quad (1)$$

Onde V_p é o volume da partícula.

Um bom entendimento da natureza de escoamento de sólidos é um pré-requisito essencial ao projeto de qualquer sistema que vise o armazenamento e manuseio destes materiais.

A observação do escoamento de materiais sólidos sugere similaridade ao de líquidos, porém, tal analogia não se faz presente na prática. Em geral, é mais apropriado modelar uma massa sólida como se fosse um corpo dotado de plasticidade do que este como se fosse um meio líquido e contínuo.

Woodcock *et al.* (1987) pontua que as principais características dos líquidos que não são observadas em uma massa sólida são:

- Em repouso, líquidos não sustentam tensões de cisalhamento. Fato que é demonstrado pela formação de pilhas de materiais sólidos, ao passo que, líquidos em repouso apresentam uma única superfície livre.
- Mudanças de pressões em um líquido são transmitidas uniformemente a todos os pontos de seu volume;
- Tensões de cisalhamento em um líquido fluindo são dependentes da taxa de cisalhamento e independente da pressão média do fluido.

Os sólidos em repouso podem transmitir tensões de cisalhamento e, em muitos casos, possuem uma resistência coesiva após a consolidação (assentamento do material), capaz de manter sua forma após aplicação de pressão. Quando um sólido escoar de forma lenta, a sua tensão de cisalhamento é dependente da pressão média, bem como de demais parâmetros como a taxa de cisalhamento.

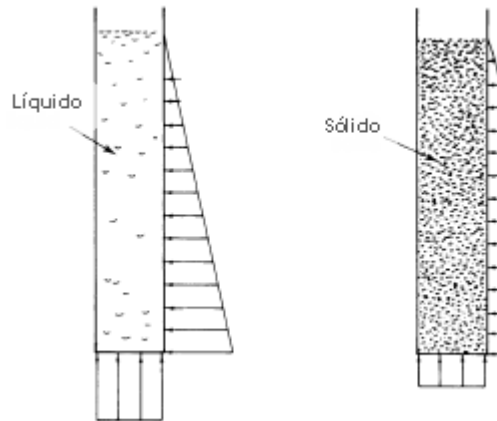
Estas observações podem ser demonstradas pela comparação de distribuição de pressão nas superfícies internas de dois cilindros idênticos- um estando cheio de algum líquido; outro, com sólido. Ambos os cilindros contando com materiais de mesma densidade volumétrica.

A razão para tal diferença recai no fato de não existir tensões de cisalhamento nas paredes do cilindro que contém o líquido, deste modo, o peso de todo o líquido é suportado pela base horizontal, enquanto que, no caso do sólido, uma proporção significativa de seu peso é sustentada pelas paredes.

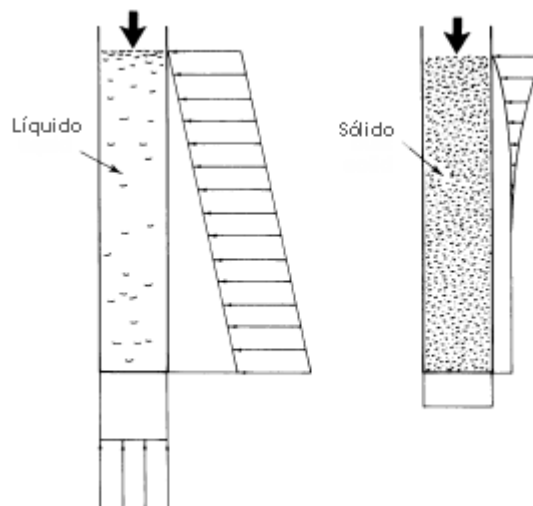
No caso dos líquidos, aumentando o carregamento sobre a superfície livre do cilindro, toda carga pode ser retransmitida à base. Os sólidos, por sua vez, podem não apresentar esta

variação, já que este carregamento incremental é “consumido” ao longo do trajeto que liga a superfície à base, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1: Distribuição de pressão em líquidos e sólidos



a) Distribuição de pressão causada exclusivamente pelo peso



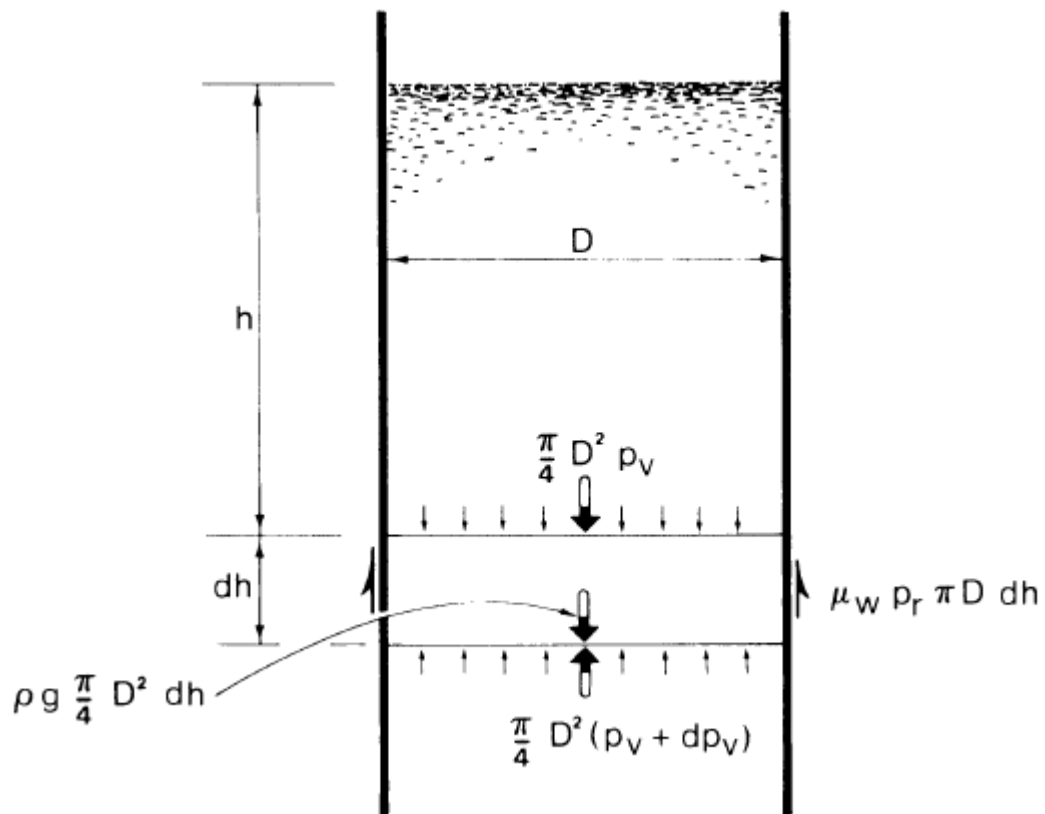
b) Excesso de pressão causado pelo carregamento adicional na superfície livre

Fonte: Adaptado de Woodcock et al. (1987).

A principal causa desta diferença entre distribuição de pressão se dá pelas forças de atrito entre as partículas do sólido e as paredes da estrutura que as contém, no caso, o cilindro, demonstrando que as paredes do recipiente sustentam parte do peso do sólido. Soma-se a este fato que a pressão lateral nas paredes do recipiente é geralmente menor do que a pressão hidrostática para o mesmo líquido em comparação.

Adotando-se o modelo de Janssen para pressões radiais em silos, pode-se determinar a distribuição de pressão existente em uma coluna de material particulado que se encontra em um vaso cilíndrico. Primeiramente, deve-se considerar o equilíbrio de uma faixa horizontal, como ilustrada na Figura 2.

Figura 2: Modelo de Janssen- Análise de forças em uma faixa da coluna de sólidos em um silo cilíndrico.



Fonte: Adaptado de Woodcock et al. (1987).

A uma distância h abaixo da superfície livre do sólido, a pressão lateral é p_r e a vertical, devido à coluna de cobertura do material, é p_v . Normalmente, estas duas pressões se correlacionam na forma da Equação 2, na qual k é uma constante menor do que uma unidade.

$$p_r = k \cdot p_v \quad (2)$$

A constante K é chamada de razão de pressão lateral, sendo esta dada pela Equação 3

$$K = \frac{1 - \sin(\phi_i)}{1 + \sin(\phi_i)} \quad (3)$$

O ângulo Φ_i é chamado de ângulo de atrito interno do sólido, sendo descoberto pelo plano de cisalhamento obtido através da aplicação de uma tensão compressiva normal ao plano de cisalhamento. Um valor típico é $\Phi_i=30^\circ$, resultando em um $k=0,33$. (McGlinchey, 2008)

Para o elemento em questão da Figura 2, o diâmetro D e a espessura dh contribuem para determinar as forças verticais que agem sobre o volume de controle, sendo estas dadas pelo Quadro 1.

Quadro 1: Componentes da equação de Janssen

$\begin{aligned} \text{Diferença de pressão} &= \frac{\pi}{4} \cdot D^2 dp_v \\ \text{Força gravitacional} &= \rho_b \cdot g \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot dh \\ \text{Atrito da Parede} &= \mu_w \cdot p_r \cdot \pi \cdot D \cdot dh \end{aligned}$

Fonte: Autor (2019).

Onde ρ_b é a densidade da massa volumétrica e μ_w é o coeficiente de atrito do sólido junto às paredes do silo.

Realizando o equilíbrio do componente, temos a Equação 4

$$\rho_b \cdot g \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot dh - \frac{\pi}{4} \cdot D^2 dp_v - \mu_w \cdot p_r \cdot \pi \cdot D \cdot dh = 0 \quad (4)$$

Resolvendo a equação diferencial, obtém-se a seguinte expressão, dada pela Equação 5

$$p_r = \frac{\rho_b \cdot g \cdot D}{4 \cdot \mu_w} \left(1 - \exp \left(- \frac{4 \cdot \mu_w \cdot k \cdot h}{D} \right) \right) \quad (5)$$

Analisando a Equação 5 e tendo conhecimento que, normalmente, as alturas dos silos são superiores ao diâmetro dos mesmos, tem-se que a pressão radial máxima é dada pela Equação 6.

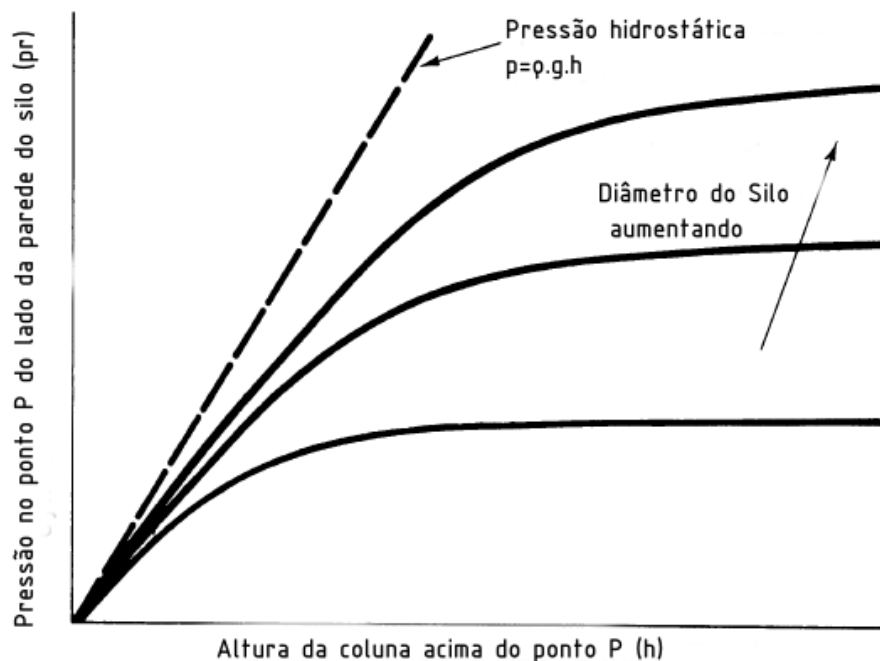
$$p_{rmax} = \frac{\rho_b \cdot g \cdot D}{4 \cdot \mu_w} \quad (6)$$

A pressão vertical máxima pode ser obtida com base na Equação 2, resultando na Equação 7.

$$p_{vmax} = \frac{\rho_b \cdot g \cdot D}{4 \cdot \mu_w \cdot k} \quad (7)$$

A Figura 3 ilustra a relação de pressão em um ponto na parede de um silo cilíndrico frente a coluna de material que se encontra sobre este.

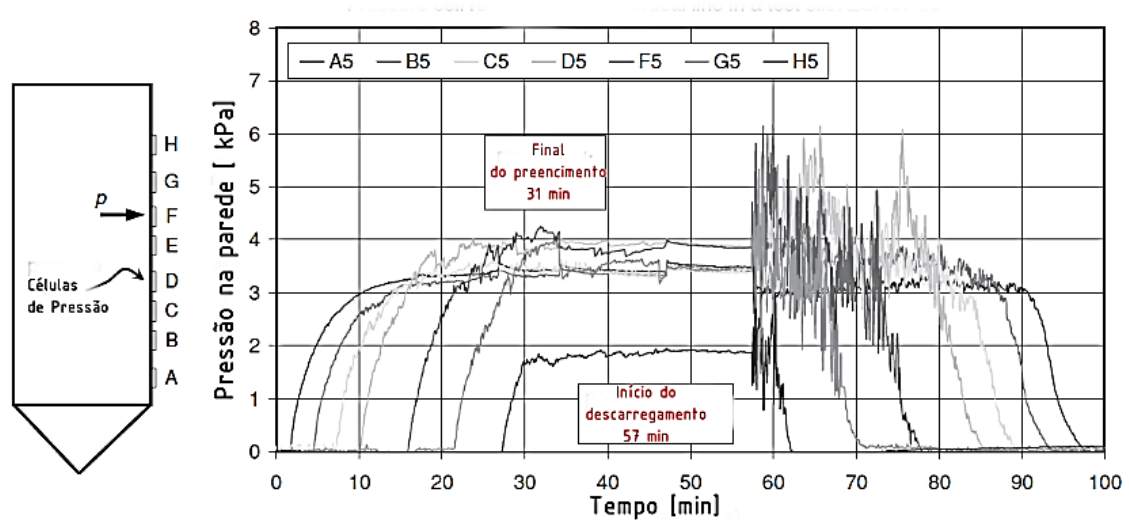
Figura 3: Relação entre a pressão de um ponto na parede de um silo cilíndrico mediante a altura da coluna de sólido acima deste.



Fonte: Adaptado de Woodcock et al. (1987).

McGlinchey (2008) pontua que durante o regime de funcionamento de um silo, as pressões alteram de forma brusca, um exemplo está no esvaziamento do silo, durante o qual se observa aumentos de pressões com incremento de até 30% do valor obtido pela fórmula de Janssen, sobretudo em relação aos valores das pressões de parede do silo, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4: :Registro de células de pressão dispostas ao longo da altura de um silo durante diferentes regimes de ocupação.



Fonte: Adaptado de McGlinchey (2008).

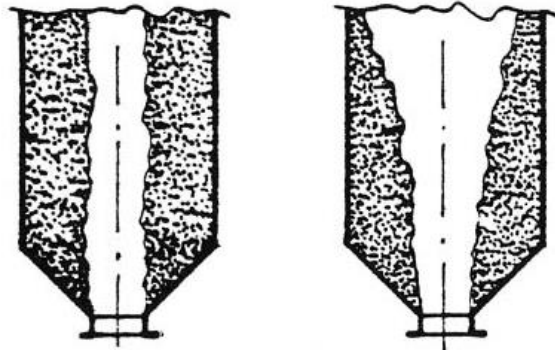
2.2 PROBLEMAS DE SILOS

- Buracos de Rato ou Tunelamento (*"Ratholes or Pipes"*)

Originados devido a formação de regiões de estagnação de material, são falhas no processo de descarregamento de um silo, os quais são caracterizados por aberturas estreitas ao longo da altura do equipamento por onde escoar a massa sólida, em suma, é como se formasse um funil no interior da estrutura, fazendo com que grande parte do material fique alojado dentro desta, diminuindo o fluxo em seu interior.

A Figura 5 ilustra a esta formação, a qual pode ser potencializada pela formação destes "caminhos" na parede do silo, o que faz com que haja um aumento de tensões nesta região com o fluxo de materiais.

Figura 5: Ilustração da formação de buracos de rato (Rathole) no interior de um silo.

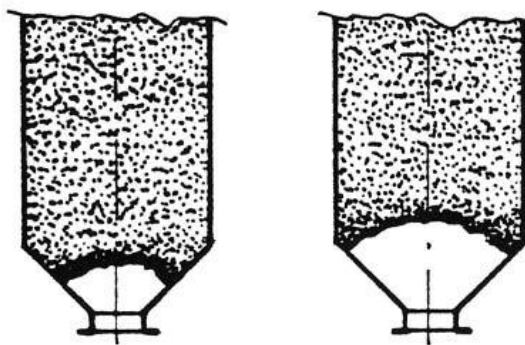


Fonte: Woodcock *et al.* (1987).

- Arcos ou Pontes

Tratam-se da formação de uma camada de material que impede o fluxo de massa no interior do equipamento. Podem ser originados por meio de travamento mecânico de partículas, nas quais, determinado material fica preso na região de descarga, já que este é maior que a abertura, ou, pode ocorrer por efeitos de coesão de materiais, neste último caso, tempos de permanência de materiais no interior da estrutura favorecem a ligação entre partículas, aumentando a coesão entre estas, o que faz com surjam estruturas tão rígidas capazes de suportarem as cargas que se encontram acima delas, interrompendo o fluxo de material. A Figura 6 apresenta esta anomalia. Tanto no caso de arco quanto nos de buracos de rato, aberturas maiores nos silos, em especial, na região de descarga, impedem que hajam estes tipos de problemas.

Figura 6: Formação de arcos



Fonte: Woodcock *et al.* (1987).

2.3 ESCOAMENTO DE SÓLIDOS

Não é possível determinar de forma teórica o comportamento de escoamento de um sólido, pois muitos parâmetros (alguns já mencionados neste texto) possuem graus de influência que variam sob ação de outras variáveis, bem como se comportam de forma diferente mediante o material em questão. Porém, a realização de ensaios pode conferir valores e informações capazes de elucidarem as propriedades do material com um certo grau de aproximação à realidade observada. Desta forma, a prática habitual é sempre realizar estudos sob as condições nas quais o material está submetido.

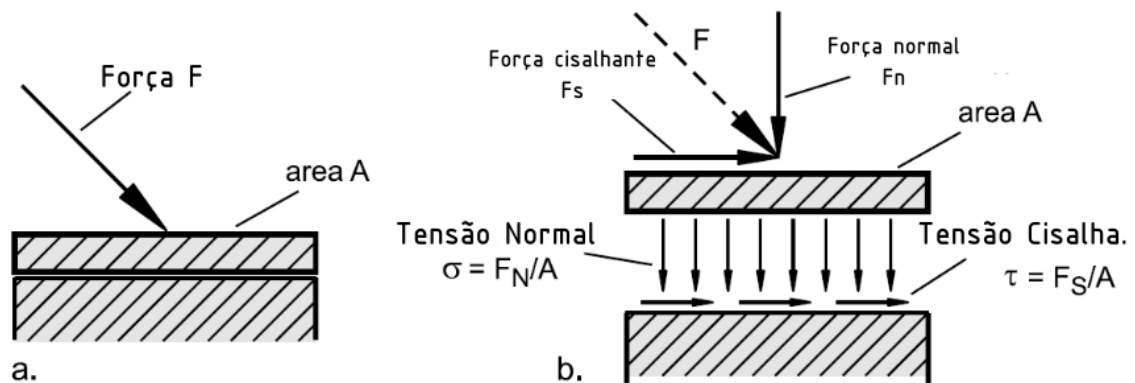
2.3.1 Abordagem contínua

Uma massa sólida é formada pelo agrupamento de partículas individuais, sendo possível de descrever o comportamento deste material através das interações existentes entre cada corpo que a compõem. Situação indesejável para com os propósitos de estudo deste texto, já que demandaria um número absurdamente alto de equações para modelar o problema, por exemplo, em um volume de 1cm^3 , há 10^9 partículas com diâmetro de $10\mu\text{m}$, sendo que cada partícula apresenta uma forma diferente, além de terem forças interativas com uma ampla gama de variação.(Schulze, 2008)

Uma outra forma de abordagem de problema é considerar a massa como contínua, assim, ao invés de considerar a interação entre partículas individuais pode-se modelar todo o material através das interações que ocorrem nas fronteiras de seus volumes de controle, procedimento similar ao adotado em mecânica dos fluídos. Deve-se atentar que o volume em estudo deve ser suficientemente grande em relação ao volume de uma única partícula, o que faz com que as interações entre corpos possam ser desprezíveis.(Schulze, 2008)

O estado de carregamento de uma massa sólida pode ser descrito através da mecânica do contínuo, sendo o modelamento realizado com base em tensões, sejam estas de cisalhamento ou normais a planos (tensões de compressão e tração), situação que desconsidera as dimensões envolvidas. A Figura 7 ilustra o conceito abordado.

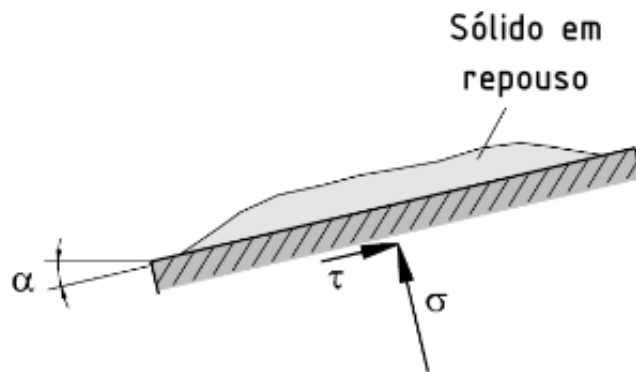
Figura 7: a) Força aplicada F. b) Tensões oriundas de F.



Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

Na tecnologia dos sólidos, as tensões de cisalhamento são sempre oriundas dos efeitos de atrito, como pode ser visto na Figura 8, a qual apresenta uma massa sólida em repouso sobre um plano com inclinação α . As tensões existentes são demonstradas através de setas.

Figura 8: Exemplos de Tensões.



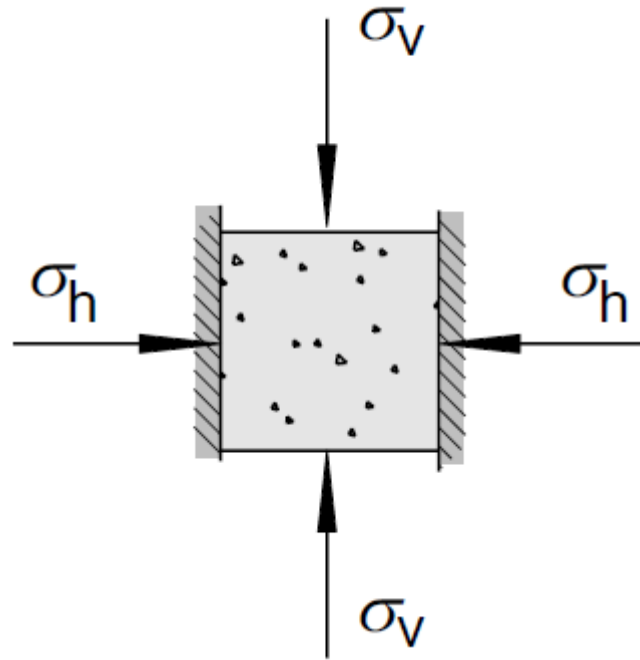
Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

Tratando-se de armazenamento de sólidos, as tensões normais são, em quase sua totalidade, tensões de compressão, assim, diferentemente do exposto na mecânica clássica, porém, similar à mecânica dos fluídos, as forças de compressão serão definidas como sendo positivas; de tração, negativas.

A Figura 9 apresenta um elemento sólido que é carregado por forças normais. Assume-se que este elemento apresenta altura infinita e que suas paredes sejam ideais, não contribuindo à existência de uma força de atrito interna. Na direção vertical, a tensão positiva

(σ_v) é exercida sobre a massa sólida. Dentro do elemento, surge a tensão horizontal, σ_h , sendo esta resultante do carregamento vertical.

Figura 9: Elemento sólido com carregamento normal



Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

Caso os sólidos se comportassem como fluídos newtonianos, as tensões horizontais e verticais seriam iguais, porém, o comportamento é diferente. A tensão horizontal correlaciona-se com a vertical através do coeficiente k (razão lateral de pressão, já mencionado neste texto) Valores típicos desta constante estão entre 0,3 e 0,6, fazendo com que a pressão horizontal seja menor em relação à vertical.

2.3.2 Aplicação do círculo de Mohr no estudo dos sólidos

Considerando que a massa sólida se comporte de forma próxima a um material capaz de sofrer deformação plástica, diferentes tensões podem ser encontradas em diferentes planos de corte. Estas podem ser analisadas usando um simples equilíbrio de forças.

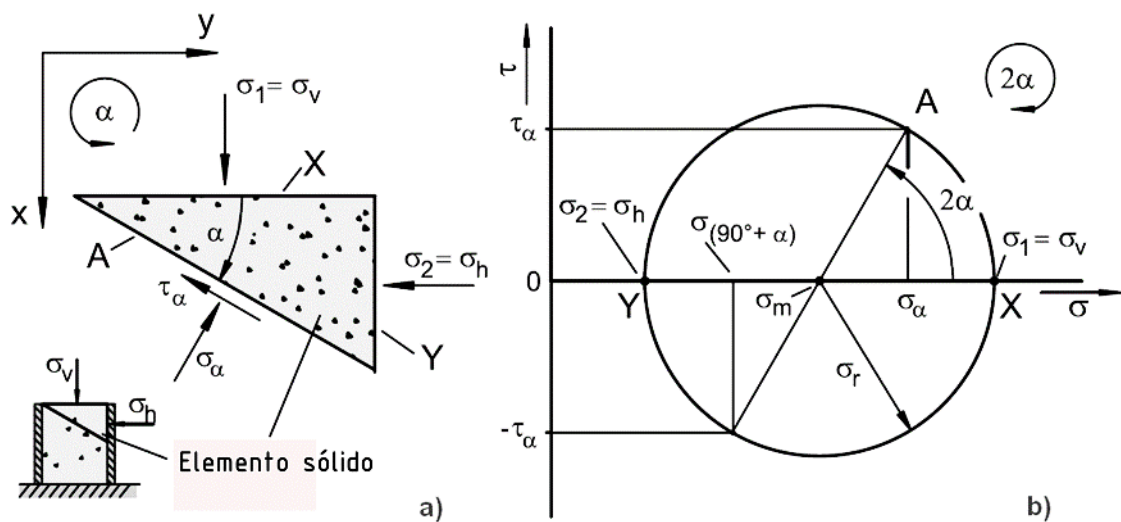
Tomando ainda a Figura 9, nenhuma tensão de cisalhamento é observada no topo ou base do elemento carregado, bem como ao longo de suas paredes, as quais não apresentam atrito. Usando o simples equilíbrio de forças no volume citado, pode-se determinar as tensões que agem em um plano arbitrário e inclinado de ângulo α , assim como ilustrado pelo item a)

da Figura 10. Observa-se que para que haja o equilíbrio do elemento, no plano de corte surgirá uma tensão normal ao plano, bem como uma tensão paralela e cisalhante, respectivamente, σ_α e τ_α , dadas pelas equações 8 e 9.

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} + \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \cdot \cos(2\alpha) \quad (8)$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \cdot \sin(2\alpha) \quad (9)$$

Figura 10: a) Equilíbrio de forças no elemento de massa sólida. b) Círculo de Mohr de tensão.



Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

Os pares $(\sigma_\alpha, \tau_\alpha)$ que são calculados mediante as equações 8 e 9 podem ser obtidos para com qualquer ângulo α , e assim, plotados em um diagrama de tensões normais e cisalhantes. Este diagrama é o famoso círculo de Mohr, o qual é apresentado na Figura 10 b).

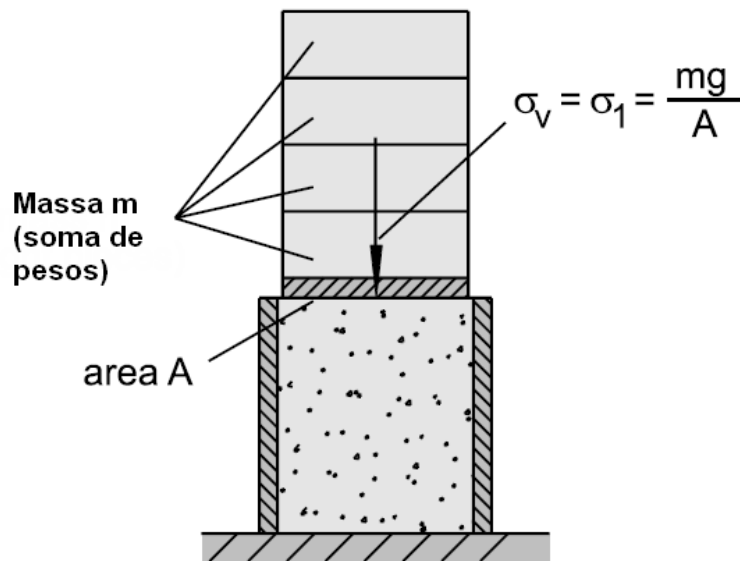
Para com o elemento da Figura 10 a), o círculo de Mohr tem o seu centro localizado sobre a coordenada $\sigma = (\sigma_v + \sigma_h)/2$ e $\tau = 0$, sendo o seu raio dado por $\sigma_r = (\sigma_v - \sigma_h)/2$. Nota-se que o círculo de Mohr apresenta dois pontos de intersecção com o eixo σ , sendo estes chamados de tensões principais- o maior valor é designado por σ_1 e o menor, σ_2 (isto no caso de uma avaliação bidimensional).

Continuando com o exemplo, os planos horizontais e verticais são livres de qualquer tensão de cisalhamento, além de serem considerados os planos principais. Neste caso, σ_v , que é maior que a tensão horizontal (σ_h) correspondem as duas tensões principais, respectivamente, σ_1 e σ_2 , estando as mesmas separadas por 90° .

Para determinar as tensões de determinado plano de corte, estando este rotacionado em um ângulo α em relação ao plano principal, deve-se rotacionar no círculo de Mohr um ângulo 2α , sendo este último rotacionado na direção oposta ao ângulo original do plano que se deseja analisar.

Para aplicações práticas mais simples, normalmente, utiliza-se apenas a tensão principal σ_1 , assim, assume-se que a maior das tensões normais é responsável pela condição do sólido em estudo. Um dos principais métodos que se utiliza de tal técnica está na utilização deste valor como sendo o da tensão de consolidação de um sólido (parâmetro que será melhor compreendido a posteriori e que se mostra ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Tensão de consolidação uniaxial de uma massa sólida.



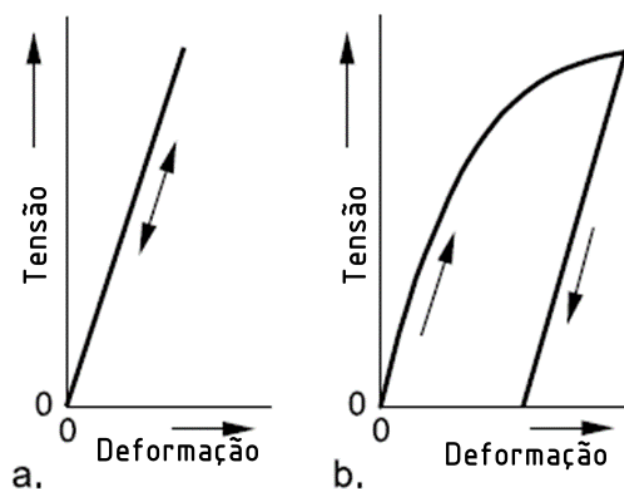
Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

2.3.3 Deformação elástica e plástica de uma massa sólida.

Deformação elástica ocorre quando a carga (por exemplo, tensão normal) é aplicada e a deformação desaparece completamente após a retirada da força. Deformação plástica ocorre quando a tensão aplicada é suficiente para causar deformação permanente no material.

Normalmente, a deformação plástica de massa sólida se refere à deformação do elemento sólido através do movimento individual de partículas. A Figura 12 apresenta gráficos que simulam os regimes mencionados.

Figura 12: a) Comportamento elástico de um material. b) Comportamento plástico.



Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

A deformação elástica não apresenta grande importância para com a maioria das aplicações da tecnologia dos sólidos. A deformação plástica, por sua vez, ocorre quando a tensão é suficiente para causar o escoamento do material, ou quando a relação tensão-deformação não é linear, assim como na Figura 12 b).

A deformação plástica de uma massa sólida, geralmente, se refere à deformação do elemento sólido pela movimentação das partículas em relação às demais. A contribuição da deformação individual das partículas não contribui de forma efetiva à deformação total.

2.3.4 Escoamento de Material

O escoamento de material depende:

- Distribuição do tamanho de partículas;
- Forma do particulado;
- Composição química do material;
- Umidade;
- Temperatura.

Schulze (2008) afirma que não é possível determinar teoricamente o comportamento de uma massa sólida em função de todos os parâmetros mencionados, assim, para determinar as propriedades de escoamento, utiliza-se a realização de ensaios específicos.

2.4 TESTE DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

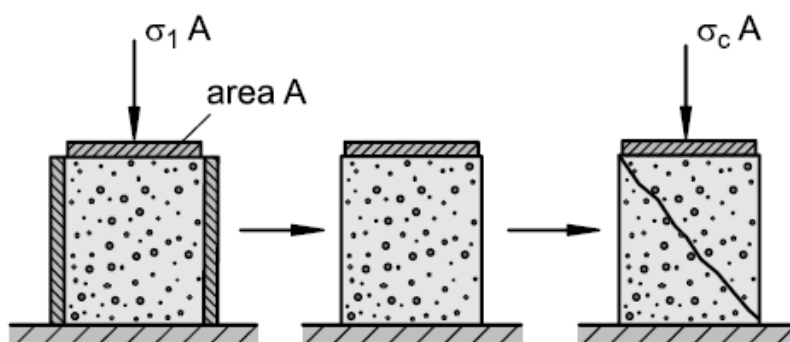
A magnitude de carga necessária para deformar um material é uma medida de escoabilidade, podendo esta ser determinada por meio do ensaio de compressão uniaxial.

Mediante a Figura 13, um cilindro oco é preenchido com uma massa sólida de particulado fino, destaca-se que o cilindro possui seção transversal de área A e assume-se que sua parede é ideal, não tendo atrito com o material.

O sólido é carregado por uma tensão σ_1 , também chamada de tensão de consolidação ou tensão principal, tendo esta direção vertical e sendo a mesma compressiva. Quanto mais o volume do sólido é reduzido, mais comprimido é o material, resultando no aumento da densidade da massa sólida. Além das observações mencionadas, na grande maioria dos casos irá ser observado o aumento de resistência da amostra.

Após a consolidação, a amostra é aliviada da tensão de consolidação (σ_1) e assim retirada do cilindro. Em seguida, a amostra é carregada progressivamente com o aumento de uma tensão de compressão, levando a mesma a falhar sob ação de certo valor.

Figura 13: Ensaio de Compressão Uniaxial



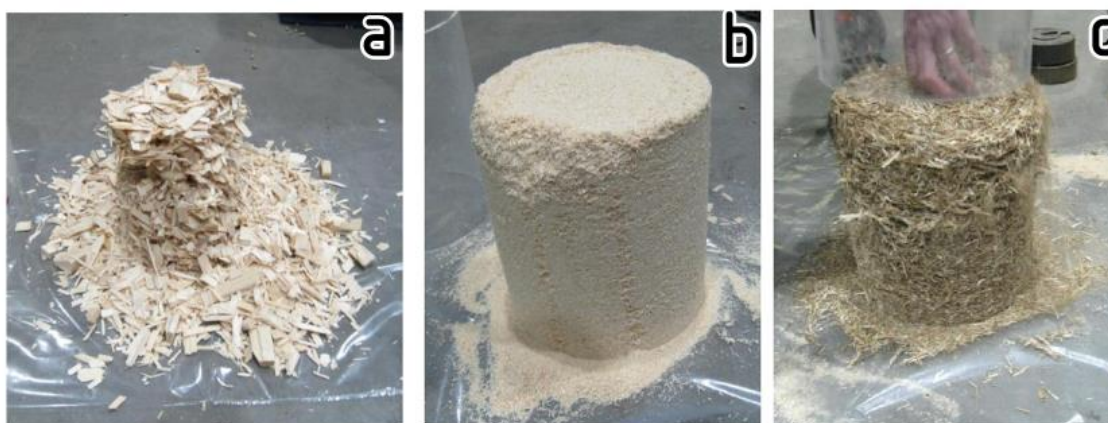
Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

A tensão que culminará com a falha é chamada de resistência à compressão, resistência de coesão ou limite de escoamento não-confinado, σ_c (outra simbologia utilizada é f_c). Na tecnologia dos sólidos, alguns chamam esta falha de “escoamento incipiente”, devido a falha iniciar-se com certo valor de carregamento sob o sólido consolidado, resultado de uma

dilatação do material na região da fratura, já que as distâncias entre partículas aumentam. Assim, o escoamento incipiente é uma deformação plástica na qual a densidade da massa sólida diminui na região de fratura.

A Figura 14 ilustra amostras destinadas a ensaios de compressão uniaxial, sendo estas de materiais diferentes aos utilizados em nosso objeto de estudo, porém, amplamente utilizados na Europa, América do Norte e parte da Ásia como biomassa. As imagens da Figura 14 apresentam as amostras após a etapa de consolidação e retirada das mesmas de seus cilindros, estando as mesmas aptas para a etapa de determinação de seus limites de escoamento.

Figura 14: Amostras de ensaios de compressão uniaxial de alguns tipos de biomassa mundialmente utilizados. a) Lascas de pinho silvestre. b) Pó de pinho silvestre c) palha de capim amarelo.



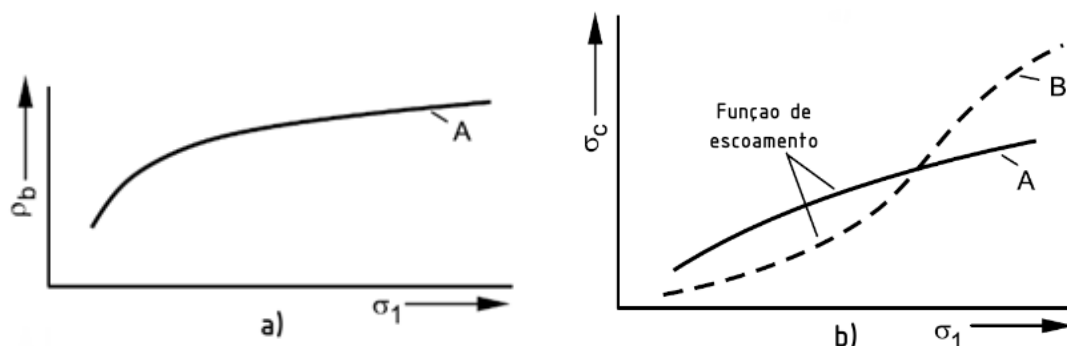
Fonte: Barletta *et al.* (2015).

Como o sólido falha apenas com uma grande tensão vertical, a qual é igual à sua resistência à compressão, deve então existir um limite específico do material que culmine com sua deformação. Apenas quando este limite é alcançado é que o sólido começa a escoar. Situação semelhante à encontrada em metais sob esforços solicitantes.

Quanto maior a tensão de consolidação, σ_1 , maior a densidade da massa sólida, ρ_b , e maior o limite de escoamento não confinado, σ_c .

Testes de compressão uniaxial conduzidos em diferentes tensões de consolidação, σ_1 , levam a diferentes pares de valores (σ_c , σ_1) e (ρ_b , σ_1). Plotando esses pares como valores em diagramas $\sigma_c \times \sigma_1$ e $\rho_b \times \sigma_1$, as curvas obtidas se assemelham às encontradas nos itens a) e b) da Figura 15, as quais mostram a existência de crescimento com o aumento de σ_1 .

Figura 15: Densidade, ρ_b , e resistência de escoamento não confinado, σ_c , em função da tensão de consolidação, σ_1



Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

Analisando a Figura 15 b), dificilmente encontraremos um material que se comporte como a curva B, a qual apresenta uma inclinação proeminente frente à tensão de consolidação (σ_1), o que caracteriza uma resistência à compressão (σ_c) igual ou maior à carga de compactação aplicada.

2.4.1 Tempo de Consolidação

Algumas massas sólidas aumentam a sua resistência se elas são armazenadas por períodos sob certa tensão compressiva. Este efeito é chamado de tempo de consolidação, sendo resultado do aumento das forças adesivas entre partículas.

O tempo de consolidação pode ser determinado com teste semelhante ao da Figura 13, sendo que a massa é submetida a determinada tensão de consolidação (σ_1) por um período definido t . Após o período, a amostra é submetida ao teste de resistência de escoamento não confinado. Para muitos sólidos, o aumento do tempo de consolidação favorece ao aumento de resistência ao escoamento, porém, tal afirmação não se aplica a todos os materiais.

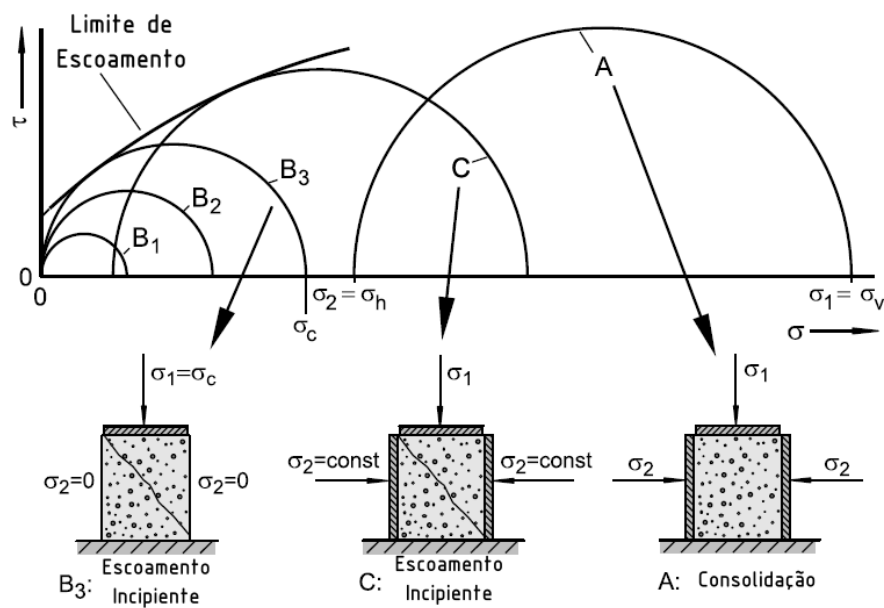
2.4.2 Representação das tensões por meio de círculo de Mohr

Durante a consolidação, a tensão σ_1 atua no topo da amostra, estando perpendicularmente à esta a tensão horizontal σ_2 (Figura 10). Assume-se que nem no topo, nem na base e nem nas paredes internas do cilindro haja qualquer tensão de cisalhamento (lembrando que foi assumido que não há força de atrito entre a massa sólida e as paredes do

cilindro), logo, $\tau=0$. O par de valores (σ, τ) para os planos vertical e horizontal são plotados no círculo de Mohr, estando os mesmos localizados sobre o eixo das abscissas.

A amostra é então carregada progressivamente, tendo sido a mesma retirada do cilindro. Durante o aumento vertical de carregamento, diferentes estados de tensão são obtidos, culminando em diferentes círculos de tensão (Círculos B1, B2, B3 da Figura 16). No caso da tensão progressiva, observa-se que o menor valor de tensão é zero (tensão horizontal), sendo este representado no círculo de Mohr, já que não há uma força lateral na amostra.

Figura 16: Medida da resistência ao escoamento não confinado em um Círculo de Mohr

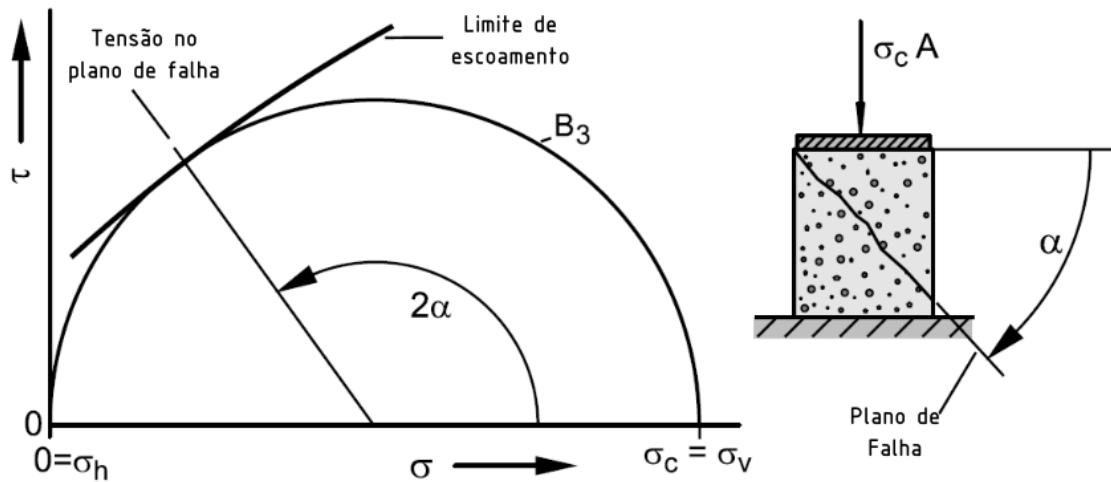


Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

Pelos diagramas presentes na Figura 16, os círculos B1 e B2, que estão completamente abaixo da linha de resistência, causam somente deformação elástica no material. Círculos de tensão maiores que B3, bem como os que se encontram parcialmente acima do limite de escoamento, não são possíveis. A amostra provavelmente estaria escoando quando o Círculo de Mohr alcança o limite de escoamento do material. O círculo C representa um ensaio de compressão com a presença de restrição lateral à amostra, fazendo com que surja uma tensão σ_2 diferente de zero.

A conexão entre o teste e o círculo de Mohr se dá através do limite de escoamento e o plano da falha, demonstrado na Figura 17. O ponto no qual o círculo de Mohr B3 toca o limite de escoamento define o par de valores de tensão normal e cisalhamento que inicia o escoamento.

Figura 17: Relação entre o círculo de Mohr de tensão, limite de escoamento e o plano de falha



Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

A escoabilidade de um sólido é caracterizada, principalmente, por sua resistência ao escoamento não confinado, σ_c , como sendo uma função de σ_1 e do período de consolidação t . A razão ff_c de tensão de consolidação caracteriza numericamente esta propriedade, sendo esta dada pela função da Equação 10.

$$ff_c = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad (10)$$

Quanto maior o valor do índice da Equação 10, mais facilmente o material esco.

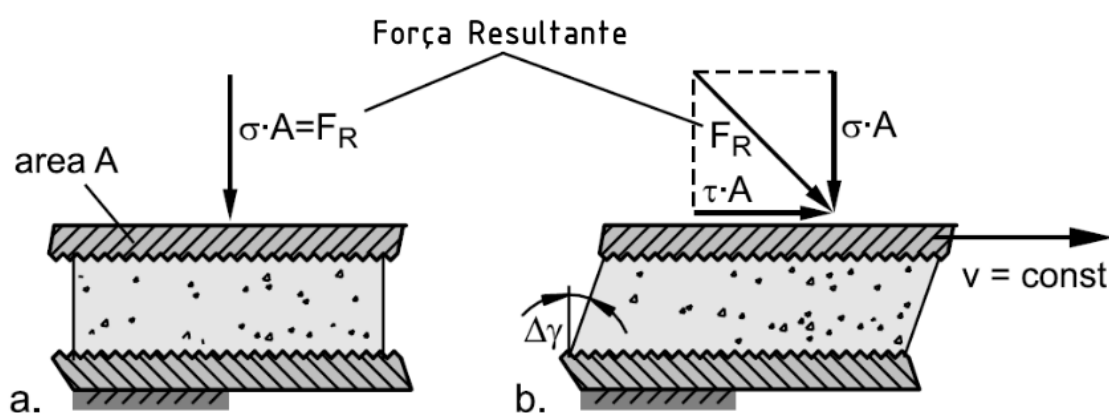
2.5 ENSAIOS DE CISALHAMENTO

O uso do ensaio de compressão uniaxial com alguns sólidos pode gerar resultados que não são aceitáveis, caso de partículas finas e fortemente coesas, as quais, quando ensaiadas, podem gerar valores de limite de escoamento muito abaixo aos da realidade. Somado a este fato, muitas preparações de corpo de prova são difíceis, como pôde ser observado na Figura 14, onde se observa a diferença de forma com cada tipo de material. Além disso, certos parâmetros não podem ser determinados pelo ensaio de compressão, caso do atrito da parede do cilindro com o sólido, assim, testes de cisalhamento são utilizados em detrimento dos de

compressão uniaxial, havendo vários tipos de métodos para com esta classe de ensaio. (Schulze, 2008,p. 47)

Um dos primeiros ensaios foi desenvolvido por Jenike na década de 1960, este é similar ao ensaio de compressão uniaxial, já que é feito em duas etapas: primeiro, a amostra é consolidada, o que é chamado de pré-cisalhamento; após, o limite de escoamento é medido, sendo esta etapa chamada de cisalhamento ou, cisalhamento da fratura, como pode ser visto na Figura 18.

Figura 18: a)Pré-cisalhamento da amostra. b) Deformação por cisalhamento.



Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

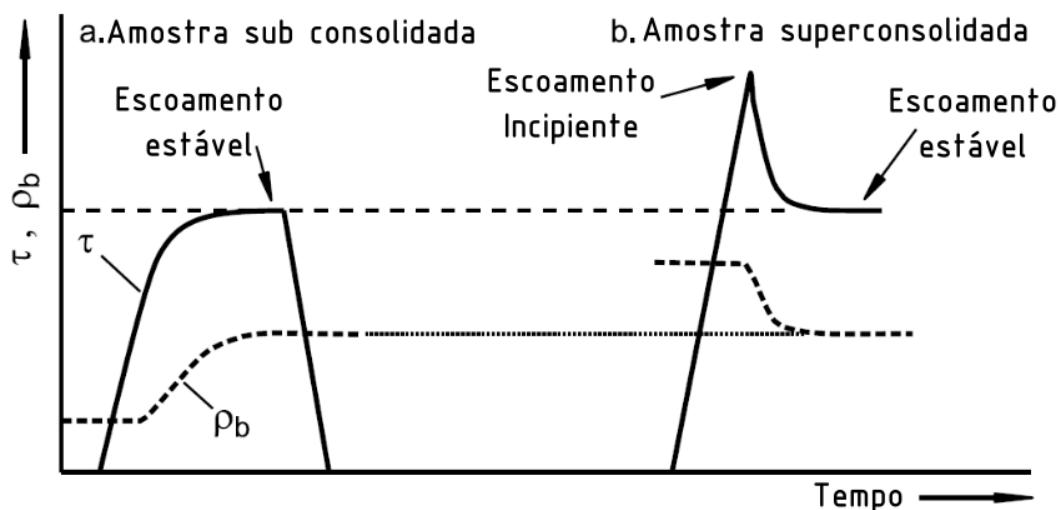
Baseado na Figura 18, a amostra de massa sólida com uma seção transversal de área A é primeiramente submetida a uma tensão vertical normal, σ , depois, o topo é movimentado horizontalmente com uma velocidade constante e relativa à base, a qual se mantém fixa de modo a possibilitar o cisalhamento da amostra. Devido ao atrito entre as partículas, uma tensão cisalhante, τ , atua no sólido, sendo esta transferida e medida com o deslocamento do topo.

Durante a deformação por cisalhamento, as partículas são movidas uma contra as outras resultando na tensão de cisalhamento, τ . O ensaio consiste em registrar as progressivas tensões de cisalhamento e densidades do material frente ao tempo de ensaio, assim como na Figura 19. Alguns sólidos vão tendo as suas tensões de cisalhamento sendo aumentadas progressivamente com a deformação da amostra, já que o material vai se tornando mais compacto. Materiais que vão apresentando esse aumento na tensão de cisalhamento e densidade quando submetidos ao ensaio são chamados de subconsolidados, como pode ser visto na Figura 19a).

Durante o tempo, a curva de densidade e tensão de cisalhamento se tornam constantes, caracterizando a obtenção da maior força de atrito possível na amostra, diz-se que a amostra está em estado estável de escoamento. (Figura 19 a). Agora, considerando uma amostra que passou por uma etapa de superconsolidação, a qual recebeu uma carga de compactação bem maior à carga de pré-cisalhamento, esta, em comparação à condição de sub consolidação e submetida à mesma tensão de pré-cisalhamento, apresentará o comportamento ilustrado na Figura 19 b), na qual, a amostra só será deformada quando atingir a tensão de escoamento incipiente. Passada a tensão que se inicia o escoamento, a tensão mensurada de atrito será a mesma da condição de subconsolidação.

Tomando a Figura 19, observa-se que com o tempo, tanto a curva de densidade quanto a curva de tensão de cisalhamento ficam estáveis e formam patamares, permanecendo este estado inalterado, mesmo com o cisalhamento da amostra em oportunidade posterior. Vale ressaltar que as condições de carregamento são as mesmas para ambos os tipos de consolidação.

Figura 19: Comportamentos diferentes durante o cisalhamento. a) Amostra subconsolidada. b) Amostra superconsolidada.



Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

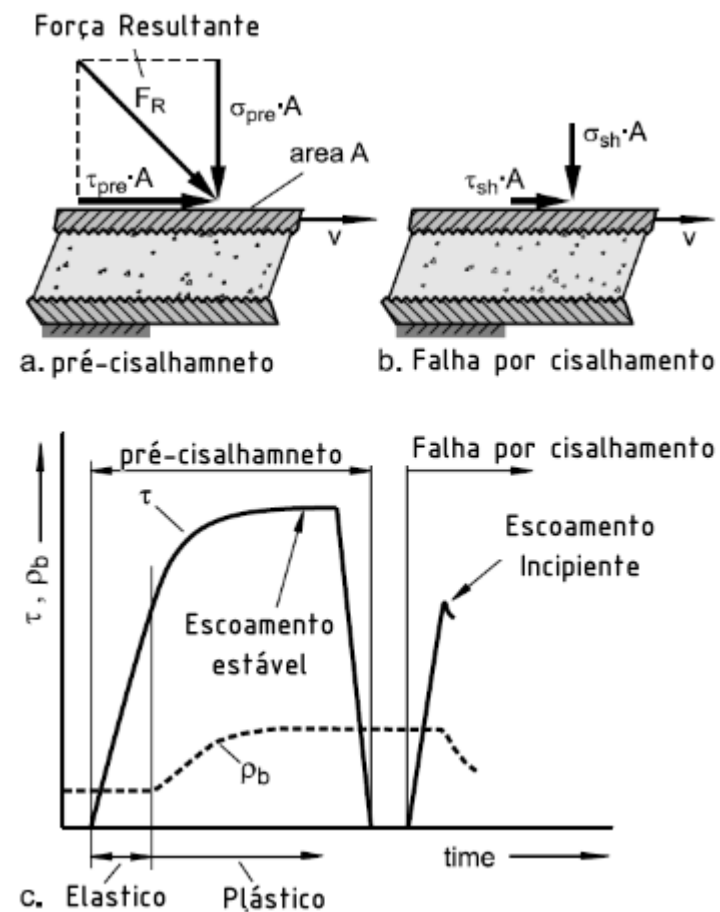
Como o escoamento estável é um processo que transfere a massa sólida uma situação bem definida, sendo esta capaz de ser reproduzida quanto à densidade e resistência ao cisalhamento em novos ensaios, adota-se o procedimento de cisalhar o material até a obtenção de seu estado de escoamento estável. Inicialmente, a amostra está sub consolidada (sem compactação), o que garantirá um espécime homogêneo. Caso se inicie com uma amostra

superconsolidada, o estado estável de escoamento ocorrerá em uma zona estreita de cisalhamento e o restante do material permanecerá com alta densidade, conferindo menor homogeneidade ao material.

Tendo em consideração o enunciado do parágrafo acima, a amostra é preparada com um material sub consolidado (in natura e não compactado) na etapa de consolidação (ou pré-cisalhamento), na qual a mesma carregada com uma tensão normal vertical $\sigma = \sigma_{pre}$, chamada de tensão normal de pré-cisalhamento, após esta etapa, o material é cisalhado.

A tensão de cisalhamento, τ , aumenta com o tempo, como pode ser visto na Figura 20 c) , nesta, ocorre um aumento linear, indicando que a massa sólida está se deformando elasticamente.

Figura 20: Tensão de Cisalhamento, pré-cisalhamento e falha por cisalhamento.



Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

Com o tempo, a curva da tensão de cisalhamento x tempo se torna constante, esse valor de tensão de cisalhamento constante é chamado de τ_{pre} . Após este valor ser alcançado, não

haverá aumento da força de cisalhamento, nem da densidade do material. Schulze (2008) afirma que esta ocorrência de tensão de cisalhamento contínua é chamada de “estado criticamente consolidado com relação à tensão normal, σ_{pre} ” A densidade da amostra, ρ_b , a tensão de cisalhamento, τ_{pre} , são características do estado estável de escoamento, caracterizado pela aplicação da tensão normal σ_{pre} , a qual fora aplicada durante a etapa de pré-cisalhamento.

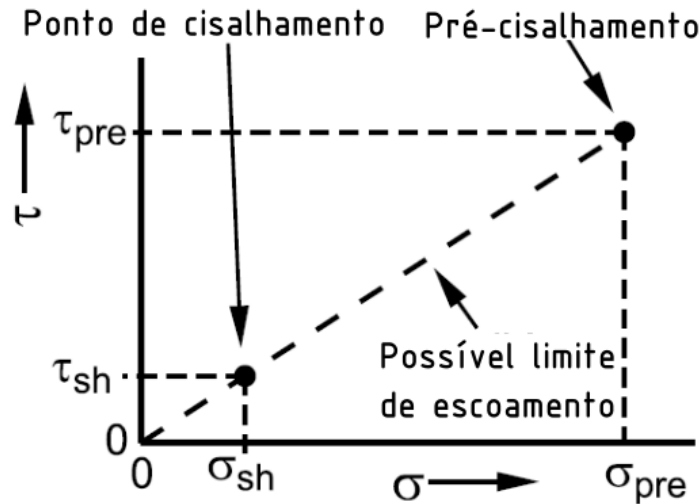
O procedimento de pré-cisalhamento corresponde à etapa de consolidação no ensaio de compressão uniaxial, porém, há mais vantagens frente esta última. Uma das principais vantagens reside na maior certeza em se obter uma amostra homogênea.

2.5.1 Cisalhamento de falha

Após a amostra ser compactada na etapa de pré-cisalhamento (aplicação de σ_{pre} e obtenção de τ_{pre}), o sentido de movimentação é invertido e, assim, a amostra tem sua tensão aliviada. O par de valores da tensão normal e da tensão de cisalhamento (σ_{pre} , τ_{pre}) no escoamento estável é plotado em um gráfico de tensão normal x tensão de cisalhamento (Figura 21), sendo este ponto (σ_{pre} , τ_{pre}) chamado de ponto de pré-cisalhamento.

O segundo passo do procedimento é realizar o cisalhamento de falha, o qual é realizado com a aplicação de uma tensão normal sobre a amostra, sendo o valor igual a σ_{sh} , o qual é menor em relação à tensão de pré-cisalhamento (σ_{pre}). Isso corresponde a cisalhar uma amostra superconsolidada. Pelo fato da amostra ter sido cisalhada previamente com uma tensão maior, σ_{pre} , o material só irá cisalhar quando a tensão de cisalhamento for suficientemente grande para tal fato, sendo este valor caracterizado pela máxima tensão de cisalhamento da Figura 20, caracterizando o escoamento incipiente. O par (σ_{sh} , τ_{sh}) é o ponto de limite de escoamento da amostra consolidada, sendo este ponto chamado de “ponto de cisalhamento” ou “ponto do escoamento incipiente”, o mesmo também deve ser plotado no gráfico, assim como na Figura 21

Figura 21: Diagrama σ, τ com a demarcação dos pontos de pré-cisalhamento e escoamento incipiente (ponto de cisalhamento).



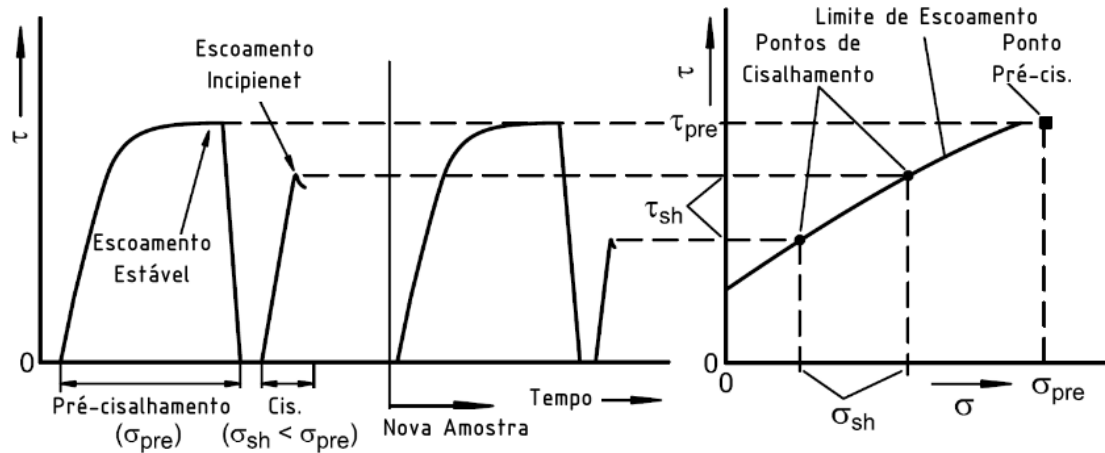
Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

Com o intuito em se determinar o limite de escoamento do material, vários testes devem ser realizados, nos quais as amostras devem ser previamente compactadas (consolidadas) à uma tensão normal, σ_{pre} , então, as amostras são cisalhadas sob uma tensão normal $\sigma_{sh} < \sigma_{pre}$. Como mencionado, pelo fato das amostras serem compactadas sob a mesma tensão de pré-cisalhamento, as mesmas adquirem o mesmo estado de consolidação.

A Figura 22 apresenta diferentes ensaios de cisalhamento, na qual se observa o gráfico com mais de um ponto plotado, cada qual com um ponto de cisalhamento (σ_{sh}, τ_{sh}), porém com o mesmo ponto de pré-cisalhamento (σ_{pre}, τ_{pre}). Vale ressaltar que não se pode pré-cisalhar a amostra uma única vez e então medi-la em vários pontos de escoamento incipiente.

O limite de escoamento segue uma curva σ, τ plotada ao longo dos vários pontos de cisalhamento. O limite de cisalhamento, extrapolado além das maiores tensões normais, é usualmente localizado acima do ponto de pré-cisalhamento.

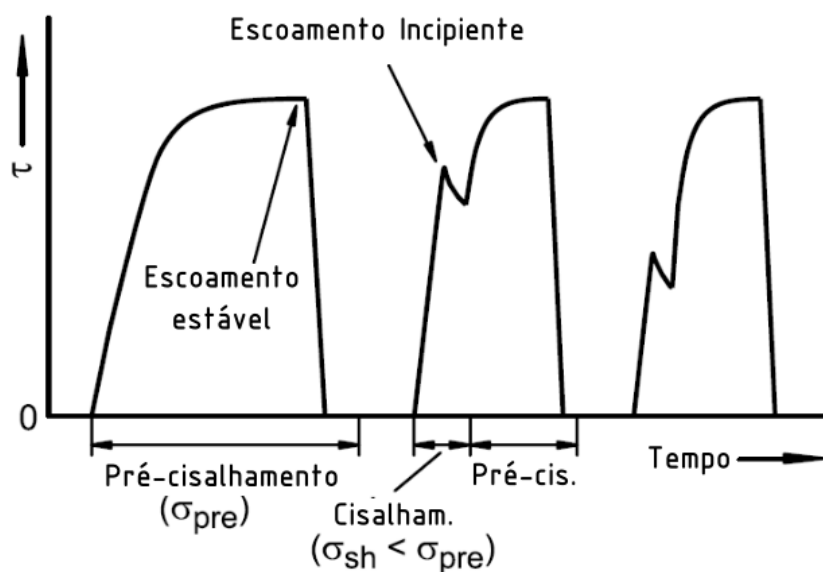
Figura 22: Determinação dos limites de escoamentos mediante diferentes tensões normais de cisalhamento, porém, sob mesma tensão de pré-cisalhamento



Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

Caso o dispositivo de teste possibilitar uma grande deformação, mais de um ponto do limite de escoamento poderá ser medido com uma única amostra (mesmo material inicial). A Figura 23 detalha este procedimento, na qual a amostra é pré-cisalhada a uma tensão normal, σ_{pre} , e subsequentemente cisalhada pela primeira vez a uma tensão menor σ_{sh} . Após o ensaio, a amostra é compactada novamente com a pré-carga e então cisalhada novamente.

Figura 23: Procedimento de medição para vários pontos em um único material de amostra.



Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

Vários testes deverão ser feitos para a tomada da curva do limite de escoamento, nos quais, as amostras serão consolidadas sob a mesma tensão normal de pré-cisalhamento (σ_{pre}) e, após cada obtenção do estado de escoamento estável, um valor diferente de tensão de compressão para cisalhamento (σ_{sh}) será adotado, de forma a obter o respectivo valor de cisalhamento que representará o seu estado de falha, representado pelos valores de τ_{sh} , demonstrado na Figura 22.

Deve-se salientar que para cada ensaio de cisalhamento, deverá ocorrer a etapa de pré-cisalhamento, já que o escoamento anterior cria regiões de menores densidades (afastamento de partículas), conferindo uma rota para um escoamento facilitado.

2.5.2 Propriedades e Locus de Escoamento

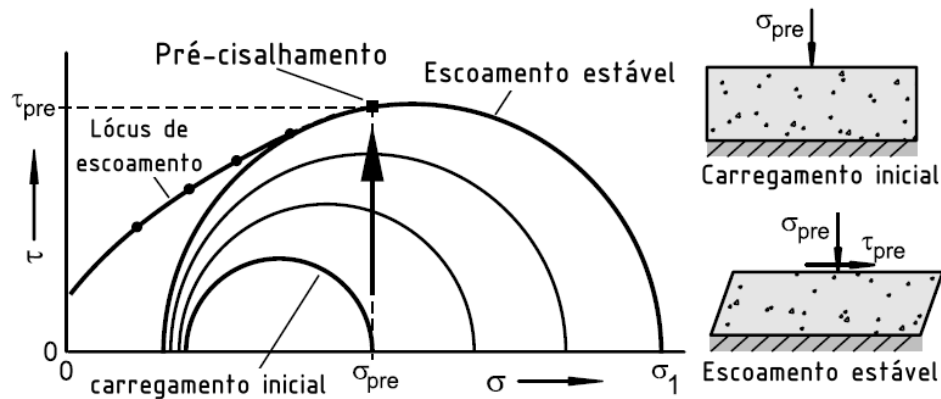
“Locus de escoamento”¹ é uma curva de coeficiente angular positivo que, na maioria dos casos, apresenta ligeira concavidade voltada para baixo, a mesma é obtida por meio dos diferentes pontos de cisalhamento (σ_{sh} , τ_{sh}) sob um mesmo ensaio de pré-cisalhamento, sendo este válido para uma única tensão normal de pré-cisalhamento (σ_{pre}), sendo que para valores diferentes desta grandeza, novos valores deverão ser obtidos. A Figura 22 apresenta em detalhes a obtenção desta curva. A importância desta curva reside na determinação de inúmeros parâmetros de escoamento da massa sólida.

Cada ponto em um círculo de Mohr representa um valor de tensão normal e de cisalhamento em um plano particular da amostra, o que contribuirá na obtenção do locus de escoamento de determinado ensaio e condição.

Tomando por base a Figura 24, temos o gráfico de σ - τ com um círculo que representa o estado de escoamento estável da amostra no período de pré-cisalhamento, porém, devemos nos atentar ao carregamento inicial da amostra com uma tensão σ_{pre} , sendo esta, a posteriori, submetida à deformação por cisalhamento. Nota-se que com o carregamento inicial, a tensão principal sobre a amostra é a própria tensão de pré-cisalhamento, o que é comprovado pelo ponto sobre o eixo σ , porém, com o decorrer da etapa de cisalhamento para obtenção do escoamento estável, surgirão tensões cisalhantes que farão com que hajam novos planos na amostra que configurem o plano principal, o que é demonstrado na Figura 24 com o aparecimento de novos círculos de Mohr, os quais surgem cada vez mais próximos da tensão principal σ_1 (tensão principal do estado estável).

¹ Tradução própria do autor para o termo em inglês “Yield Locus”

Figura 24: Círculos de Mohr durante a etapa de pré-cisalhamento. Construção do lócus de escoamento

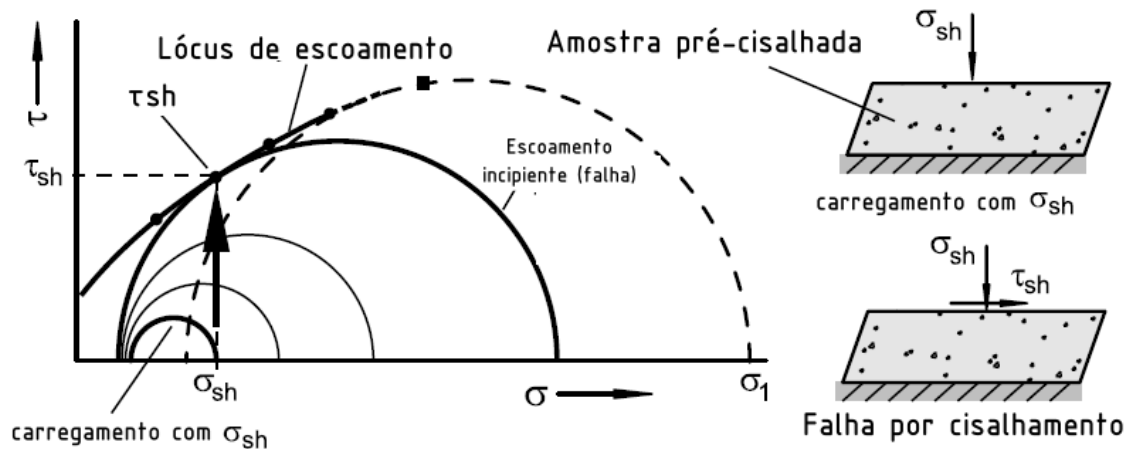


Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

Deve-se atentar ao fato de que as tensões registradas (normais e cisalhantes) são obtidas ao longo do plano horizontal da amostra, desta forma, não há alteração da tensão normal sobre este plano, somente da tensão de cisalhamento, fato caracterizado pelo alinhamento dos pontos sobre um mesmo valor de σ , no caso, σ_{pre} em diferentes círculos. O valor τ_{pre} é caracterizado pelo ponto sobre o círculo de Mohr do escoamento estável que detém o valor de abscissa σ_{pre} , sendo este o ponto que caracteriza o pré-cisalhamento. Normalmente, o ponto de pré-cisalhamento se localiza em ângulos pouco maiores que os 90° em um círculo de Mohr (ponto da tensão máxima de cisalhamento).

A fase de obtenção dos pontos de cisalhamento que culminam em falhas, sendo estes representados pelas diferentes tensões normais σ_{sh} , seguem a mesma dinâmica da etapa de pré-cisalhamento, como pode ser observado na Figura 25, na qual, inicia-se com o carregamento normal σ_{sh} (valor que também representa a principal tensão σ_1) e que, com o início do cisalhamento faz com que novas tensões surjam no interior da massa, levando o plano horizontal a deixar de ser o principal. Os diferentes círculos de Mohr na Figura 25 representam estas variações de tensões, os quais são interrompidos com o escoamento do material, situação representada pelo círculo de escoamento incipiente.

Figura 25: Círculos de Mohr durante o cisalhamento de falha



Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

O valor de cisalhamento no momento da falha, tendo uma tensão normal de compressão σ_{sh} aplicada, representa um dos pontos que compõem o locus de escoamento. Deve-se salientar que neste tipo de teste, assumimos que o escoamento incipiente ocorre no plano horizontal, perpendicular à tensão normal σ_{sh} aplicada, sendo que a tensão cisalhante τ_{sh} é paralela ao vetor velocidade que realiza o deslocamento no ensaio.

A obtenção do locus de escoamento possibilita determinar grande número de parâmetros, por exemplo, ângulo interno de atrito, porém, para os propósitos deste trabalho, a curva em questão possibilita determinar a tensão de cisalhamento de uma massa sólida que inicia o escoamento da mesma, sendo a leitura feita com base na tensão normal σ que intercepta a curva. Deve-se salientar que quanto maior os níveis de compactação de uma massa sólida, maiores as forças necessárias para causar o escoamento da mesma.

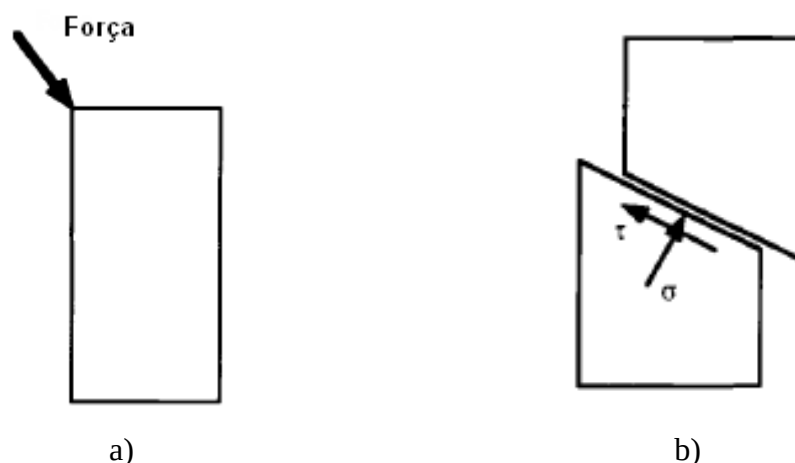
2.6 O CRITÉRIO DE ESCOAMENTO DE COULOMB

O critério de Coulomb interpreta a resistência à ruptura como uma espécie de atrito interno do material. O material em questão fica caracterizado por dois parâmetros, sendo:

- A resistência ao cisalhamento na ausência de tensões normais chamada de “coesão” e dada pela letra c , e;
- O ângulo de atrito interno.

No caso de materiais particulados, quando uma força aplicada alcança determinado valor crítico, o material se divide em dois, assim como apresentado na Figura 26.

Figura 26: Exemplificação da falha por meio do critério de Coulomb. a) Aplicação da força no sólido. b) Deslizamento de plano dividindo o material em dois.



Fonte: Adaptado de Nedderman (1992).

Nedderman (1992) afirma que para muitos materiais, a tensão de cisalhamento no plano de divisão é independente de dimensões e de taxas de deformações (caso dos fluídos), também uma característica comum de materiais plásticos, assim, a teoria de Coulomb assume que a divisão ocorrerá separando o corpo em duas partes e ao longo de uma zona de deformação plástica, podendo esta ser considerada como um plano.

A tensão de cisalhamento pode ser independente dos parâmetros mencionados no parágrafo anterior, porém, a mesma encontra-se dependente da tensão normal que é aplicada sobre o plano, sendo a relação dada pela Equação 11, chamada de Critério de Escoamento de Coulomb, na qual μ e c são, respectivamente, os chamados coeficientes de atrito e coesão, sendo estes funções do material e do estado em que estes se encontram.

$$\tau = \mu \cdot \sigma + c \quad (11)$$

Vale ressaltar nesta parte do texto que o coeficiente de atrito aqui mencionado, μ , não tem correlação direta ao coeficiente de atrito entre o material e a parede do silo, μ_w , o qual fora apresentado em sessão anterior.

O parâmetro c pode ser muito pequeno para alguns materiais, sendo estes chamados de materiais sem coesão, situação que é bem caracterizada pela tentativa em se agrupar esferas

rígidas e polidas. A coesão pode então variar na faixa de 0 a 50 kN/m², maior valor observado em algumas argilas. Vale ressaltar que tal parâmetro sofre alteração mediante aspectos do ambiente, como grau de umidade, temperatura, tempo, compactação, entre outros. O coeficiente de atrito, por sua vez, se encontra entre valores da ordem de 0,3 (bolas rígidas e polidas) a 1,5 (particulados angulares), sendo esta grandeza dada em função do ângulo interno de atrito Φ , sendo este dado pela Equação 12

$$\tan(\phi) = \mu \quad (12)$$

Mais uma vez, a faixa do ângulo interno de atrito, Φ , se localiza entre 20° e 50°, sendo o menor valor para com o caso de esferas rígidas e polidas; o maior, caso de particulado angular.

O Critério de Coulomb é assim aplicado junto ao círculo de Mohr para determinar a tensão de cisalhamento capaz de causar o escoamento do material, resultando no Critério de Falha de Mohr-Coulomb. Este critério é o mesmo do lócus de escoamento, o qual fora previamente explicado e que gera uma reta que se assemelha à reta de Coulomb, sendo esta descrita pela Equação 11. Para entendermos a sua utilização, o mesmo será explicado com base em três possibilidades de reta junto ao círculo de Mohr de carregamento do material. As possibilidades são exemplificadas por meio da Figura 27.

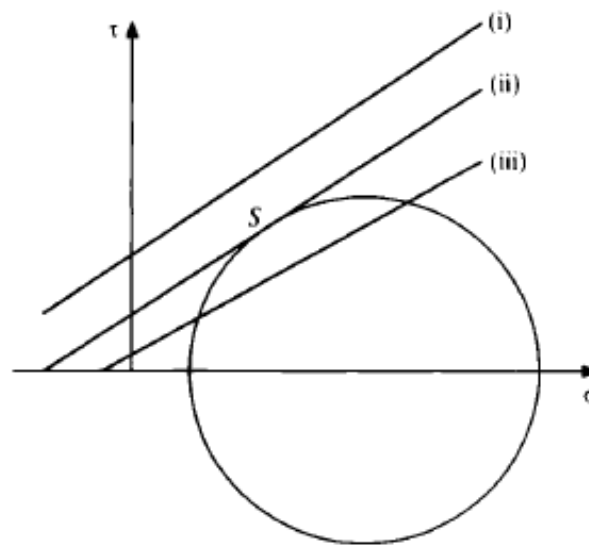
- i. A linha de Coulomb (Lócus de Escoamento) passa inteiramente por cima do círculo de Mohr, como mostrado por meio da reta (i) na Figura 27. Assim $\tau < \mu\sigma + c$, culminando na ausência de plano que possa sofrer escoamento, temos assim o estado estável e de equilíbrio do material.
- ii. A linha (ii) toca o círculo no ponto S, o que equivale a dizer que $\tau = \mu\sigma + c$, assim, temos um plano capaz de sofrer deformação, enquanto os demais permanecem intactos (situação i). O plano que escoou é o plano de escoamento incipiente.
- iii. Se a reta corta o círculo de Mohr, como em (iii), existem planos nos quais $\tau > \mu\sigma + c$, o que contradiz o critério e a física, já que alcançado o valor do critério, o material já escoou e assim impossibilita que valores maiores de tensão de cisalhamento sejam alcançados.

A análise de Mohr-Coulomb é então baseada no fato de que o escoamento ocorre quando uma linha de Coulomb (locus) toca o círculo e que esta, sob nenhuma circunstância, corte o círculo como a linha (iii) da Figura 27.

Pelo fato do critério de Coulomb não estar preocupado com o sentido do escoamento do material (sentido da tensão de cisalhamento), o mesmo é melhor apresentado pela Equação 13, o que é exemplificado pela presença de duas linhas simétricas que tangenciam o círculo de Mohr sob a mesma tensão de compressão do plano, porém, com tensões de cisalhamento opostas.

$$|\tau| = \mu \cdot \sigma + c \quad (13)$$

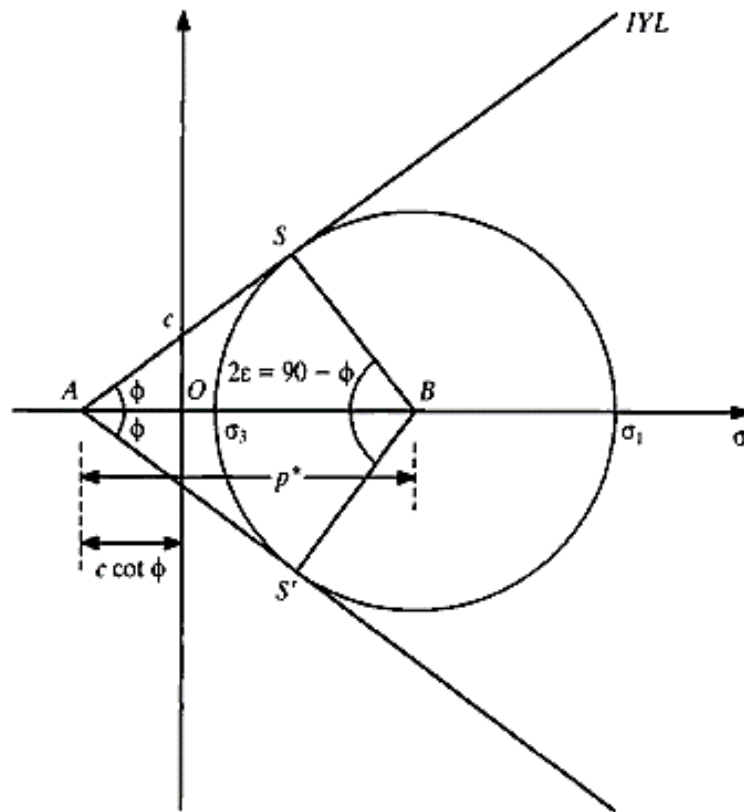
Figura 27: Círculo de Mohr e a linha de Coulomb. Exemplo das possibilidades de carregamento e falha.



Fonte: Nedderman (1992).

Nedderman (1992) em seu livro “*Statics and kinematics of granular materials*” apresenta a Figura 28, a qual apresenta as retas de Coulomb tocando os planos S e S’, situação que corresponde ao escoamento do material. Destaque para alguns lugares geométricos da figura que podem facilitar na aquisição de informações.

Figura 28: Critério de falha de Mohr-Coulomb



Fonte: Nedderman (1992).

3 PROPOSIÇÃO (ESTUDO DE CASO)

3.1 O PROJETO ORIGINAL E AS ALTERAÇÕES (SISTEMA ATUAL)

Os silos em estudo são um total de quatro equipamentos idênticos (Figura 29), os quais alimentam duas caldeiras de biomassa, sendo destinados dois equipamentos por fornalha. Os mesmos foram confeccionados ao final de década de 1980 e são equipamentos de fundo chato, os quais contam com o sistema de rosca extratora e dosadora, estando presente dois dispositivos deste tipo por silo. O anexo deste texto apresenta desenho do fabricante que ilustra o equipamento original.

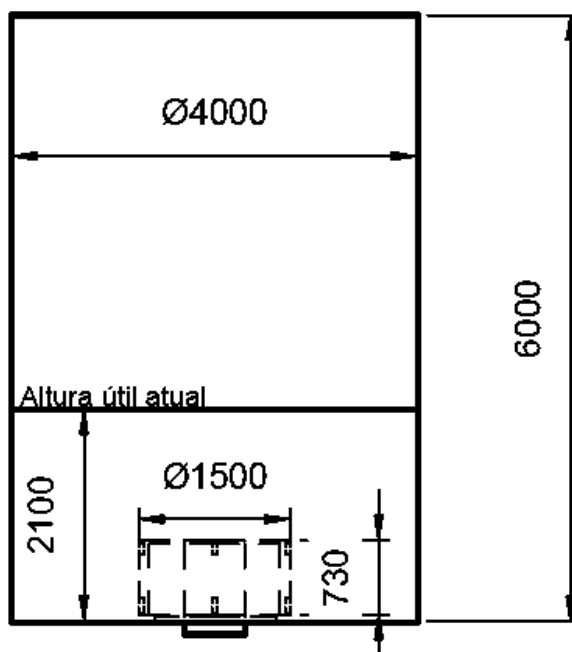
Figura 29: Silos de Biomassa das caldeiras de força



Fonte: O Autor (2019).

Além das roscas extratoras, os silos contam com um dispositivo que auxilia no descarregamento de material, bem como evita a formação de arco, descarregamento excêntrico, formação de tunelamento (*“ratholing”* ou *“piping”*), entre outros acontecimentos indesejáveis. É este dispositivo o foco de nosso trabalho, já que alterações no mesmo resultaram na perda de capacidade de trabalho do equipamento, culminando na disposição de volume que corresponde a uma altura de 35% de sua altura útil, em números, o silo que poderia receber um volume correspondente a 6m de altura, atualmente, só opera com altura máxima de 2,1 m. A Figura 30 apresenta um desenho que ilustra as informações até aqui mencionadas, ao passo que Tabela 1 apresenta os dados dos equipamentos.

Figura 30: Dimensões do Silo. Detalhe do tambor do dispositivo de auxílio de descarregamento e demarcação da altura útil de armazenamento.



Fonte: O Autor (2019).

Tabela 1: Características dos silos de biomassa

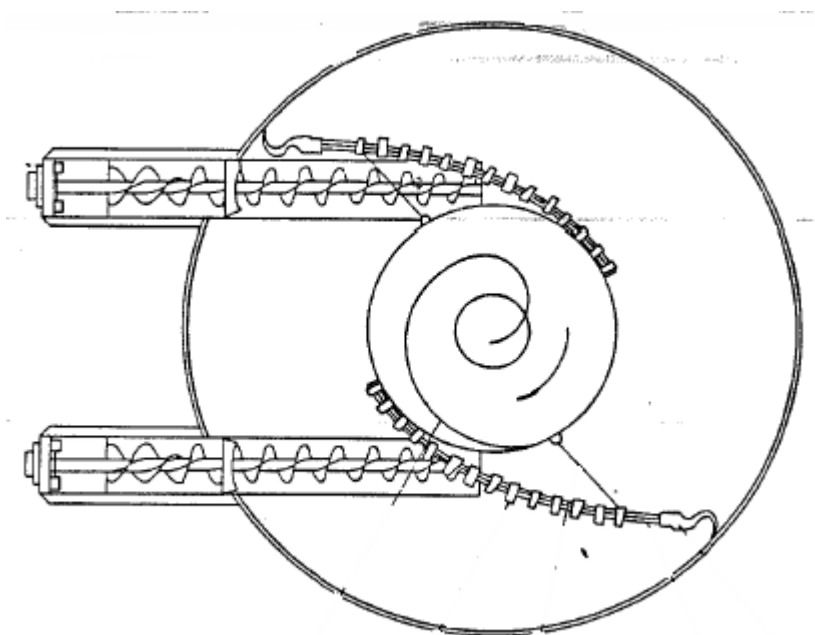
Características do Silo	
Tipo	Cilíndrico
Capacidade de Descarga	24 ton./h
Qtd. Rosca Extratora	2
Diâmetro	4000 mm
Altura útil	5946,8 mm
Altura Total	6896,8 mm

Fonte: Manual do Equipamento (1988).

A Figura 31 apresenta um desenho do interno do silo que mostra o dispositivo original que auxiliava as roscas durante o descarregamento. Este equipamento de auxílio é chamado de Rotor, sendo oriundo da empresa alemã SHW, companhia dedicada à elaboração de equipamentos destinados a armazenagem e movimentação de materiais. Na Figura 31, podemos observar os dois braços, de comprimento de 2450 mm, os quais estão

diametralmente opostos ao tambor, porém, fixados em alturas diferentes. O Tambor apresenta diâmetro de 1500mm e altura de 730 mm.

Figura 31: Desenho de topo do interno do Silo. Destaque para com o sistema rotor que auxilia as roscas na operação de descarregamento.



Fonte: Manual do Equipamento (1988).

O Rotor é um equipamento que apresenta dois braços metálicos, sendo estes confeccionados como feixe de molas (tecnologia usada na suspensão de caminhões) e que são fixados em uma de suas extremidades a um tambor, o qual é acoplado a uma árvore que lhe transmite o torque necessário para que toda a estrutura gire, movimentando a biomassa no interior do silo. A Figura 32 apresenta a ilustração semelhante ao dispositivo original.

Figura 32: Rotor- equipamento que auxilia no descarregamento de materiais.



Fonte: SHW (2019).

O modo de fabricação do rotor é algo muito bem elaborado e engenhoso, já que pelo fato dos braços serem molas (Figura 33) permite que os mesmos se aproximem do tambor, ao qual estão acoplados, diminuindo o volume a ser varrido de material, o que resulta em um menor torque à estrutura. A aproximação é realizada mediante o nível de carregamento do equipamento, assim, quanto mais cheio o silo, mais próximo estarão os braços do tambor. A influência da expansão dos braços sobre o material, será melhor abordada no decorrer deste trabalho.

Figura 33: Confeção dos braços de arraste do rotor. (Cortesia SHW)



Fonte: SHW (2019).

Contudo, o dispositivo veio a apresentar falhas em serviço, sobretudo em seus braços de arraste, culminando na alteração do equipamento. Relatos de quebras frequentes do braço, como desprendimento e quebras de lâminas da mola, além da quebra da junção do gancho, localizado em sua extremidade, fizeram com que a área técnica da unidade optasse por substituir os braços originais por um perfil rígido e soldado nos tambores, como pode ser visto na Figura 34.

Pode ser observado na Figura 34 que os braços fixos não cobrem todo o diâmetro do equipamento, assim, material se acumula nas paredes do silo, sendo um fato indesejado, já que faz com que o mesmo sofra uma maior coesão causada pelo aumento do período de contato entre partículas, resultando em esforços maiores para cisalhar a massa.

Antes de qualquer tipo de conclusão a respeito da situação, deve ser salientado que as manutenções nos braços originais necessitavam serem feitas com grande frequência, sobretudo no que condiz à lubrificação das lâminas da mola, já que há movimento relativo entre as mesmas durante a aproximação dos braços junto ao tambor. No que condiz a estes equipamentos, as manutenções não eram feitas de forma ideal e os mesmos trabalhavam (ainda hoje) em regime ininterrupto, o que pode ter potencializado as quebras dos mesmos.

Figura 34: Sistema auxiliar de descarregamento atual.- Destaque para os braços rígidos soldados no tambor.



Fonte: O Autor (2019).

O sistema motriz que movimentava todo este aparato ainda é utilizado nos dias atuais, trata-se de motor elétrico que transmite, por polias de 4 correias, a potência de entrada em redutor helicoidal, que por sua vez, transmite a um redutor planetário, que por fim, confere o

torque à árvore que está acoplada ao tambor, como pode ser observado na Figura 35. Salienta-se que ambas as polias (motora e motriz) são iguais em diâmetro. A Tabela 2 apresenta os dados dos componentes que fazem parte do sistema.

Figura 35: Conjunto motriz do Rotor de um silo.



Fonte: O Autor (2019).

Tabela 2: Dados mecânicos do Sistema Rotor dos silos.

Motor		
	Fabricante	WEG
	Tipo	Dahlander
	Carcaça	180M
	Potência	10/16 CV
	Nº polos	8/4
	Conjugado	81/64,8 Nm
	Rotação Nominal	885/1770 rpm
	Tensão	440V
	Freq.	60 Hz.
Polia Motora e Motriz		
	Diâmetro	236,5 mm
	Qtd. Correias	4
	Perfil	V
Redutor Planetário		
	Fabricante	SHW
	Taxa de redução	1:22,5
Redutor Helicoidal		
	Fabricante	SEW
	Taxa de redução	1:20,77

Fonte: Manual do Equipamento (1988).

Vale ressaltar que o motor tipo Dahlander é um motor trifásico que permite a variação de velocidade através da comutação de polos, com isso, a depender do nº de polos em sua ligação, o mesmo pode oferecer uma velocidade maior ou menor, as quais se correlacionam de forma inversa aos torques que os mesmos podem oferecer. Utilizando-se das informações presentes na Tabela 2, podemos determinar a potência, velocidade e o torque nominal na saída do sistema (rotor), presentes na Tabela 3.

Tabela 3: Torques e Potências máximas a serem fornecidos no sistema instalado

	Configuração 1	Configuração 2
Redução:	1:467,325 (disposição em série dos redutores)	
Ligação Motor	4 polos	8 polos
Potência (kW)	11,77	7,36
Veloc. Rotor (rpm)	3,79	1,89
Torque-Rotor (kNm)	30,28	37,85

Fonte: O Autor (2019).

3.2 SUGESTÃO DO FABRICANTE

Mediante a ineficiência do equipamento, foi realizada uma consulta junto ao fabricante para obtenção de uma alternativa ao sistema. Em resposta, foi sugerido o sistema original, porém, o mesmo sendo capaz de fornecer torque de 70 kNm, sob a mesma potência consumida, o que evidência a mudança de redutores no equipamento.

4 METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 NOVO SISTEMA

Nesta etapa, será sugerido um novo sistema de descarregamento do silo, o qual será modelado com base no mecanismo de rotor, porém, com os braços fixos, mantendo assim a forma de descarregamento da biomassa que é encontrada em nosso objeto de estudo. Mediante o que fora exposto na revisão bibliográfica, o modelo será baseado em suposições, já que não foram realizados ensaios para a determinação dos parâmetros reais do material. Serão utilizados valores que condizem com o observado na literatura técnica, os quais servirão ao propósito de realizar comparações aos demais modelos mencionados (o atualmente empregado e o proposto pelo fabricante SHW). O intuito do trabalho será o levantamento da potência e torque necessários para movimentar a biomassa. A Figura 36 apresenta imagens do material manipulado nos silos.

Figura 36: Biomassa. a) Registro do interior do Silo durante período de inspeção. B) Detalhe da composição da biomassa.

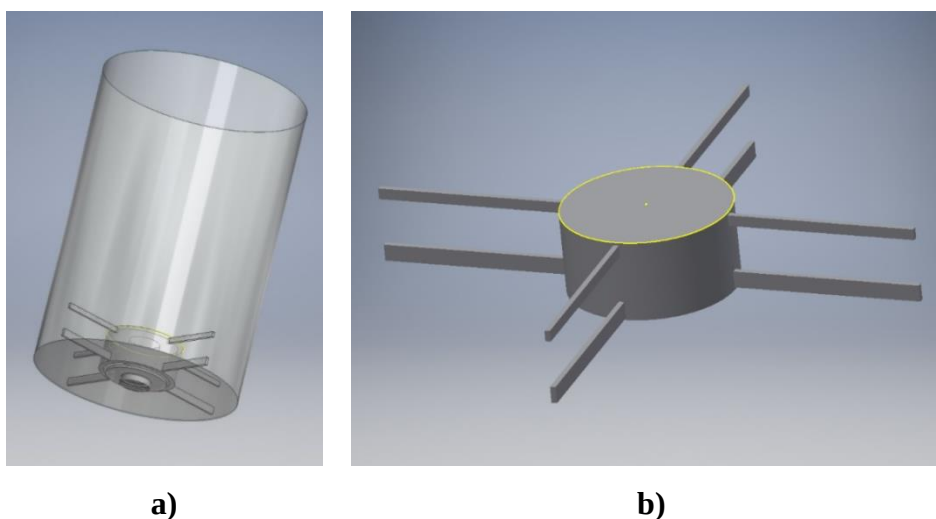


Fonte: O Autor (2019).

Assume-se que todo o volume do silo será ocupado, assim, serão feitos os cálculos considerando uma altura útil de 6m sobre uma área circular de 4 m de diâmetro. O material que preencherá o espaço é a biomassa, que é obtida durante o processamento das toras de madeira, sendo subproduto do processo de descascamento e picagem. A mesma é composta por cascas de eucalipto, folhas, cavacos descartados (por exemplo, cavacos escuros ou aqueles que se encontram fora da faixa de tamanho ótimo ao processo), entre outros materiais de origem vegetal, como pôde ser visto na Figura 36. Será assumido que este material possui densidade de 180kg/m^3 , informação retirada do “*databook*” do silo e que considera este valor como sendo de base úmida em 50% (metade da massa sendo água), material isento de compactação e com granulometria máxima de 100mm. Além desta informação, supor-se-á que:

- Efeitos de compactação e deformação do material (biomassa) serão desprezados;
- Será assumido que o material age como um sólido rígido-plástico, mediante o critério de escoamento de Coulomb;
- As tensões obtidas nos volumes de controle serão correlacionadas às tensões do modelo de Janssen, logo, assume-se a condição de material em equilíbrio;
- Será assumido que os braços alimentadores serão rígidos e dispostos de forma radial no interior do equipamento, estando estes separados em 90° um dos outros, além disso, será preservada a característica de dois níveis (altura) de braços, configuração melhor ilustrada na Figura 37.

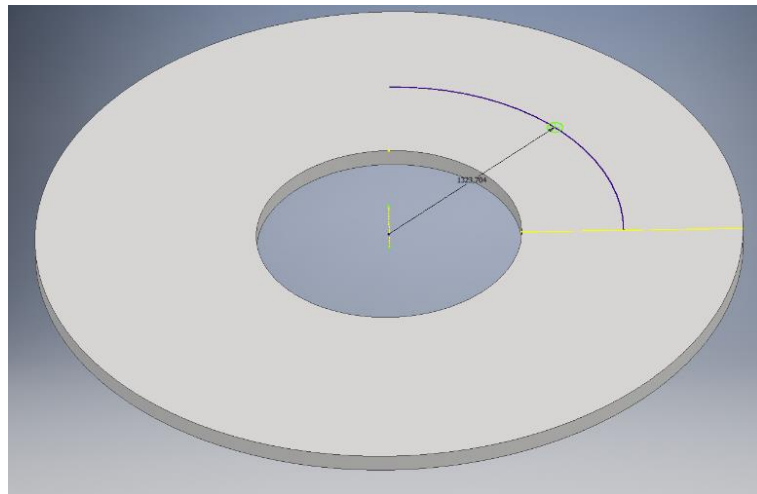
Figura 37: Modelo adotado para estudo do silo. a) Disposição do rotor no silo. b) Rotor em detalhe



Fonte: O Autor (2019).

Seguindo o modelo confeccionado, deve-se determinar as forças necessárias para que o conjunto funcione, com isso, o modelamento será feito com base em volumes de controle na forma de anel, os quais serão compostos pela fatia de biomassa correspondente ao nível dos braços que as movimentam. O volume de controle adotado é apresentado na Figura 38.

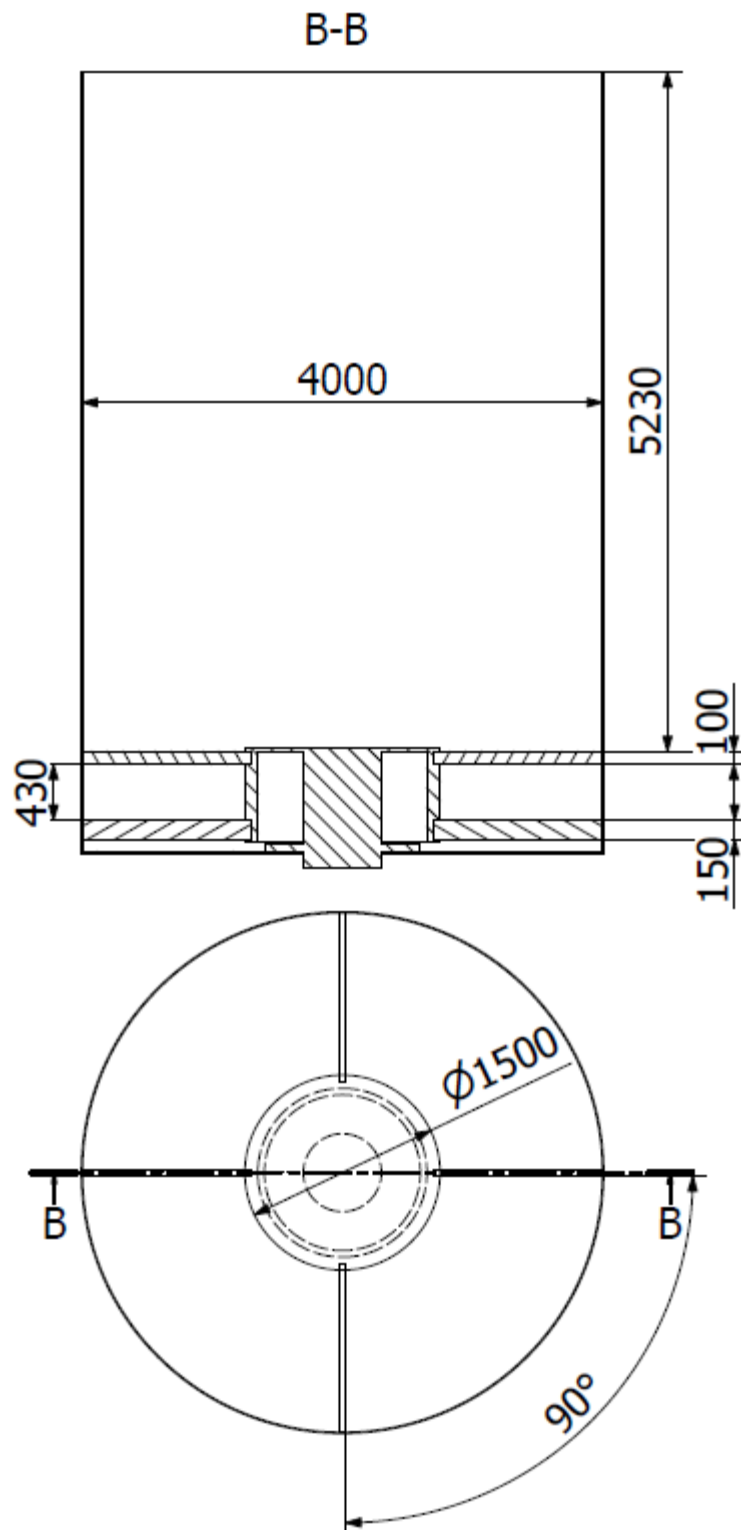
Figura 38: Volume de controle adotado no modelamento. Anel de biomassa para com determinado nível de braços alimentadores



Fonte: O Autor (2019).

A Figura 39 ilustra o modelo utilizado, bem como contém as informações dimensionais que serão utilizadas nos cálculos a serem apresentados.

Figura 39: Representação do silo para com o modelo proposto.



Fonte: O Autor (2019).

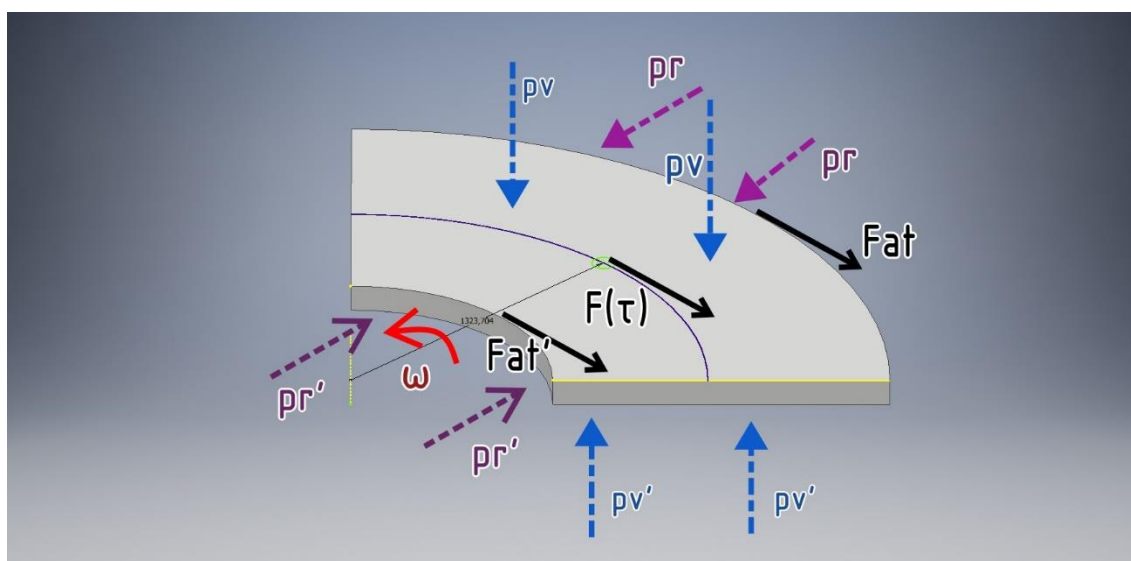
A Figura 40 apresenta as forças de interesse, as quais serão responsáveis pela criação de torques contrários ao movimento. Mediante o teorema de Coulomb, os cálculos serão

realizados, principalmente, na determinação das forças necessárias de cisalhamento para que o anel possa rotacionar dentro do silo.

No geral, serão consideradas forças de atrito (F_{at} e F_{at}') as quais são forças de contato e se localizarão na periferia do volume de controle, no caso, a parede do silo e a parede do tambor, sendo as mesmas oriundas das pressões normais a estas áreas, dadas pelas pressões horizontais p_r e p_r' . As forças de cisalhamento, $F(\tau)$, serão obtida mediante a determinação das pressões verticais, dadas por p_v e p_v' , estas serão obtidas mediante a aplicação da fórmula de Janssen, seguida pela elaboração da teoria de Mohr-Coulomb para com as pressões encontradas o que resultará na obtenção das tensões de cisalhamento nas faces dos anéis.

Mais uma vez, será salientado que os procedimentos que serão desenvolvidos consistem em estimativas para com o projeto proposto, sendo de extrema importância a realização dos ensaios citados na revisão bibliográfica para a determinação das propriedades da biomassa.

Figura 40: Representação das forças sobre parte do volume de controle.



Legenda:

- F_{at} : Força de atrito causada pela parede do silo;
- F_{at}' : Força de atrito causada pela parede do tambor; (presente em regiões fora do caminho dos braços)
- $F(\tau)$: Força causada pelo cisalhamento- presente na face superior e inferior do anel;
- ω : velocidade angular (sentido de giro)
- p_r : pressão horizontal de Janssen (Parede do silo)
- p_r' : pressão horizontal de equilíbrio a p_r (parede do tambor)
- p_v : pressão vertical de Janssem (coluna de material)- face superior
- p_v' : pressão vertical de Janssem- face inferior

Fonte: O Autor (2019).

Serão apresentados de forma minuciosa os resultados para com as forças presentes no anel superior, o qual corresponde ao volume movido pelo conjunto de braços localizados na parte mais alta do tambor, a partir desta apresentação, os valores do anel inferior serão apresentados, porém, não será dada a mesma ênfase, já que os procedimentos são os mesmos da porção citada.

Anel Superior

Inicialmente, serão determinadas as pressões verticais e horizontais sobre o anel, para isto, será aplicada a Equação 5 da revisão bibliográfica

$$p_r = \frac{\rho_b \cdot g \cdot D}{4 \cdot \mu_w} \left(1 - \exp \left(- \frac{4 \cdot \mu_w \cdot k \cdot h}{D} \right) \right) \quad (5)$$

onde:

$\rho_b=180\text{kg/m}^3$ (massa específica da biomassa)

$g=9,81 \text{ m/s}^2$ (aceleração da gravidade)

$D=4\text{m}$ (Diâmetro do silo)

$\mu_w=0,4$ (coeficiente de atrito entre a biomassa e a parede do silo, aceitam-se valores entre [0,2;06];

$k=0,4$ (razão entre pressão horizontal p_r e pressão vertical p_v [Equação 2]. O valor selecionado deveria ser obtido por ensaio, por meio da determinação do ângulo interno de atrito, Φ_i [ver Equação 3]. A escolha do mesmo se dá com base nas observações de Nedderman (1992) e na grande incidência deste valor para com diferentes materiais)

$h=5,23\text{m}$ para a face superior do anel e $5,33\text{m}$ para a face inferior.

Os valores de p_v para as faces superior e inferior deste anel são obtidas por meio da aplicação da Equação 2, a qual se utiliza do valor $k=0,4$ e dos valores de p_r obtidos. A Tabela 4 apresenta os valores obtidos nesta etapa.

$$p_r = k \cdot p_v \quad (2)$$

Aproveitando a oportunidade, será aplicada a Equação 3 para determinação do ângulo interno, sendo esta dada por:

$$K = \frac{1 - \sin(\phi_i)}{1 + \sin(\phi_i)} \quad (3)$$

Tabela 4: Determinação das pressões nas faces do anel superior e ângulo de atrito interno.

Parâmetros	Face Superior	Face Inferior
pr (pr') [N/m²]	2501,84	2532,18
pv (pv') [N/m²]	6257,60	6333,50
Φ_i	25,39°	

Fonte: O Autor (2019).

Obtido os valores das pressões, principalmente os das pressões verticais (pv e pv'), o próximo passo é a determinação do círculo de Mohr utilizando estes valores como tensões de pré-cisalhamento, assim, será seguido algumas proporções que a literatura técnica menciona para elaboração do círculo de Mohr e da reta de Coulomb.

O procedimento aqui descrito será dado em passos, devendo realizar um círculo de Mohr para com cada face do anel, já que muda a pressão de pré-cisalhamento. Faremos o passo-a-passo para com a face superior, onde pv=6257,60 N/m².

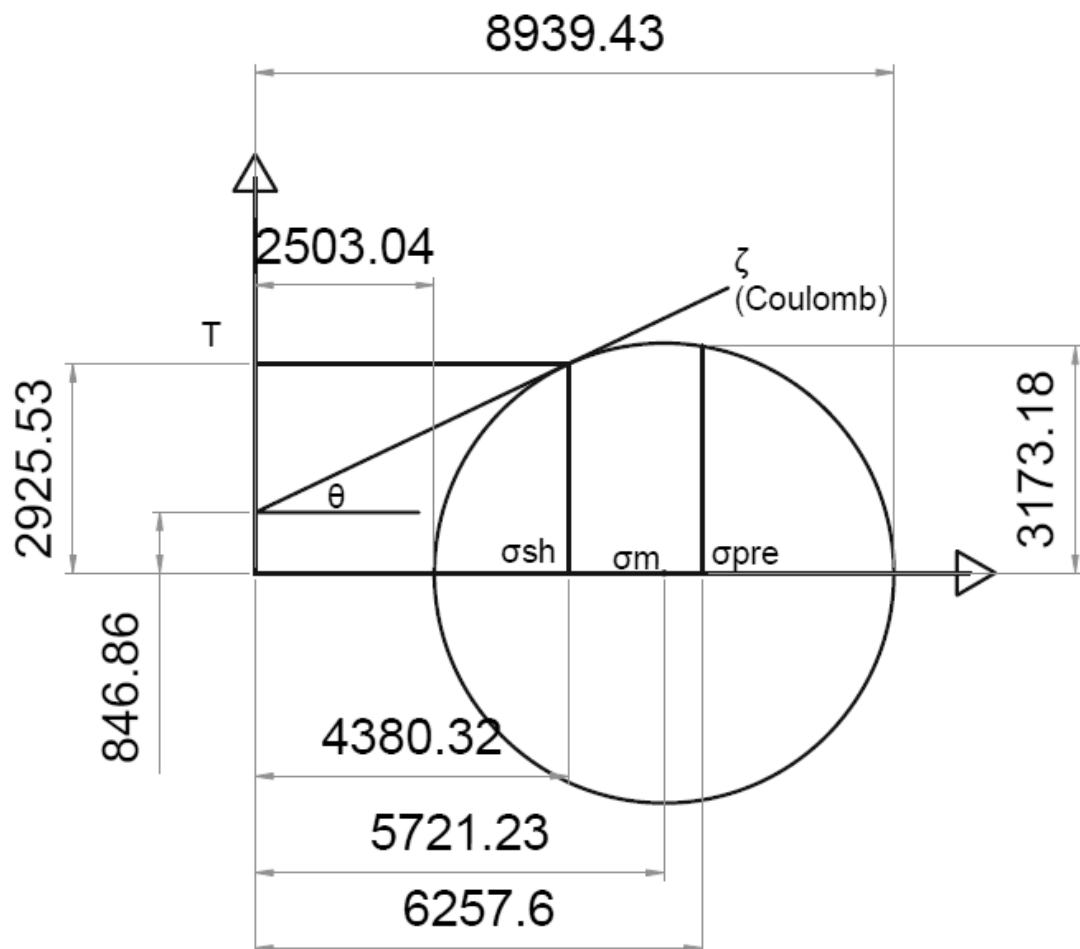
- 1) Considerar como tensão de pré-cisalhamento (σ_{pre}) o valor pv (=6257,60 N/m²);
- 2) Considerar como σ_2 o valor de 40% de σ_{pre} . Schulze (2008) menciona que o valor de tensão mínima no círculo de Mohr fica entre 40 a 50% do valor de σ_{pre} . (=2503,04 N/m²)
- 3) Para σ_1 adotar a razão $\sigma_{pre}/\sigma_1=0,7$. Schulze (2008), em sua obra, afirma que esta razão abrange valor no intervalo [0,3;0,7].(=8939,43 N/m²)
- 4) Determinada as tensões principais, o centro círculo, dado por σ_m é dado por $\sigma_m=(\sigma_1+\sigma_2)/2$. (=5721,23 N/m²)
- 5) O raio do círculo, R, será: $R=(\sigma_1-\sigma_2)/2$ (3218,2 N/m²)
- 6) A tensão normal de falha, representada aqui por σ_{sh} será, aproximadamente, 70% do valor de σ_{pre} , sendo que a literatura menciona intervalos de 25 a 80% deste valor.(=4380,32 N/m²)
- 7) A tensão de falha de cisalhamento pode ser obtida por meio da equação do círculo, dada pela Equação 14, resultando em $\tau=2925,53$ N/m².

$$(\sigma - \sigma_m)^2 + \tau^2 = R^2 \quad (14)$$

- 8) A reta de Coulomb é obtida por meio da Equação 13, dando como coesão o valor de $846,59 \text{ N/m}^2$
- 9) Por meio da Equação 14, também pode ser determinado o valor da tensão cisalhante na etapa de pré-cisalhamento, dada por τ_{pre} , sendo igual a $3173,18 \text{ N/m}^2$.

A Figura 41 apresenta a representação gráfica da determinação da tensão de cisalhamento sobre a face superior do anel mais alto. Destaque para com o valor de coesão, o qual representa a tensão interna do material sem o mesmo estar sob carregamento.

Figura 41: Teoria de Mohr-Coulomb na determinação da tensão de cisalhamento da face superior do anel superior.



Fonte: O Autor (2019).

A Tabela 5 apresenta os valores referentes à análise de Mohr-Coulomb para com o anel superior.

Tabela 5: Valores oriundos da análise de Mohr-Coulomb para com o anel superior. Destaque para a obtenção das tensões de cisalhamento nas faces.

Face	σ_{pre} [N/m ²]	σ_2 [N/m ²]	σ_1 [N/m ²]	σ_m [N/m ²]	R [N/m ²]	σ_{sh} [N/m ²]	T [N/m ²]	c (coesão) [N/m ²]
Superior	6257,60	2503,04	8939,43	5721,23	3218,19	4380,32	2925,53	846,59
Inferior	6333,50	2533,40	9047,85	5790,63	3257,23	4433,45	2961,01	856,86

Fonte: O Autor (2019).

A obtenção da Força de cisalhamento e, conseqüentemente, o torque presente em uma face, é obtido por meio da utilização da tensão de cisalhamento obtida na etapa anterior, deste modo, temos a força de cisalhamento sendo obtida pela simples multiplicação da tensão de cisalhamento pela área do anel, representada pela Equação 15.

$$dF = \tau \cdot dA \quad (15)$$

Integrando a equação anterior, tem-se como resultado a Equação 16, dada por:

$$F = \int_0^{2\pi} \int_{0,75}^2 \tau \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \quad (16)$$

A equação do torque é dada pela Equação 17, onde:

$$T = \int_0^{2\pi} \int_{0,75}^2 \tau \cdot r^2 \cdot dr \cdot d\theta \quad (17)$$

Deste modo, tem-se os seguintes resultados, expressos pela Tabela 6.

Tabela 6: Forças e Torques de cisalhamento nas faces do anel superior

	Força Cis. [N]	Torque [Nm]	re [m]
Face superior	31593,45	46432,80	1,47
Face Inferior	31976,65	46995,98	1,47

re= raio equivalente para aplicação do torque (a partir do centro do silo)

Fonte: O Autor (2019).

Em relação ao anel superior, resta a realização do cálculo referente ao atrito da parede do silo na face exterior do anel, para isto, foi determinada a pressão no centro desta face (Equação 5), a qual tem 10 cm de altura (dh), com isto, foi adotado o valor de 5,28 m para h, resultando em uma pressão de 2517,07 N/m². A obtenção da força foi realizada através da multiplicação desta pressão pela área lateral externa do anel vezes o coeficiente de atrito da parede, μ_w , sendo este 0,4. Assim, tem-se a seguinte equação para o atrito lateral, dada pela Equação 18, resultando em uma força de **1265,22 N**.

$$Fat = pr \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot dh \cdot \mu_w \quad (18)$$

O torque, por sua vez é dado pela multiplicação da força de atrito pelo raio de aplicação, que é o próprio raio do disco, no caso, 2m. Resultando em torque de **2530,43 Nm**. No caso dos braços, não se tem a força de atrito agindo na parede do tambor, já que a biomassa e esta região do equipamento são solidários.

Desta forma, o torque exclusivo do anel superior é de 95,96kNm.

Anel Inferior

Devido à proximidade deste anel junto ao fundo do silo, na face inferior do mesmo, será adotado a existência de força de atrito, ao contrário do que foi admitido no anel superior, já que esta tensão é menor do que a de cisalhamento, assim, serão apresentados na mesma sequência do anel superior os dados pertinentes a este volume de controle. A Tabela 7 apresenta os valores da análise de Mohr-Coulomb, lembrando que a altura h para análise é o

valor de 5,76m, ao passo que a espessura deste disco foi aumentada em 5 cm, assim, $dh=15$ cm.

Tabela 7: Valores oriundos da análise de Mohr-Coulomb para com o anel inferior. Destaque para a obtenção da tensão de cisalhamento na face superior.

Face	σ_{pre} [N/m ²]	σ_2 [N/m ²]	σ_1 [N/m ²]	σ_m [N/m ²]	R [N/m ²]	σ_{sh} [N/m ²]	T [N/m ²]	c (coesão) [N/m ²]
Superior	6646,38	2658,55	9494,82	6076,69	3418,14	4652,46	3107,29	899,19

Fonte: O Autor (2019).

A Tabela 8 apresenta os valores de força e torque da superfície superior do referido anel.

Tabela 8: Obtenção da força e torque de cisalhamento na face superior do anel inferior.

	Força de cis. [N]	Fat [N]	Torque [Nm]	re [m]
Face superior	33556,31	-	49317,60	1,47

Fonte: O Autor (2019).

Para o a força de atrito causada pela parede do silo, tem-se como h o valor de 5,84m, resultando em uma pressão lateral pr da ordem de **2679,61 N/m²**. Multiplicando pela área lateral, a qual tem como altura o valor de 15 cm, obtem como força de atrito o valor **de 2020,38 N** e um torque de **4040,76 Nm**.

O cálculo da força e, consequentemente, do torque de atrito na face inferior do disco será feito com base nas equações 16 e 17, porém, será substituído o valor de τ pela multiplicação ($p_v * \mu_w$). Para o valor de p_v , será adotado a altura de 6m do silo, o que resultará em uma pressão vertical de 6811,87 N/m², que, ao ser multiplicada por μ_w , resultará em 2724,75 N/m², valor que entrará nas integrais mencionadas. Desta forma, obtêm-se uma força de atrito no valor de **29425,18N** e um torque de **43246,1 Nm**, com raio equivalente de 1,47m.

O torque exclusivo do anel inferior é de 96,60 kNm

Tambor

Nesta etapa serão calculadas as resistências ao giro do tambor. Neste caso, o mesmo apresenta somente forças de atrito, sendo os aplicados em seu tampo e os presentes em suas laterais, nas regiões que não apresentam braços.

A força de atrito no tampo superior será calculada por meio da determinação da pressão vertical sobre o mesmo, desta forma, será obtido o seguinte valor $p_v(h=5,27m)=6288,11 \text{ N/m}^2$, este valor será multiplicado pelo coeficiente de atrito, μ_w , e pela área do tampo, neste caso, a mesma apresenta diâmetro de 1,5m, resultando em uma área de $1,77 \text{ m}^2$. Assim, a força de atrito no tampo e seu torque serão dados, respectivamente, pelas equações 19 e 20, com seus resultados estando presentes na Tabela 9.

$$F_{tampo} = \int_0^{2\pi} \int_0^{0,75} p_v(h = 5,27) \cdot \mu_w \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \quad (19)$$

$$T_{tampo} = \int_0^{2\pi} \int_0^{0,75} p_v(h = 5,27) \cdot \mu_w \cdot r^2 \cdot dr \cdot d\theta \quad (20)$$

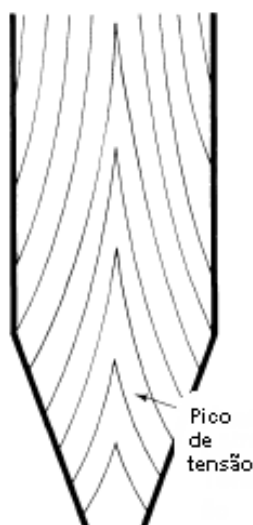
Por sua vez, a força de atrito nas paredes laterais do tambor são obtidas da mesma forma que as forças laterais nos anéis, porém, aqui vale uma ressalva. Como estamos modelando o silo de forma estática, o material no interior do mesmo encontra-se estabilizado, com isso, há necessidade de que o balanço das forças seja nulo, o que nos leva a seguinte observação: a tensão lateral no silo aumenta do seu bordo para o centro, o que é demonstrado na Figura 42.

Desta forma, para manter o elemento em estado estável, a relação entre pressão vertical na parede do silo (pr) e parede do tambor (pr') é dada pela equação 21, onde D é o diâmetro do silo e D_t , o diâmetro do tambor.

$$\frac{pr}{pr'} = \frac{D^2}{D_t^2} \quad (21)$$

Mediante a utilização da equação 21, temos que a pressão vertical na parede do tambor corresponde a $7,11pr$.

Figura 42: Ilustração do aumento da tensão na região central dos silos.



Fonte: Adaptado de Woodcock *et al.*, (1987).

Praticamente, o tambor tem a sua lateral desguarnecida na região entre os anéis, o que compreende uma área de altura de 43 cm, assim, o valor p_v será obtido em relação à altura média desta região, o que corresponde a $h=5,585\text{m}$, resultando em $p_v(h=5,585)=2607,4\text{ N/m}^2$, o qual deve ser multiplicado por 7,11 para obtenção de p_v' . Sendo $p_v'=18541,50\text{ N/m}^2$, deve-se multiplicar este valor pela área da casca do tambor, vezes o coeficiente de atrito, o que resulta nos valores presentes na Tabela 9

Tabela 9: Valores de forças e torques de atritos no tambor do rotor.

	Fat, Fat' [N]	Torque [Nm]	re [m]
Atrito tambo	4444,80	2222,4	0,5
Atrito lateral	15028,46	11271,34	0,75

Fonte: O Autor (2019).

Realizando a somatória dos torques no modelo proposto, chega-se a incríveis **206,06kNm**, um valor muito superior ao do sistema instalado. A Tabela 10 apresenta a discretização dos valores e fica clara a influência dos braços sobre o sistema, o que reforça a necessidade de minimizar esta influência, como no caso dos braços alimentadores de feixes de molas.

Tabela 10: Resumo das forças e torques aplicados no modelo.

Componente	Σ Forças [N]	Participação Forças	Σ Torque [Nm]	Participação Torque
Anel sup.	64835,3	43,4%	95959,2	46,6%
Anel Inf.	65001,9	43,5%	96604,5	46,9%
Tambor	19473,3	13,0%	13493,7	6,5%
Total	149310,4		206057,41	

Fonte: O Autor (2019).

Como modo de atestar o modelo utilizado, foi realizada uma simulação com as características atuais dos silos, para isto, foi definida a altura máxima em 2,1m e adoção de braços que se estendem, diametralmente, em 3m, assim como na Figura 34. A Tabela 11 apresenta os dados da simulação.

Tabela 11: Simulação do silo em seu estado atual por meio do modelamento adotado.

Componente	Σ Forças [N]	Participação Forças	Σ Torque [Nm]	Participação Torque
Anel sup.	11167,4	36,7%	13138,5	39,3%
Anel Inf.	14386,4	47,2%	17006,1	50,8%
Tambor	4916,4	16,1%	3303,4	9,9%
Total	30470,3		33448,03	

Fonte: O Autor (2019).

Pelos valores obtidos na simulação com os dados reais, vê-se que o torque se localizou entre as duas configurações possíveis, em especial, o mesmo ficou 4,4 kNm abaixo do torque nominal da configuração de motor com 8 polos, o que pode ser considerado satisfatório, até mesmo para com um estudo mais aprofundado que aborde mais elementos na modelagem, como estado de partida do motor elétrico, momentos de inércia do tambor e dos braços do silo, entre outros fatores.

Deve-se salientar que para a confecção destes dados, foram utilizados como tensões de falha de cisalhamento os valores correspondentes aos pontos de tangência das retas de Coulomb aos círculos de Mohr de cada fronteira dos anéis. Escolhas que foram feitas com base na heterogeneidade do material, seja pela presença de uma ampla faixa de tamanhos e

formas de sólidos que compõem o mesmo ou pelo fato de possíveis vazios no interior do silo, já que não há uma etapa de pré-cisalhamento da biomassa, somada a este fato, a análise apresentada foi feita com base em um alto índice de umidade da massa sólida, sendo esta situação menos usual à aplicação. Para a obtenção de valores mais conservadores, sugere-se a substituição destas tensões pelos valores máximos de cisalhamento dos círculos de Mohr ou, até mesmo, a utilização dos valores de cisalhamento das retas de Coulomb que correspondem às suas respectivas tensões normais de pré-cisalhamento.

Mais uma vez, deve ser dito que o modelo aqui apresentado se trata de uma estimativa, já que para cálculos mais confiáveis devem ser realizados ensaios pertinentes para obtenção das variáveis reais.

5 CONCLUSÃO

Mediante os resultados obtidos, fica clara a grande influência do diâmetro varrido pelos braços alimentadores no interior do equipamento, tendo a coluna de material uma influência secundária nos esforços solicitados. Em relação ao sistema atual dos silos de biomassa, deve-se pensar em outra alternativa para a movimentação dos sólidos, já que a utilização de braços fixos se apresenta como um grande entrave para utilização de suas capacidades nominais, o que torna a opção da fabricante (utilização dos braços de feixes de molas) a mais viável entre as alternativas abordadas.

REFERENCIAS

BARLETTA, D. *et al.* Assessment on bulk solids best practice techniques for flow characterization and storage/handling equipment design for biomass materials of different classes. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 2015 v.138, p. 540-554, out. 2015.

MCGLINCHEY, D. **Bulk solids handling**: equipment selection and operation. Oxford: Ames, Iowa: Blackwell Pub., 2008. 290 p.

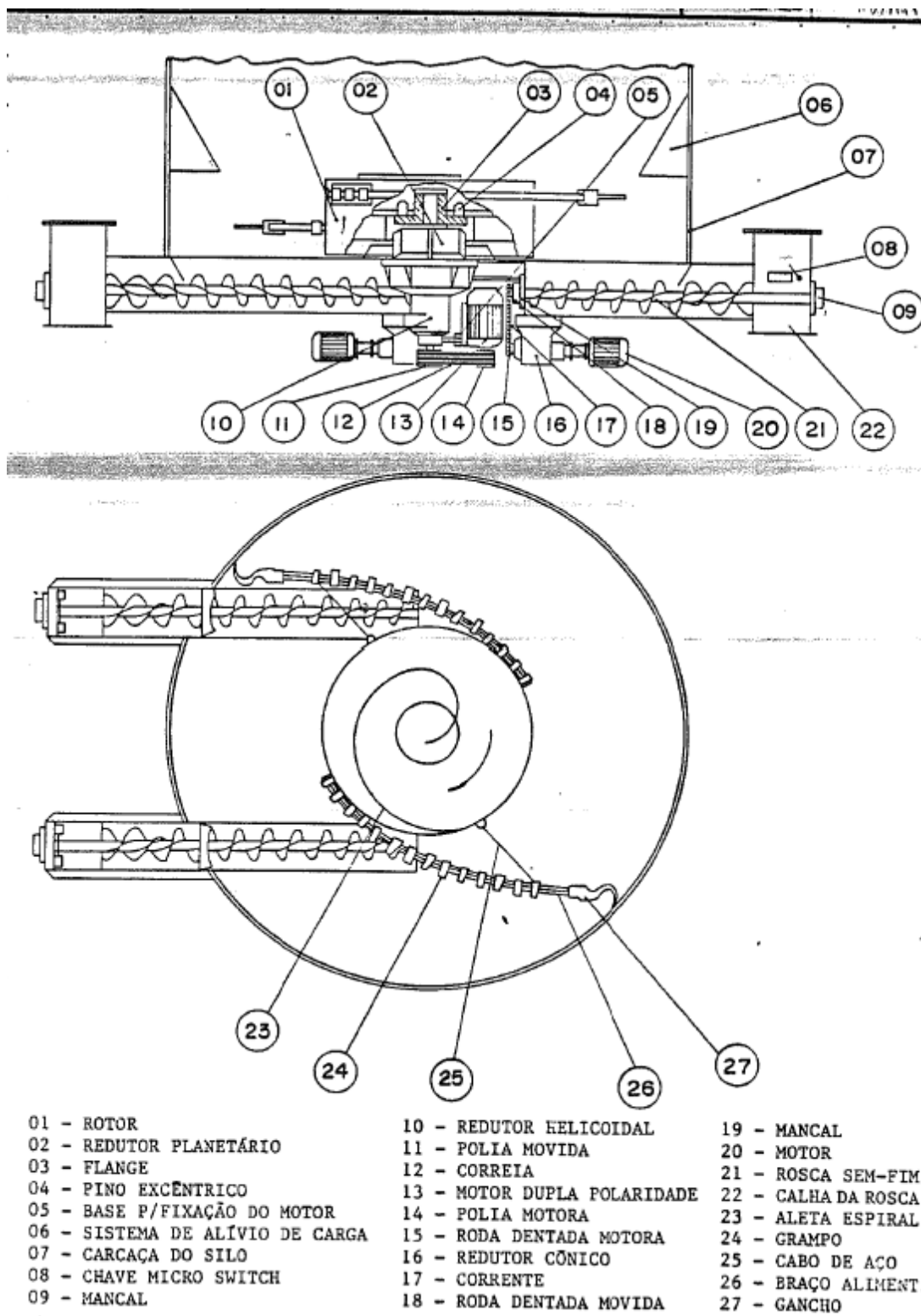
NEDDERMAN, R. M. **Statics and kinematics of granular materials**. New York: Cambridge University Press, 1992. 352 p.

SCHULZE, D. **Powders and bulk solids**: behavior, characterization, storage and flow. New York: Springer, 2008. 511 p.

SHAMLOU, P. A. **Handling of bulk solids**: theory and practice. London: Butterworths, 1988. 193 p.

WOODCOCK, C. R.; MASON, J. S. THAMES POLYTECHNIC. BULK SOLIDS HANDLING UNIT. **Bulk solids handling**: an introduction to the practice and technology. New York: L. Hill; Chapman and Hall, 1987. 522 p

ANEXO A - DESENHO DE CONJUNTO DO SILO



Fonte: Manual do Equipamento (1988).