

OSMAR DURAND PAVANI

Engenheiro Mecânico, Universidade Estadual de Campinas - 1976

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Osmar Durand Pavani e aprovada pela comissão julgadora em 18/11/1986.

Carlos Amadeu Pallerosi

"Análise do Fluxo de Materiais a Granel
Através de Orifícios e Dutos Inclinação"

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia de Campinas da UNICAMP como
requisito parcial para obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica"

Orientador: Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia de Campinas
Departamento de Engenharia Mecânica
Geprom - Laboratório de Projeto Mecânico

outubro de 1986

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Tese de: Mestrado

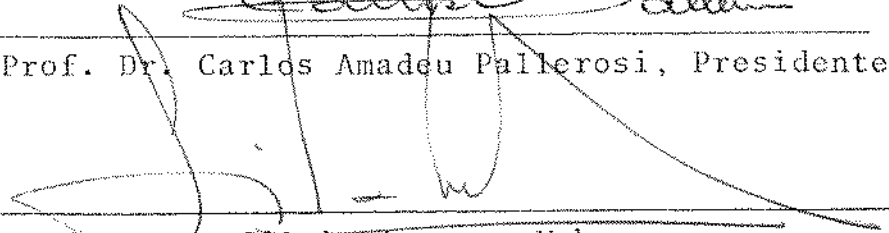
Título da Tese: Análise do Fluxo de Materiais a
Granel Através de Orifícios e
Dutos Inclinação.

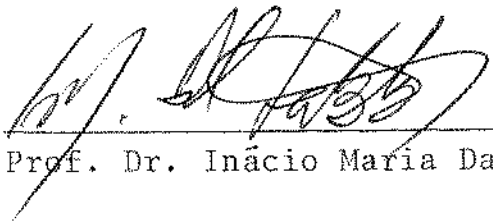
Autor: Osmar Durand Pavani

Orientador: Carlos Amadeu Pallerosi

Aprovado por


Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi, Presidente


Profa. Dra. Silvia Azucena Nebra


Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro

Campinas, 18 de novembro de 1986

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise do fluxo de mate riais a granel através de orifícios e dutos inclinados, visando a obtenção de dados para o projeto de bôcas de descarga de silos. Foi utilizado um dispositivo de concepção original (moega estabilizadora), de simples construção, para permitir a obtenção dos dados e parâmetros a serem utilizados nas equações propostas. São apresentadas várias conclusões obtidas pela análise dos resultados experimentais, e comparadas com as conclusões obtidas por vários outros pesquisadores. Como auxílio ao projeto das bocas de descarga e válvulas desviadoras de fluxo são apresentados os dados básicos de cálculo, baseados na formulação proposta. O material ensaiado foi areia seca, granulação grossa e fina, para verificação da formulação teórica.

ABSTRACT

This thesis deals with an analysis technique of granular material flow through hopper openings and inclined tubes, with the purpose of collecting data for the design of silo outlets. An silo outlet instalation easy to manufacture, with a novel design concept, was built in order to obtain data and parameter values used in the equation proposed in this work from the analysis of the experimental results several conclusions are presented and compared with the ones from other researchers. A calculation procedure based in the proposed formulation is presented in order to help the design of outlet openings and flow deviation valves. Dry sand with coarse and fine granulation was used in the experiments performed in order to verify the theoric formulations.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	
SIMBOLOGIA	
BIBLIOGRAFIA	
1. CONCEITOS BÁSICOS	001
1.1 Definições e termos.....	001
1.2 Atrito	001
1.3 Propriedades dos sólidos à granel	004
1.4 Silos	007
1.5 Funil de fluxo	008
1.6 Dutos de descarga	010
1.7 Válvulas de descarga	011
2. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS SÓLIDOS À GRANEL	013
2.1 Ângulo de repouso dos materiais	013
2.2 Aparelhos para medir tensões internas e externas...	014
2.3 Arcos.....	017
3. MECÂNICA E PROPRIEDADES DOS SÓLIDOS À GRANEL	018
3.1 Considerações gerais para o estudo da massa sólida à granel	018
3.2 Análise das tensões em sólidos à granel	019
3.2.1 Tensões em um plano	019
3.2.2 Determinação da tensão inicial de cisalha mento	023
3.2.3 Dimensionamento da boca de descarga de um silo	024

3.2.4	Fórmula geral para o dimensionamento da boca de descarga do silo	027
3.3	Coefficiente de mobilidade	028
3.4	Raio hidráulico	029
3.5	Determinação da abertura mínima da boca de descarga	031
3.5.1	Exemplo do cálculo da abertura mínima da boca de descarga de um silo	031
4.	FLUXO DE MATERIAIS A GRANEL EM SILOS	034
4.1	Considerações sobre a vazão na boca de descarga ...	034
4.2	Influência da granulometria	038
4.3	Teoria do fluxo	040
4.4	Influência da altura "h" do material na vazão de um determinado orifício	046
4.5	Variação da área transversal no fluxo de materiais em queda livre abaixo da boca de descarga	047
4.6	Fluxo em dutos curvos	049
4.7	Fluxo em dutos inclinados	050
4.7.1	Área transversal do fluxo no duto	053
4.7.2	Granulometria	054
4.7.3	Diâmetro do duto	054
4.8	Exemplo da cálculo da vazão através de um orifício de um determinado silo	054
4.8.1	Determinação aproximada da vazão para vários materiais	057
4.8.2	Análise da variação da vazão de dois materiais em função do diâmetro da boca de descarga	058
5.	DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	062

5.1	Objetivos	062
5.2	Equipamento construído	062
6.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	069
6.1	Medição da vazão	069
6.2	Montagem do equipamento	069
6.2.1	Descarga direta	070
6.2.2	Descarga por meio de dutos verticais	070
6.2.3	Descarga por meio de dutos inclinados	071
6.3	Materiais escolhidos	071
6.4	Resultados experimentais obtidos	073
6.4.1	Apresentação das tabelas	073
6.4.2	Tabelas dos ensaios	074
7.	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	088
7.1	Influência da forma da boca de descarga e do mate_rial	088
7.2	Análise do comportamento do fluxo acima da boca de descarga	090
7.2.1	Influência da pressão atmosférica	090
7.2.2	Influência devido a formação de vórtices	091
7.2.3	Influência da aceleração de Coriolis	092
7.3	Fluxo em dutos curvos	092
7.4	Fluxo em dutos inclinados	092
8.	SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTO E FUTUROS TRABALHOS	094

ANEXOS

A.	CÓDIGO DE CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS (CEMA)	096
----	--	-----

B. TIPOS DE BOCAS DE DESCARGA	112
C. TIPOS DE CALHAS	115
D. PRESSÃO NAS PAREDES DO SILO	116
E. ESTUDO DE DIMENSÕES DA VÁLVULA DESVIADORA DE FLUXO TIPO DUAS VIAS	121

AGRADECIMENTOS

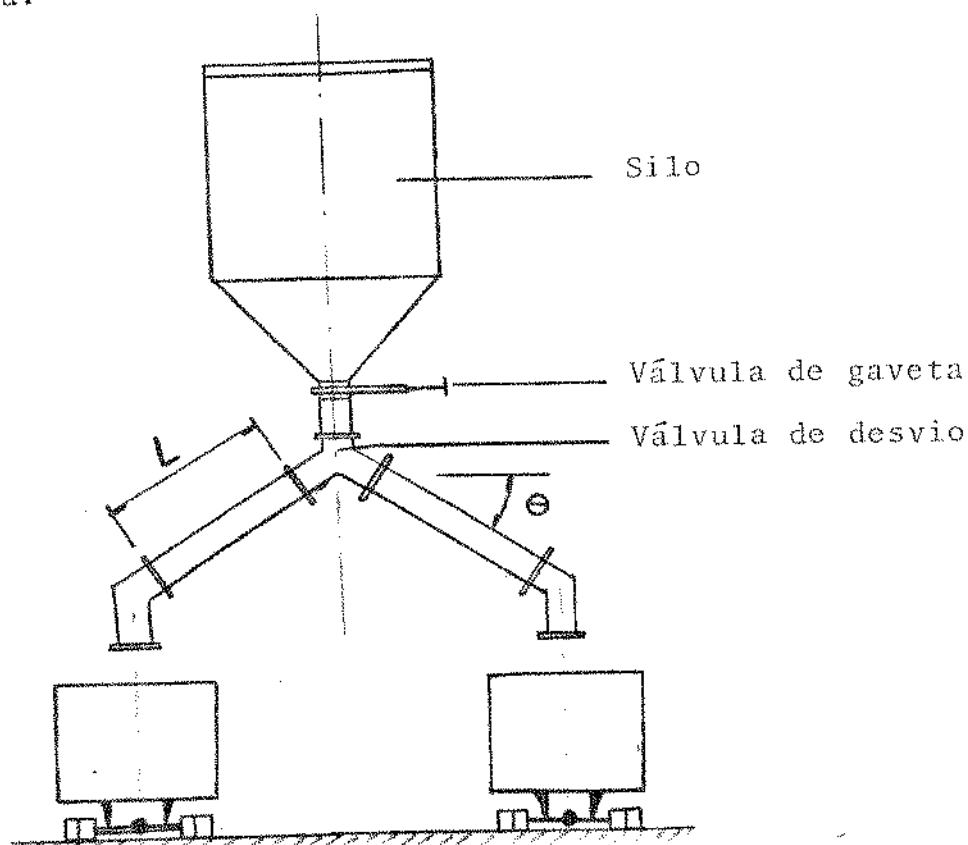
Agradeço ao professor Doutor Carlos Amadeu Pallerosi, professor Doutor Roberto de França Arruda, professor Doutor Douglas Zampieri, professor Doutor Dino Ferraresi, professor Doutor Fausto Rodrigues, funcionários do GEPRON e do Centro Tecnológico de Campinas.

Ofereço este trabalho aos técnicos

INTRODUÇÃO

O armazenamento de materiais a granel é importante na agricultura, mineração, indústria, comércio e outras atividades, porque mantém o produto disponível durante o período improdutivo. O manuseio desse produto necessita de técnicas apropriadas.

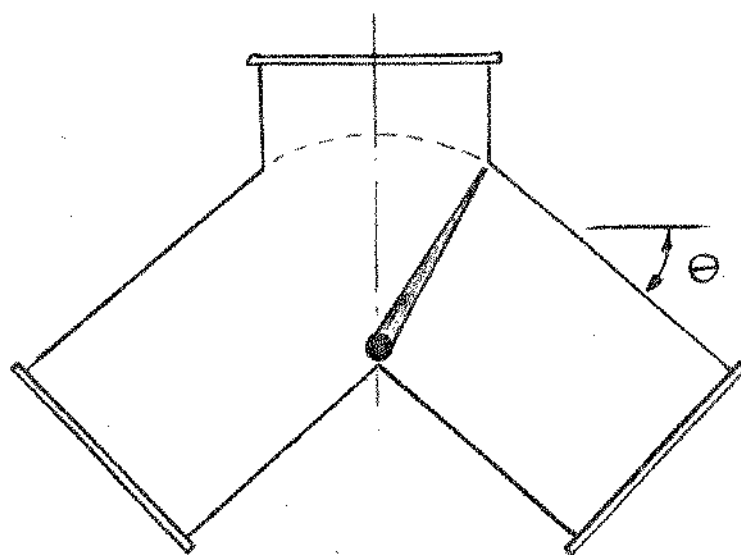
Este estudo está voltado ao comportamento do fluxo de materiais a granel em orifícios e dutos inclinados. O fluxo através de orifícios já foi estudado e equacionado para vários materiais, mas para o fluxo através de dutos inclinados a bibliografia é escassa. Normalmente, a análise é realizada com equipamentos em tamanho reduzido, porém os valores obtidos são aplicados a equipamentos reais, com as devidas proporções e cuidados (problema de análise dimensional e semelhança). Para desviar o fluxo de materiais em dutos, utiliza-se uma válvula de desvio, conforme figura.



Exemplo de carregamento de caminhões através de silos.

Para exemplificar, é apresentado um carregamento de caminhões. Assim que um caminhão estiver carregado, a válvula é acionada, mudando a direção do fluxo, e o outro caminhão começará a ser carregado. Para o projeto das dimensões da boca de descarga e da válvula de desvio, é necessário o estudo da área, da inclinação (θ) e do comprimento (L) do duto.

As dimensões básicas da válvula desviadora tipo duas vias são apresentadas no anexo E, em função dos vários ângulos (θ) de inclinação do duto, para uso em projetos e estudos.



SIMBOLOGIA

A = área $[cm^2]$;

A' = área corrigida = $\frac{\pi}{4} \cdot (D - 1,5 \cdot d)^2$ $[cm^2]$;

A_e = área equivalente $[cm^2]$

$a, b, c,$ = dimensões da boca de descarga $[cm]$; pontos;

C = constante numérica;

D = diâmetro do orifício da boca de descarga $[cm]$;

D_b = diâmetro do duto (bocal) $[cm]$;

D_f = diâmetro da secção transversal do fluxo $[cm]$;

D_s = diâmetro do silo $[cm]$;

d = dimensão do grão (granulometria) $[cm]$;

$f = \tan \phi$ = coeficiente de atrito estático entre grãos;

$f_e = \tan \phi_e$ = coeficiente de atrito estático entre placa e grãos;

$f_d = \tan \phi_d$ = coeficiente de atrito dinâmico;

$f_o = \tan \phi_o$ = coeficiente de atrito logo acima da boca de descarga;

G = peso do material $[Kgf]$;

g = aceleração da gravidade $[m/s^2]$;

H = altura $[m]$;

h = altura $[m]$;

K = constante numérica;

k = constante = $\frac{b}{a+b}$;

L = comprimento do suto $[m]$;

M = coeficiente de mobilidade;

m = massa $[Kg]$;

N = força normal à superfície $[Kgf]$;

N_s = força normal à superfície superior $[Kgf]$;

N_i = força normal à superfície inferior $[Kgf]$;

P = peso $[Kgf]$;

p_h = pressão horizontal $[Kgf/cm^2]$;

p_v = pressão vertical $[Kgf/cm^2]$

- R = raio hidráulico $[cm]$;
 r = relação entre coeficientes de descarga ($r = \lambda_1/\lambda_2$);
 t = tempo $[s]$;
 U = dimensão linear $[mm]$;
 V = volume $[m^3]$;
 v = velocidade $[m/s]$;
 v_o = velocidade inicial (na boca de descarga) $[m/s]$;
 v_f = velocidade final $[m/s]$;
 v_i = velocidade no ponto "i" $[m/s]$;
 W = vazão $[Kg/min]$;
 α = ângulo de inclinação do plano com a horizontal;
 β = ângulo; constante numérica;
 γ = densidade aparente do material $[ton/m^3]$
 Δh = diferença de alturas $[m]$;
 $\eta = \arctg r/\theta$
 θ = ângulo de inclinação do cone de descarga (calha duto);
 θ_c = ângulo crítico;
 λ = coeficiente de descarga;
 v = constante que depende da característica do material;
 ρ = raio de curvatura do duto $[mm]$;
 σ = tensão de compressão $[Kg/cm^2]$;
 σ_i = tensão de compressão no ponto "i" $[Kg/cm^2]$;
 σ_o = tensão de compressão inicial (boca de descarga) $[Kg/cm^2]$;
 σ_1 = tensão principal de compressão no plano horizontal $[Kg/cm^2]$;
 σ_2 = tensão principal de compressão no plano vertical $[Kg/cm^2]$;
 σ_f = tensão de compressão no fluxo interno ao silo $[Kg/cm^2]$;
 τ = tensão de cisalhamento $[Kg/cm^2]$;
 τ_o = tensão de cisalhamento inicial $[Kg/cm^2]$;
 τ_i = tensão de cisalhamento no ponto "i" $[Kg/cm^2]$;
 ϕ = ângulo de atrito interno (repouso, estático);
 ϕ_e = ângulo de atrito externo (material x placa);

ϕ_o = ângulo de atrito interno inicial;

ϕ_d = ângulo de atrito dinâmico.

1. CONCEITOS BÁSICOS

1.1 Definições e termos

O escoamento só ocorre em fluidos, pois os sólidos a granel somente podem cair, rolar ou deslizar. Para bombear (elevar) os sólidos a granel é necessário utilizar um meio de transporte (líquido ou gasoso). Será utilizado o termo "fluxo", entendido, como "fluxo de transporte".

Segundo Vennard [1] define-se o fluido ideal como:

a) em repouso, os fluidos não suportam tensões de cisalhamento;

b) pressões aplicadas a um fluido em repouso são transmitidas igualmente a todos os pontos;

c) apesar da mobilidade e do espaçamento entre as moléculas, um fluido é considerado contínuo se ele não apresenta espaços vazios. Neste caso, os "vazios" significam espaços não ocupados pelo fluido, não necessariamente ar ou vácuo, isto é, podem ser sólidos em suspensão.

Conclusão:

Os sólidos a granel não satisfazem nenhuma das definições de fluido, embora ocasionalmente eles possam ser tratados como "FLUIDOS IMPERFEITOS". Sólidos em suspensão é fluxo bifásico (exemplo, ar e água, que não se misturam).

1.2 Atrito

O fluxo pela gravidade de materiais a granel ocorrem sob pressões correspondentes às pressões estáticas (principais) do material. Na prática, a pressão estática corresponde à altura da

coluna de grãos no silo, desde que não produzam "arqueamento" dentro do silo (apoio nas laterais), que serão discutidos posteriormente. A velocidade na descarga de silos normalmente é uma pequena fração da velocidade principal, com a maior parte de seu valor sendo consumido pelo atrito no movimento das partículas sólidas contra as paredes do silo, e entre si (atrito de partículas). O cálculo e a medida de tais perdas é muito difícil. Planejar e conduzir tais testes requer uma clara idéia do mecanismo de atrito.

Pode-se admitir algumas definições [2]:

a) Atrito é a resistência que um corpo oferece ao movimento de um segundo corpo para deslizar sobre si. A força de atrito é na direção da tangente às superfícies em contato dos dois corpos, e sentido oposto ao movimento relativo.

b) O coeficiente de atrito estático (f) entre quaisquer duas superfícies é a relação entre a pressão limite de atrito e a correspondente pressão normal, ou seja,

$$f = \frac{F}{N} \quad (1.1)$$

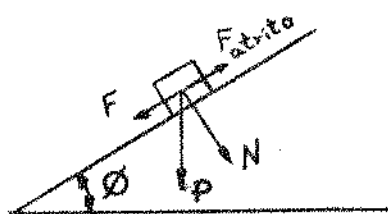


Fig. 1.1 - Forças no deslizamento de um corpo sobre uma superfície inclinada.

A força "F" impede o movimento e a força "N" é a normal à superfície.

c) Se um corpo permanece sob um plano inclinado de um ângulo (ϕ) no limite do escoamento, este ângulo é denominado ângulo de repouso (anexo A), dado por:

$$f = \operatorname{tg} \phi \quad (1.2)$$

d) Se duas superfícies apresentam movimento relativo, a relação entre a força de resistência ao deslocamento pelo atrito, e a força normal, é denominada "atrito cinemático".

Para atrito seco pode-se concluir que:

e) O coeficiente de atrito cinemático independe da pressão normal.

f) O coeficiente de atrito estático é independente da área de contato.

g) O coeficiente de atrito cinemático é menor que o coeficiente de atrito estático e independe da velocidade relativa entre as superfícies atritadas.

h) Há evidência experimental de que o valor do coeficiente de atrito cinemático aumenta quando a velocidade diminui, e passa sem descontinuidade para o valor correspondente ao coeficiente de atrito estático.

Estas leis, válidas nas condições dos testes, podem ser modificadas de modo a serem aplicadas a condições diferentes das admitidas nos testes. Isto significa uma grande dificuldade na aplicação dos resultados dos ensaios existentes, ou planejar sobre uma série consistente de novos testes, por causa da grande variedade de condições de fluxo dos sólidos a granel. O problema

é particularmente complicado desde que as propriedades do material em escoamento dependem do tempo de duração e do método da operação de estocagem.

1.3 Propriedades dos sólidos a granel

É costume descrever-se as propriedades de fluxo das substâncias granulares fazendo-se comparações com as propriedades dos fluidos, e em muitos casos em relação à água. As informações a seguir foram acumuladas ao longo de muitos anos, por vários pesquisadores tendo sido estabelecidas e confirmadas por muitos experimentos [2]:

a) Materiais granulares e pulverizados suportam tensões de cisalhamento. Por isso é que uma pessoa pode caminhar sobre a superfície de grãos armazenados, em alguns casos.

b) A pressão não é uniformemente distribuída ao longo da massa de grãos.

c) Sólidos a granel de grande tamanho (pedaços de carvão, minério de ferro), podem ter espaços vazios por isso não serão contínuos, mas ainda podem ser considerados como homogêneos.

d) O princípio de Arquimedes, da flutuação, não pode ser satisfeito para substâncias granulares.

e) O ângulo de repouso (ϕ) de materiais granulares corresponde aquele que o material assume ao ser empilhado, por si mesmo. O coeficiente de atrito estático (f), de grãos contra grãos, é dado por:

$$f = \operatorname{tg} \phi \quad (1.3)$$

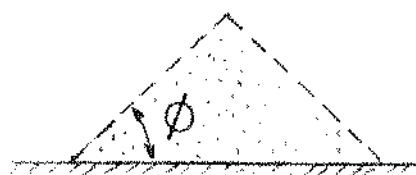


Fig. 1.2 - Ângulo de repouso (ϕ) de materiais granulares.

onde ϕ é o ângulo de repouso (estático) (anexo A). Com velocidades de fluxo muito baixas, em silos, o coeficiente de atrito cinemático difere pouco do coeficiente de atrito estático.

f) Ketchum [3] demonstrou que a quantidade de grãos descarregados através de um orifício, no centro do cone de descarga de um silo, sob a força da gravidade, varia basicamente como uma função do diâmetro (D) do orifício, elevado ao cubo, ou seja, D^3 . Para fluidos, a descarga varia basicamente com o quadrado do diâmetro do orifício, ou seja, D^2 .

g) O volume de sólidos descarregados através de um orifício na lateral de um silo, próximo ao cone, varia com o diâmetro da abertura.

h) Em ambos os casos (itens f, g), o volume de fluxo (vazão) é praticamente independente da altura acima do orifício de descarga, como mostrado a seguir.

Com orifícios de diâmetro 2", 3" e 4", para a descarga de pequenas esferas e grânulos, os resultados de Ketchum [3] foram:

$$W = 0.0166 \cdot D^{2,84} \left[\text{Kg/min} \right] \quad (1.4)$$

onde "W" é a vazão [Kg/min], correspondente ao peso do material que flui pelo orifício na unidade de tempo, e "D" é o diâmetro do orifício [cm].

Zens e Othmer [4] que realizaram experiências com partículas de 0,1 polegadas (2,54mm), através de vários diâmetros de aberturas, expressaram seus resultados pela equação

$$W = 0,081 \cdot D^{2,96} \cdot h^{0,04} \quad \left[\text{Kg/min} \right] \quad (1.5)$$

onde "h" é a altura da coluna de grãos acima do orifício, em metros. Nota-se que o expoente de "h" é próximo de zero e portanto "h" aproxima-se de 1. Então, o efeito de "h" é insignificante.

Este fato foi compreendido desde o começo e explicaria o efeito da formação de arcos e domos. Foi encontrado nas medidas de pressões nos grãos armazenados que o peso da parte superior do silo é suportado por um arco formado pelos grãos comprimidos, reduzindo a pressão no cone (fundo) e aumentando a carga nas paredes laterais dos silos.

A quantidade de sólidos descarregados através de uma abertura no fundo de um silo, ou o restabelecimento do fluxo após uma interrupção, depende do desenho do silo, da sua forma e da localização da abertura de descarga, ao lado das suas propriedades (granulometria, umidade, temperatura, adesão, coesão, etc.), e, acima de tudo, o tempo de permanência em repouso (tempo de armazenagem).

Existem muitos poucos sólidos que apresentam livre fluxo após um prolongado período de repouso. Pedregulho e areia seca são exemplos de sólidos que apresentariam livre fluxo, em ambientes com umidade controlada.

1.4 Silos

O silo deve ter uma forma adequada, que permita o fácil carregamento, e que a descarga seja por gravidade. A Figura 1.3 mostra alguns tipos de silos, conforme Spivakorsy [5].

O volume do silo é determinado conforme o tipo e o volume do material armazenado. O cone de saída, com ângulo " θ ", deve ser tal que o material transportado não fique acumulado.

Em um silo simétrico (Figura 1.4a) partículas fluem formando um cone, e as partículas da superfície superior fluem para este cone.

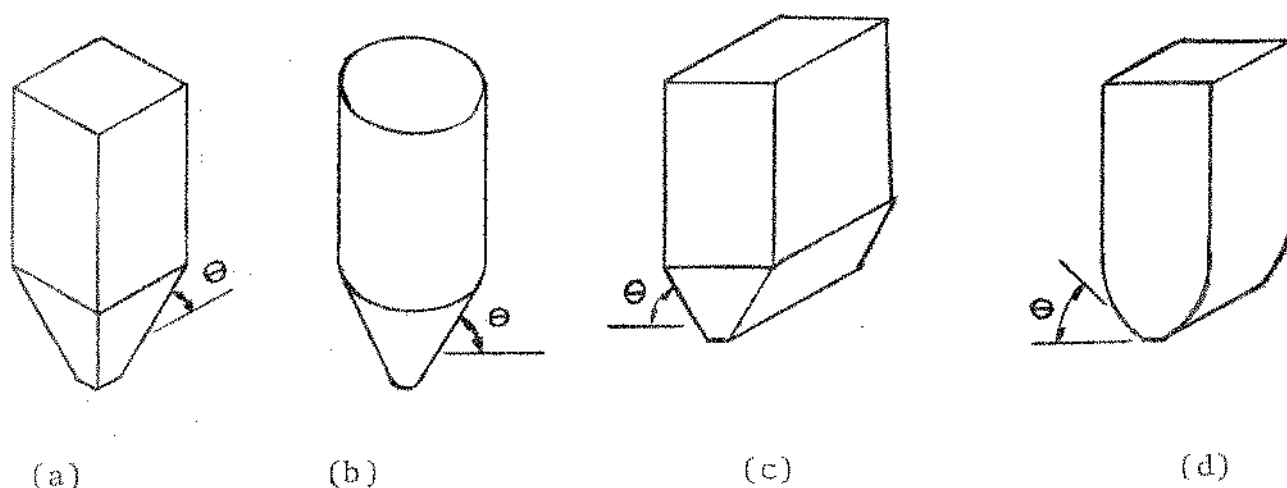
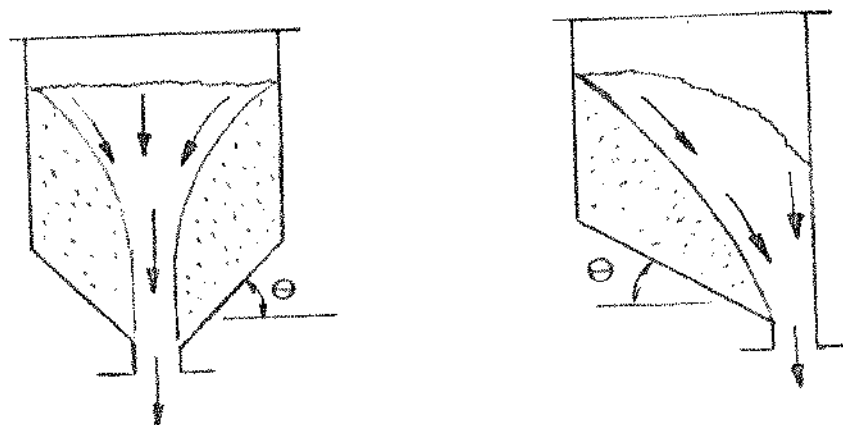


Fig. 1.3 - Tipos de formatos de silos.

No silo assimétrico (Figura 1.4b) o cone de fluxo é na parede do silo, com partículas da superfície fluindo para este cone.

O ângulo mínimo " $\theta_{\text{mín}}$ " da parede do silo com a horizontal, depende do coeficiente de atrito entre o material e a parede do silo. Por exemplo, para carvão, este ângulo é da ordem de 45° a 50° .



(a) silo simétrico

(b) silo assimétrico

Fig. 1.4 - Tipos de fluxo em silos

1.5 Funil de fluxo

"Funil de fluxo é o termo adaptado para designar o fluxo pela gravidade, de sólidos a granel dentro de um silo, quando o escoamento é confinado ao seu núcleo. Os sólidos a granel são firmemente comprimidos contra as paredes laterais. Pode ser determinado experimentalmente [6] que em materiais com pequena força de coesão (por exemplo: areia seca classificada), o diâmetro do núcleo, que confina o fluxo do material, depende do grau de compressão do material dentro do silo, como mostrado na Figura 1.5. O diâmetro do núcleo, em uma dada altura (secção), aumenta enquanto o silo esvazia. Este modelo de fluxo apresenta pulsações na descarga, devido ao material que cai das paredes e à distribuição irregular do material (diferentes compactações, granulometrias, etc).

Tais condições de fluxo levam à necessidade de utilização dos "dispositivos de promoção de fluxo". Estes são, em geral, meios mecânicos que previnem a segregação (separação), a compressão do material em espaços mortos, a remoção de materiais acumu

lados em descontinuidades no formato dos silos, para agitar o material em repouso nos "espaços mortos", ou para prevenir o compactamento. Os equipamentos para promover o fluxo incluem:

a) Excitamento manual do material através de furos nas paredes dos silos.

b) Dispositivos vibratórios ou de deslocamento. Estes dispositivos, se usados enquanto não há descarga, tendem mais a comprimir o material do que liberá-lo.

c) Admissão de ar comprimido, em painéis com superfícies porosas localizadas em locais inertes do silo.

d) Dispositivos de deslocamento, consistindo de painéis com coxins de borracha que podem ser inflados e esvaziados, para a movimentação dos sólidos.

e) Jatos pulsantes de ar, dirigidos aos pontos de arqueamento. Se o topo do silo estiver hermeticamente fechado, uma pequena pressão de ar, aplicada diretamente no topo do silo, pode ser suficiente para promover o fluxo.

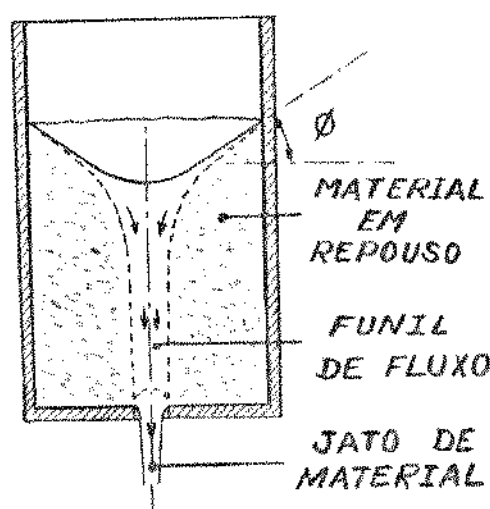


Fig. 1.5 - "Funil de Fluxo de um silo."

Existem opiniões de que a maior parte dos silos existentes (em uso) operam com este modelo de funil de fluxo. É admitido que um silo apropriadamente projetado, pode produzir um fluxo uniformemente distribuído de material, em qualquer plano horizontal, mas desde que estes silos não tenham permanecido inertes durante um prologando período de repouso.

Embora consideráveis progressos tenham sido feitos nos anos recentes, no sentido de compreender-se as condições do fluxo por gravidade dos sólidos, o objetivo final do perfeito dimensionamento dos silos de fluxo livre, nem sempre pode ser atingido. Nestas circunstâncias, as firmas fabricantes de equipamentos para promover o fluxo livre, dispendem grandes esforços e recursos para um contínuo aperfeiçoamento de seus projetos e equipamentos.

1.6 Dutos de descarga (chutes)

Os dutos (e calhas) inclinados podem transportar materiais por gravidade. O ângulo de inclinação dos dutos devem ser suficiente para assegurar o deslizamento do material. Para determinar o atrito dinâmico em um duto Spivakorsy [5] apresenta a equação:

$$f_d = \left(\frac{2 \cdot g \cdot H + v_o^2 - v_f^2}{2 \cdot g \cdot H} \right) \cdot \operatorname{tg} \theta \quad (1.6)$$

onde:

v_o = velocidade inicial [m/s];

v_f = velocidade final dos grãos [m/s];

f_d = coeficiente de atrito dinâmico;

g = aceleração de gravidade $\left[\text{m/s}^2 \right]$;

θ = ângulo de inclinação do duto.

A secção do duto geralmente é retangular ou redonda. Recomenda-se que a inclinação do duto seja maior que a do ângulo de repouso do material transportado. No anexo III são apresentados alguns tipos mais comuns de calhas de descarga. Nesta experiência a calha usada é de secção circular, conforme Figura 1.6:

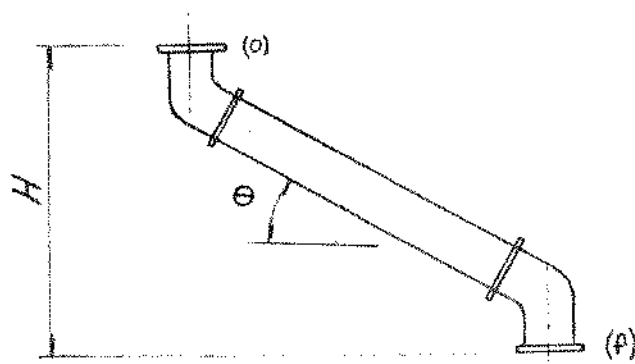


Fig. 1.6 - Duto circular inclinado

1.7 Válvulas de descarga

As válvulas de descarga servem para fechar e abrir a saída de material do silo, ou ajustar o fluxo do material descarregado. A válvula pode ser acionada manualmente ou mecanicamente. Geralmente é acionada por motor elétrico ou pistão de ar comprimido. Os dois sistemas podem ser acionados por controle remoto.

As dimensões da boca de descarga dependem do tamanho do grão, do grau de fluidez do material e da capacidade desejada. Uma fórmula empírica [5] que permite determinar as dimensões de uma boca de descarga quadrada, é a seguinte:

$$a = K \cdot (8,0 + d) \cdot \text{tg}\phi \quad \left[\text{cm} \right] \quad (1.7)$$

onde:

K = constante, função do material

- material homogêneo (classificado) : $K = 0,26$.

- material heterogêneo (granulometria variada) :

$K = 0,24$.

d = dimensão máxima do grão [cm].

ϕ = ângulo de repouso (estático)

Se a boca de descarga for redonda, tem-se $D = a$. Se re
tangular $c > 1,5a$ e $b > 0,75a$.

A experiência mostra que, em materiais com grandes grãos [5], a boca de descarga não deve ser menor que (4 a 5). d . Do mesmo modo, a boca de descarga não deve ser grande, evitando descargas rápidas, ou pequena demais dificultando a saída do ma
terial.

No anexo B são apresentados alguns tipos usuais de bô
ca de descarga, utilizadas em alimentadores.

2. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS SÓLIDOS A GRANEL

2.1 Ângulo de repouso dos materiais

Uma das principais características dos materiais a granel é o ângulo de repouso " ϕ ", que é formado entre a superfície do material e a horizontal.

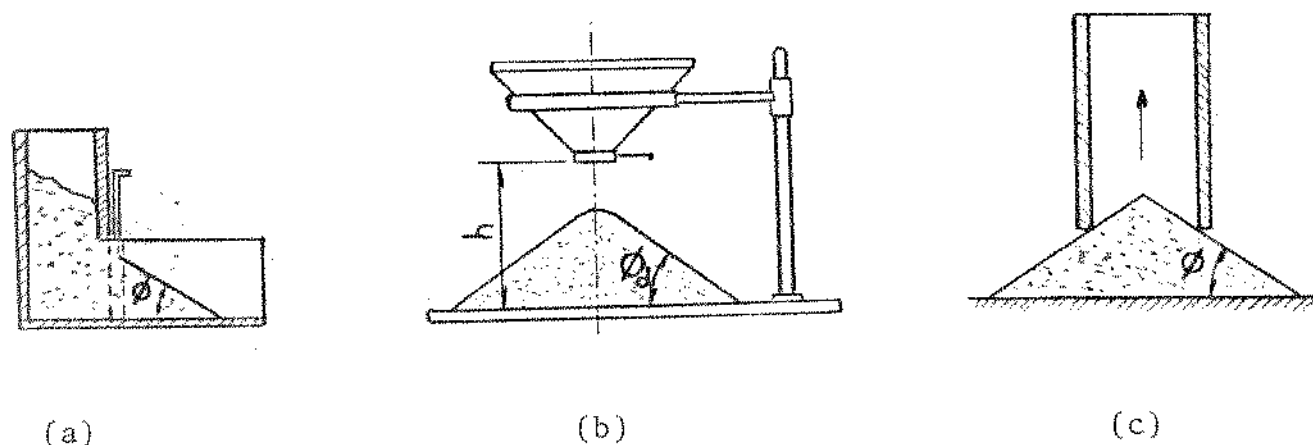


Fig. 2.1 - Dispositivos para medição do ângulo de repouso dos materiais.

O ângulo de repouso pode ser dinâmico (Figura 2.1b) ou estático (Figura 2.1a, 2.1c). O ângulo dinâmico " ϕ_d " é menor que o estático " ϕ ", isto porque os grãos caem com energia cinética (Figura 2.1b), formando ângulo menores.

Utiliza-se o dispositivo mostrado na Figura 2.1c para medir o ângulo de repouso, devido à sua simplicidade.

O ângulo de repouso " ϕ " depende da composição, tamanho, forma dos grãos, e teor de umidade (coesão dos grãos).

O fluxo de material em uma superfície não tem relação com o ângulo de repouso, conforme Jenike [7], servindo apenas para a determinação do contorno da pilha de material. Reimbert [8],

afirma que o ângulo de repouso é igual ao ângulo de atrito interno (ϕ) do material.

2.2 Aparelhos para medir tensões internas e externas

A força de atrito entre os grãos é denominada de "tensão interna", e a força de atrito entre os grãos e uma superfície é denominada "tensão externa".

A Figura 2.2 mostra um dispositivo para medida da tensão de cisalhamento em função da tensão normal. Este dispositivo é composto de uma guia lateral (1) para guiar a caixa (2), que é conectada ao prato com pesos (3), por meio de uma corda (4) que passa pela roldana (5). O material testado é colocado na caixa (2). As células, de carga são montadas em cima do material para variar a tensão normal no plano em estudo. O peso no prato (3) é aumentado até a célula começar a se mover.

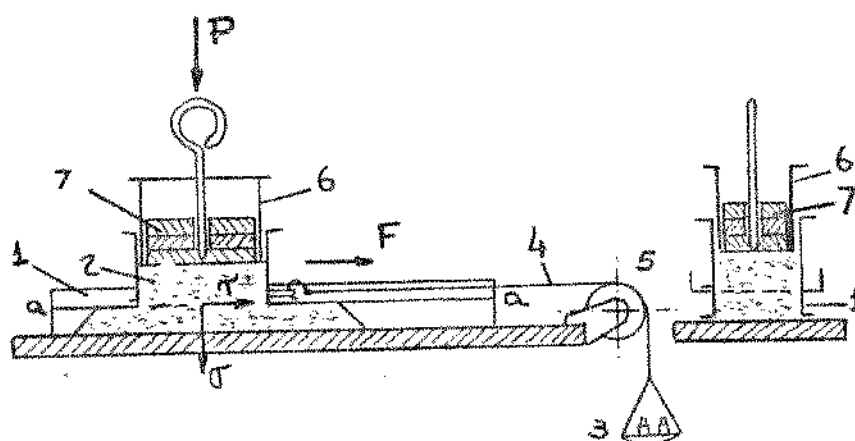


Fig. 2.2 - Dispositivo para medida do atrito interno dos grãos.

Utilizando-se o dispositivo da Figura 2.2, varia-se a

força "F" em função da força "P", até que a caixa comece a se mover. Então, anota-se os valores das forças aplicadas, e calcula-se "σ" e "τ", conforme a equação

$$\sigma = \frac{P}{A} + 0,1 \cdot h \cdot \gamma \quad (2.2)$$

onde:

σ = tensão normal [Kgf/cm²];

P = peso das células de carga [Kgf];

A = área da célula [cm²];

h = altura do sólido na célula [m];

γ = densidade do material [ton/m³]

$$\tau = F \cdot \left(\frac{1 - k \cdot \sqrt{2}}{A} \right) \quad (2.3)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento [Kgf/cm²];

F = peso colocado no prato, diminuindo dos pesos necesários para compensar as forças de atrito da caixa vazia e da roldana [Kgf];

k = coeficiente de atrito da roldana.

Colocando-se os valores de "σ" e "τ" em um gráfico (Figura 2.4), calculados por meio das equações 2.2 e 2.3, normalmente resulta uma reta para a relação τ/σ.

A inclinação desta reta corresponde ao valor:

$$f = \operatorname{tg} \phi = \frac{\tau}{\sigma} \quad (2.4)$$

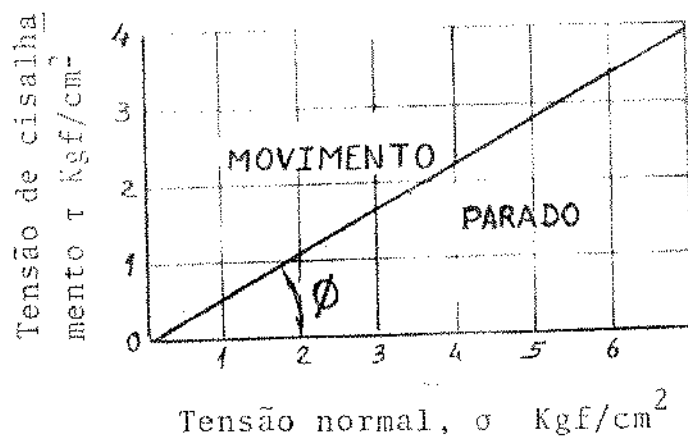
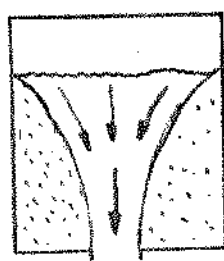


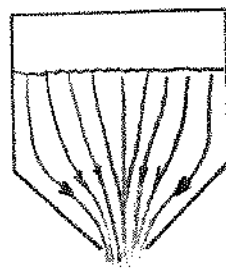
Fig. 2.4 - Correlação entre as tensões " σ " e " τ ", para material ideal.

onde " ϕ " é o "ângulo de atrito estático".

Conforme o tipo do silo o escoamento do material apresenta atrito interno " ϕ " (Figura 2.5.a) ou externo " ϕ_c " (Figura 2.5.b).



(a)



(b)

Fig. 2.5 - Tipo de cone de fluxo na boca de descarga do silo.

O atrito externo " θ_e " é medido com o mesmo dispositivo da Figura 2.2, com o material deslizando sob uma placa, posicionada na horizontal e fixa à base do dispositivo.

2.3 Arcos

Arcos, pontes ou "domos" são formados quando há uma parada de fluxo nos silos. Isto porque o têrmo descreve a forma da superfície do material que bloqueia a boca de descarga. O atrito interno dos sólidos é a causa da distribuição de pressão no arqueamento (Figura 2.6). Todas as propriedades dos sólidos afetam o valor do coeficiente de atrito, tais como natureza do sólido, granulometria, forma do grão, temperatura, adesão e coesão. No ta-se que os sólidos que fluem satisfatoriamente, quando operados continuamente, podem não fluir após um certo período de repouso, devido à formação de arcos.

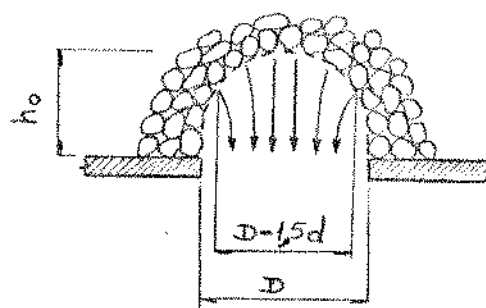


Fig. 2.6 - Arqueamento na boca de descarga do silo.

3. MECÂNICA E PROPRIEDADES DOS SÓLIDOS A GRANEL

3.1 Considerações gerais para o estudo da massa sólida a granel

No fluxo de materiais a granel as condições devem ser bem definidas, para que as experiências possam ser normalizadas. Os materiais normalmente transportados possuem grãos de diversas dimensões. O espaço entre os grãos são preenchidos com ar ou água, em materiais secos e molhados, respectivamente.

Conforme Stepanoff [2], tem-se as seguintes condições a serem observadas no estudo da massa sólida, a granel:

1. A massa sólida consiste de partículas tão pequenas em comparação com as dimensões do reservatório, que podem ser consideradas como massa sólida contínua.

2. A massa sólida contínua pode ter pressão normal, com pressão normal e pressão tangencial (cisalhamento) próprias.

3. A pressão normal " σ " e a de cisalhamento " τ " podem aparecer num plano, em qualquer direção da massa e serem relacionadas por uma expressão geral, do tipo;

$$\tau \leq \pm \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi \quad . \quad (3.1)$$

4. As partículas da massa sólida são consideradas elásticas.

5. As partículas dos sólidos são suficientemente fortes para não quebrarem sobre a ação das tensões " σ " e " τ ".

6. A massa dos sólidos possuem as mesmas propriedades em qualquer direção.

Para simplificação dos cálculos, o estudo das forças em

uma massa sólida a granel normalmente será admitido no plano.

3.2 Análise das tensões em sólidos a granel

3.2.1 Tensões num plano

No dispositivo da Figura 2.2, o plano em estudo coincide com a horizontal. Analisando-se as tensões nos planos inclinados em relação ao plano horizontal, mostra-se o triângulo da Figura 3.1 onde as forças são equilibradas. Os lados "ab" e "bc" coincidem com as tensões " σ_1 " e " σ_2 ". A tensão normal " σ " e a tensão de cisalhamento " τ " estão em um plano "ac".

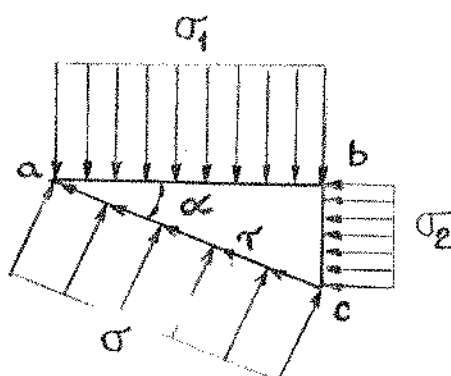


Fig. 3.1 - Tensões em um plano qualquer inclinado de " α " em relação ao plano horizontal.

Neste triângulo tem-se a seguinte relação (soma vetorial):

$$\vec{\sigma}_1 + \vec{\sigma}_2 = \vec{\tau} + \vec{\sigma}, \quad (3.2)$$

resultando a seguinte equação algébrica:

$$(ac) \cdot \sigma - (ab) \cdot \sigma_2 \cdot \text{sen}\alpha - (bc) \cdot \sigma_1 \cdot \text{cos}\alpha = 0.$$

Simplificando-se por meio das equações;

$$(ab) = (ac) \cdot \text{sen}\alpha$$

$$(bc) = (ac) \cdot \text{cos}\alpha$$

tem-se:

$$\sigma - \left(\frac{ab}{ac}\right) \cdot \sigma_2 \cdot \text{sen}\alpha - \left(\frac{bc}{ac}\right) \cdot \sigma_1 \cdot \text{cos}\alpha = 0,$$

ou seja,

$$\sigma = \sigma_2 \cdot \text{sen}^2\alpha + \sigma_1 \cdot \text{cos}^2\alpha \quad \left[\text{kgf/cm}^2\right] \quad (3.3)$$

Para a "tensão de cisalhamento" resulta:

$$(ac) \cdot \tau + (ab) \cdot \sigma_2 \cdot \text{cos}\alpha - (bc) \cdot \sigma_1 \cdot \text{sen}\alpha = 0$$

$$\tau + \left(\frac{ab}{ac}\right) \cdot \sigma_2 \cdot \text{cos}\alpha - \left(\frac{bc}{ac}\right) \cdot \sigma_1 \cdot \text{sen}\alpha = 0$$

$$\tau + \sigma_2 \cdot \text{cos}\alpha \cdot \text{sen}\alpha - \sigma_1 \cdot \text{cos}\alpha \cdot \text{sen}\alpha = 0$$

$$\tau + (\sigma_2 - \sigma_1) \cdot \text{cos}\alpha \cdot \text{sen}\alpha = 0$$

$$\tau + \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{2}\right) \cdot \text{sen}(2\alpha) = 0$$

Logo,

$$\tau = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right) \cdot \operatorname{sen}(2\alpha) \quad \left[\text{Kg f/cm}^2 \right] \quad (3.4)$$

Variando-se o ângulo " α ", encontra-se os valores de " τ " e " σ " para qualquer, plano.

O método do "Círculo de Mohr" pode ser aplicado em qualquer corpo sólido ou massa de material granular. O método é usado para determinar-se o equilíbrio da pressão nos arcos, quando existir a parada do fluxo. Com este círculo (Figura 3.2) pode-se determinar as tensões normais e de cisalhamento em qualquer plano, além de estudar-se a formação de arcos. O círculo de Mohr indica o método mais conveniente para analisar os resultados de vários experimentos. Como as diversas combinações de tensões principais (σ_1 , σ_2) provocam problemas no fluxo, o gráfico da Figura 3.3 permite analisar-se as combinações críticas das tensões normais e de cisalhamento (σ , τ), por meio dos círculos de tensões A, B, C e D. Este círculo de tensões é feito com o ângulo de repouso do material " ϕ ", e a tensão inicial de cisalhamento " τ_0 " (Tabela III.1). Todos os círculos são críticos e tangenciam a reta conforme círculos A, B, C e D.

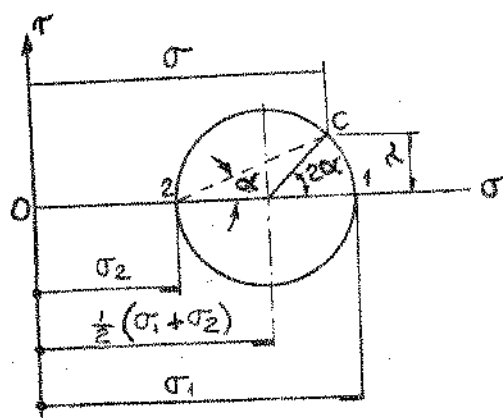


Fig. 3.2 - Círculo de Mohr das tensões normais em materiais granulares.

Tabela III.1 - Propriedades do fluxo de massa sólida a granel de
pois de vários dias de descanso [9]

Material	Densidade da massa γ [ton/m ³]	Coeficien- de atrito, interno, i nicial $f_o = \text{tg}\phi^o$	Tensão ini- cial de ci- salhamento τ_o [10 ⁻³ .kgf/cm ²]
Alumina, (4% (umidade)	1,03 - 1,07	0,54 - 0,56	0,73
Cinzas	0,40 - 0,72	0,84 - 1,20	4,15
Farelo	0,19 - 0,45	1,44 - 1,60	2,93
Cimento	0,96 - 1,60	0,50 - 0,84	3,91
Carvão seco	0,64 - 0,80	0,51	3,17
Carvão (6% umidade)		1,00	9,77
Coque	0,37 - 0,53	0,51 - 1,19	2,20
Farinha de trigo	0,45 - 0,70	0,57 - 1,16	2,93
Trigo em grãos	0,64 - 0,83	0,58 - 0,73	1,71
Calcário (pó)	1,36	0,57 - 1,20	0,98
Areia seca	1,23 - 1,60	0,57	3,66
Areia umida		0,84	9,77
Areia de moldagem (fundição)	0,85 - 1,30	0,58 - 0,73	7,32-12,2
Serragem (seca)	0,16 - 0,32	0,60	2,44
Serragem (umida)		1,50	9,77
Silicato de sódio	0,40 - 1,25	0,60 - 0,85	12,2-19,5
Escória	0,66 - 0,90	1,14	6,84
Turfa	0,32 - 0,80	0,62 - 1,19	4,88

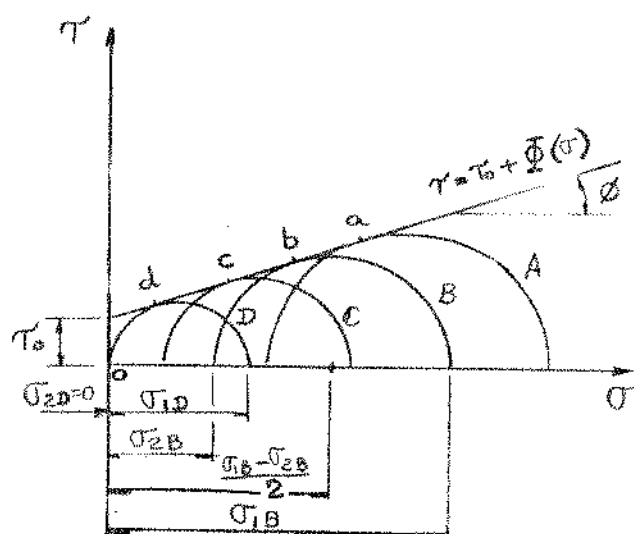


Fig. 3.3 - Diagrama característico da massa sólida (a granel).

3.2.2 Determinação da tensão inicial de cisalhamento

Para determinar-se o valor de " τ_0 ", utiliza-se o dispositivo mostrado na Figura 3.4, que consiste de um Silo (1), cuja chapa de fundo (2) pode ser removida, e uma válvula de gaveta (3).

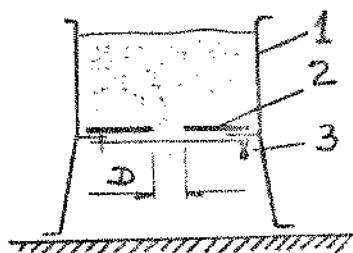


Fig. 3.4 - Aparelho para medir a abertura máxima da boca de descarga na formação de arcos |2|.

A boca de descarga possui diâmetros variáveis (um para cada chapa de fundo). Com o silo cheio, abre-se a válvula (3). Se não

ocorrer fluxo, reúne-se o material e coloca-se nova chapa de fundo, com maior diâmetro até que o material comece a fluir. Com este diâmetro aplica-se a seguinte equação;

$$\tau_o = \frac{D \cdot \gamma \cdot g}{4000 \cdot (1 + \sin \phi_o)} \left[\frac{\text{kgf/cm}^2}{\text{cm}} \right] \quad (3.5)$$

Para cálculo da tensão inicial de cisalhamento do material. Os valores assim determinados, para alguns materiais, constam na Tabela III.1, como proposto por Zenkov e apresentado por Stepanoff [2], referido a um período de repouso antes da abertura da válvula de gaveta (3).

3.2.3 Dimensionamento da boca de descarga de um silo

O diagrama da Figura 3.3 contém todas as informações das tensões e do fluxo do material, servindo para calcular o tamanho mínimo da abertura da boca de descarga sem que ocorra o arco (parada de fluxo). O círculo "D", representa a tensão de equilíbrio na superfície do arco, onde a menor tensão é igual a zero ($\sigma_{2D} = 0$), e a maior tensão (σ_{1D}) é igual ao diâmetro deste círculo.

Para melhor visualização das tensões normais (σ_1 e σ_2), a Figura 3.5 apresenta diversos pontos de tensões no interior de um silo. O cálculo da tensão (pressão) do material no interior do silo está apresentado no anexo D. Quando no centro do arco tensão principal (σ_1) for igual ou superior à tensão normal (σ_b), como encontrado na Figura 3.7, o arco rompe-se, iniciando-se o fluxo de material.

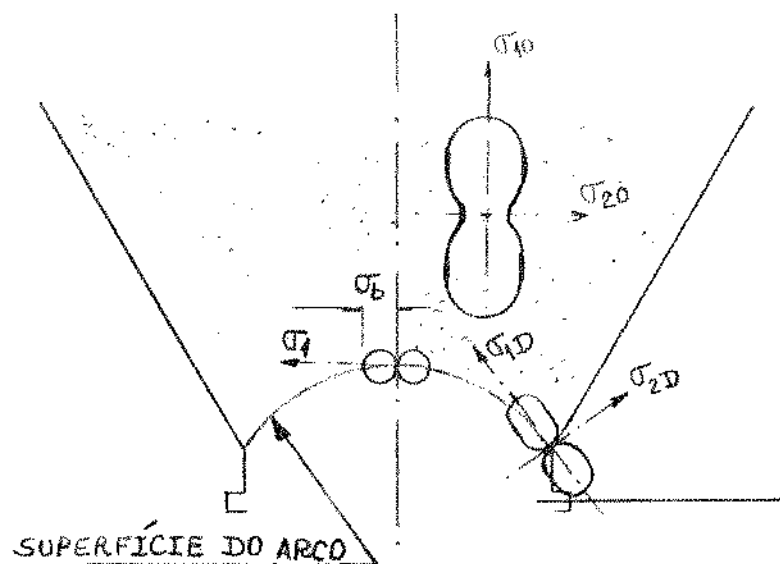


Fig. 3.5 - Pontos de tensões (σ_1 , σ_2) no material dentro de um silo.

Para que o fluxo de material não seja interrompido, calcula-se as dimensões mínimas para a boca de descarga do silo. A Figura 3.6 mostra um silo, com o volume de material "abba" acima do arco, onde equaciona-se as reações das forças para traçar o diagrama da Figura 3.7, que mostra a tensão de cisalhamento " τ_b " (conforme Figura 3.5)

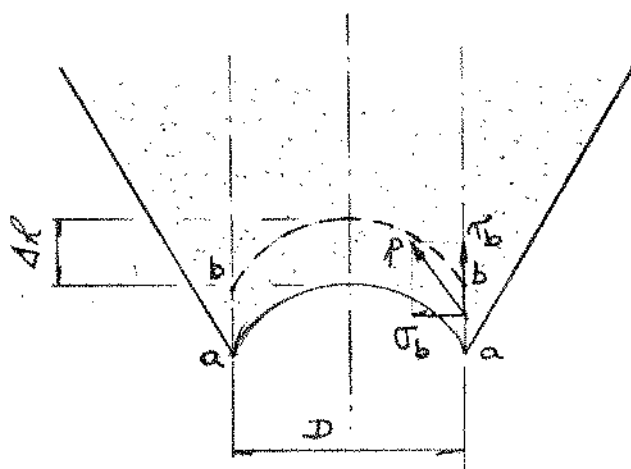


Fig. 3.6 - Boca de descarga de um silo.

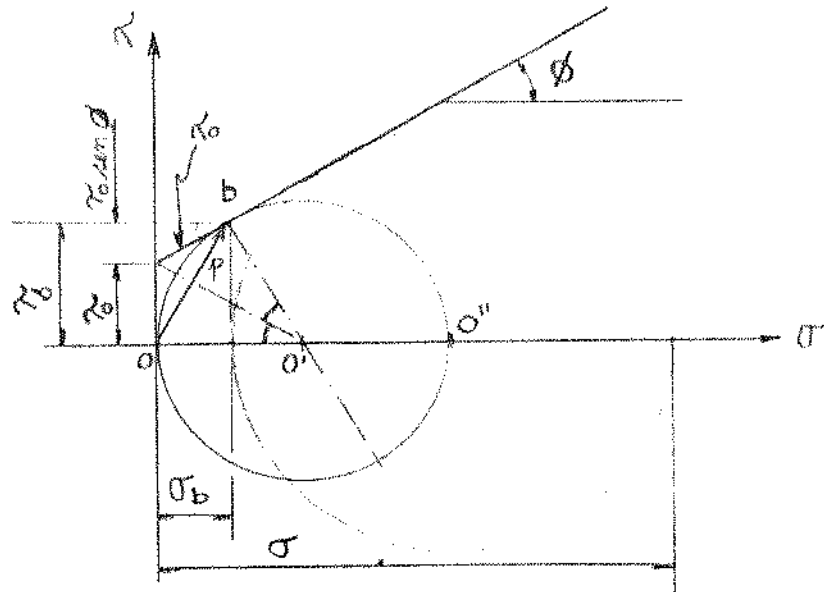


Fig. 3.7 - Diagrama das tensões (σ , τ) na boca de descarga de um silo com formação de arcos [2].

Pela Figura 3.7 tem-se que:

$$\tau_b = \tau_o \cdot (1 + \operatorname{sen} \phi) \quad [\text{Kgf/cm}^2] \quad (3.6)$$

Pela Figura 3.6, o peso do volume "abba" é:

$$G = 0,1 \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot \Delta h \cdot \gamma \cdot g \quad [\text{Kgf}] \quad (3.7)$$

A reação a este peso é equilibrada pela força gerada pela tensão de cisalhamento, dada por:

$$G = 100 \cdot \tau_b \cdot D \cdot \Delta h \quad [\text{Kgf}] \quad (3.8)$$

Igualando-se as equações 3.7 e 3.8 tem-se:

$$D_{\min} \geq \frac{4000 \cdot \tau_b}{\gamma \cdot g} \quad [\text{cm}], \quad (3.9)$$

que é, o diâmetro mínimo da boca do Silo, para que possa haver fluxo (escoamento).

Considerando-se a equação 3.6 para boca de descarga circular, resulta:

$$D_{\min} \geq \frac{4000 \cdot \tau_o}{\gamma \cdot g} \cdot (1 + \operatorname{sen} \phi) \quad [\text{cm}] \quad (3.10)$$

Analogamente, para boca de descarga quadrada, resulta:

$$G = 0,1 \cdot a^2 \cdot \Delta h \cdot \gamma \cdot g \quad [\text{Kgf}] \quad (3.11)$$

$$G = 400 \cdot a \cdot \tau_b \cdot \Delta h \quad [\text{Kgf}] \quad (3.12)$$

Igualando-se as equações 3.11 e 3.12, tem-se:

$$a_{\min} \geq \frac{4000 \cdot \tau_b}{\gamma \cdot g} = \frac{4000 \cdot \tau_o}{\gamma \cdot g} \cdot (1 + \operatorname{sen} \phi) \quad [\text{cm}] \quad (3.13)$$

que corresponde à dimensão mínima do lado da boca quadrada, para que ocorra fluxo.

3.2.4 Fórmula geral para o dimensionamento da boca de descarga do silo

Conhecendo-se a tensão inicial de cisalhamento (τ_o), o ângulo de repouso (ϕ) e a densidade do material (γ), pode-se calcular a dimensão mínima (a) da boca de descarga de um silo, utilizando-se a equação geral:

$$a = \left(\frac{2000 \cdot \tau_0}{k \cdot \gamma \cdot g} \right) \cdot (1 + \operatorname{sen} \phi) \quad [\text{cm}] \quad (3.14)$$

onde o coeficiente k assume os valores:

- 1) $k = 0,5$: Orifícios circulares, quadrados e triangulares.
- 2) $k = 1,0$: Orifícios retangulares com um dos lados ($b \gg a$) bem maior que o outro.
- 3) $k = \frac{b}{a + b}$: Orifícios retangulares da lados com dimensões " a " e " b ".

A equação 3.14 é resultante das equações 3.10 e 3.13, por similaridade, onde as constantes foram substituídas pelo coeficiente k .

3.3 Coeficiente de mobilidade

O coeficiente de mobilidade (M) é definido como:

$$M = \sigma_2 / \sigma_1 \quad (3.15)$$

onde " σ_1 " e " σ_2 " são as tensões principais. O coeficiente de mobilidade está relacionado com a fluidez do material. Aumentando-se a tensão normal " σ ", aumenta-se as tensões principais " σ_1 " e " σ_2 ", alterando-se consequentemente as condições de fluidez do material. Por exemplo, para a água tem-se: $\sigma_1 = \sigma_2$ e $M = 1$; para corpos rígidos tem-se: $\sigma_2 = 0$. Logo, o coeficiente de mobilidade determina a fluidez do material.

3.4 Raio hidráulico

O fluxo de material também está relacionado com a abertura da boca de descarga, e com o ângulo de inclinação do cone de saída (θ). A altura do material acima da boca de descarga não altera a vazão (ver Figura 4.11). A Figura 3.10 apresenta três tipos de cones de saída. Para analisar o fluxo em canais de diversas configurações, utiliza-se o Raio Hidráulico [2] como sendo a razão entre a área e o perímetro do orifício da boca de descarga.

$$R = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}} \quad [\text{cm}] \quad (3.16)$$

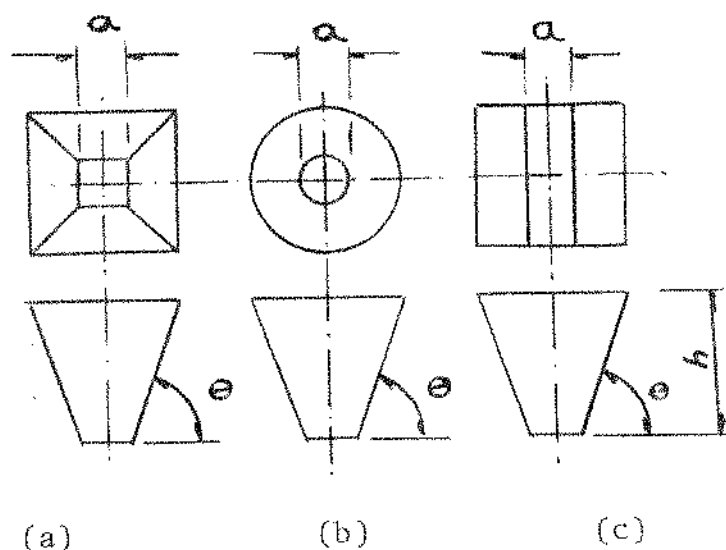


Fig. 3.10 - Formas geométricas do cone de saída do silo.

Quanto maior o Raio hidráulico (R) maior a capacidade de fluxo pelo orifício da boca de descarga [2]. Conforme a forma da boca de descarga, tem-se as seguintes relações:

1) Orifícios quadrados,

$$R = \frac{a^2}{4 \cdot a} = 0,25 \cdot a \quad [\text{cm}] \quad (3.17)$$

2) Orifícios circulares,

$$R = 0,25 \cdot D \quad \left[\text{cm} \right] \quad . \quad (3.18)$$

3) Orifícios retangulares com o comprimento bem maior que a largura ($b \gg a$),

$$R = 0,5 \cdot a \quad \left[\text{cm} \right] \quad . \quad (3.19)$$

Para orifícios retangulares, utiliza-se a Tabela III.2.

Tabela III.2 - Valores do Raio hidráulico (R) e funções correlatas.

Nº	Relação no retângulo b/a	Raio hidráulico R	Constante k	Fator do retângulo	Forma da secção
1	1,00	0,250.a	0,500	1,000	Redonda e Quadrada
2	1,25	0,277.a	0,554	0,900	Retangular
3	1,5	0,300.a	0,600	0,833	Retangular
4	2,0	0,333.a	0,667	0,755	Retangular
5	3,0	0,375.a	0,750	0,666	Retangular
6	4,0	0,400.a	0,800	0,625	Retangular
7	∞	0,500.a	1,00	0,500	Retangular (forma de gume)

O menor Raio Hidráulico (R) para que não se forme arco é dado pela equação:

$$R_{\min} \geq 1000 \left(\frac{\tau_0}{\gamma \cdot g} \right) \cdot (1 + \sin \phi) \quad [\text{cm}] \quad (3.20)$$

As dimensões mínimas para a boca de descarga estão na equação 3.14.

Kvapil [10] e Atıyaman [11] apresentam uma relação prática onde a menor dimensão do edifício deverá ser maior que cinco vezes o tamanho dos maiores grãos, ou seja,

$$a > 5 \cdot d \quad (3.21)$$

onde "d" é maior dimensão do grão.

3.5 Determinação da abertura mínima da boca de descarga

Neste trabalho é apresentado um equipamento que analisa o fluxo da areia seca. Para dimensionar a boca de descarga deste equipamento utiliza-se o seguinte exemplo:

3.5.1 Exemplo do cálculo da abertura mínima da boca de descarga de um silo.

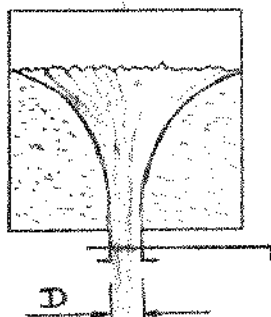


Fig. 3.11 - Silo com boca de descarga (D).

I. Material = AREIA GROSSA SÊCA HETEROGÊNEA

Granulometria $d = 0,30$ a $0,01\text{cm}$ Ângulo de repouso $\phi = 30^\circ$ Tensão inicial de cisalhamento $\tau_0 = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ Kgf/cm}^2$ Densidade $\gamma = 1,35 \text{ ton/m}^3$

A abertura está limitada em relação ao:

a) Tamanho máximo dos grãos, com a equação 1.7;

$$D_{\text{mín}} \geq k \cdot (8,0 + d) \text{tg}\phi = 0,24 \cdot (8,0 + 0,3) \text{tg}30^\circ = 1,14\text{cm}$$

b) Tensão de cisalhamento inicial, com a equação 3.14;

$$D_{\text{mín}} \geq \left(\frac{2000 \cdot \tau_0}{k \cdot \gamma \cdot g} \right) \cdot (1 + \text{sen}\phi) = \left(\frac{2000 \cdot 3,66 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 1,35 \cdot 9,8} \right) (1 + \text{sen}30^\circ) = 1,66\text{cm}$$

c) Tamanho máximo dos grãos, com a equação 3.21;

$$D_{\text{mín}} \geq 5 \cdot d = 5 \cdot 0,3 = 1,5\text{cm}$$

II. Material = AREIA BRANCA HOMOGÊNEA

 $d = 0,02\text{cm}$ $\phi = 33^\circ$ $\tau_0 = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ Kgf/cm}^2$ $\gamma = 1,52 \text{ ton/m}^3$

As limitações da abertura da boca de descarga são:

$$\text{a) } D_{\text{mín}} > 0,26 \cdot (8,0 + 0,02) \cdot \text{tg}33^\circ = 1,36\text{cm};$$

$$b) D_{\min} \geq \left(\frac{2000 \cdot 3,66 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 1,52 \cdot 9,8} \right) \cdot (1 + \sin 33^\circ) = 1,52 \text{ cm};$$

$$c) D_{\min} \geq 5 \cdot 0,02 = 0,10 \text{ cm}.$$

Comparando-se os exemplos I e II, conclui-se que:

- ocorre uma significativa variação nos valores de $D_{\min}$, principalmente em relação ao critério c, correspondente a $D_{\min}$ calculado em base ao tamanho máximo dos grãos;

Critério		a	b	c
$D_{\min}$ (cm)	Areia Grossa	1,14	1,66	1,50
	Areia Fina	1,36	1,52	0,10*

*variação mais significativa.

- o valor a ser adotado é o valor máximo, calculado pelos 3 critérios (a, b, c) ou seja:

Areia grossa = 1,66 cm.

Areia fina = 1,52 cm.

- para granulometrias finas ocorre uma diminuição do diâmetro da boca de descarga, comparada com granulometrias maiores.

4. FLUXO DE MATERIAIS A GRANEL EM SILOS

4.1 Considerações sobre a vazão na boca de descarga

A vazão (W) de um dado material, fluindo através de um orifício, varia com o cubo do diâmetro (D) deste orifício. O volume de material descarregado independe da pressão no orifício

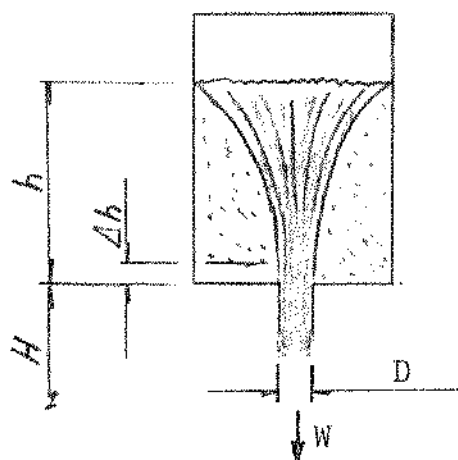


Fig. 4.1 - Silo com material a granel com orifício de descarga com diâmetro " D ".

(ou acima), como demonstrado por Durand [12]. O controle da vazão (W) deve ser no orifício de saída, chamado também de "boca de descarga". Em dutos inclinados os grãos movem-se sob a força da gravidade. Para um corpo em queda livre partindo do repouso, tem-se as relações:

$$v = g \cdot t \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (4.1)$$

$$H = g \cdot \frac{t^2}{2} = v \cdot t/2 \quad \left[\text{m} \right] \quad (4.2)$$

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (4.3)$$

$$H = \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad [m] \quad (4.4)$$

onde:

v = velocidade do grão $[m/s]$;

t = tempo $[s]$;

g = aceleração da gravidade $[m/s^2]$;

H = altura percorrida pelo grão, em queda livre $[m]$.

Nota-se que a massa não aparece na equação, indicando que todos os grãos caem com a mesma velocidade. A altura abaixo da boca de descarga para os grãos caindo em queda livre, sem resistência do ar, é dada pela equação 4.4, onde " v " é a velocidade média dos grãos. Se existirem interferências, como curvas ou resistência do ar, a velocidade é alterada. Consequentemente a equação 4.3 não será válida.

O comportamento dos grãos dentro de um silo pode ser observado através de um vidro colocado na parede externa, como mostrado nas Figuras 4.2 e 4.3.

A massa de material descarregada na unidade de tempo (vazão W), pode ser expressa por uma equação geral da forma

$$W = C \cdot D^\beta \quad [Kg/mín], \quad (4.5)$$

onde as constantes C e β são constantes numéricas que dependem principalmente das unidades utilizadas, material, densidade, granulometria, secção da boca de descarga, e do tipo de cone do silo.

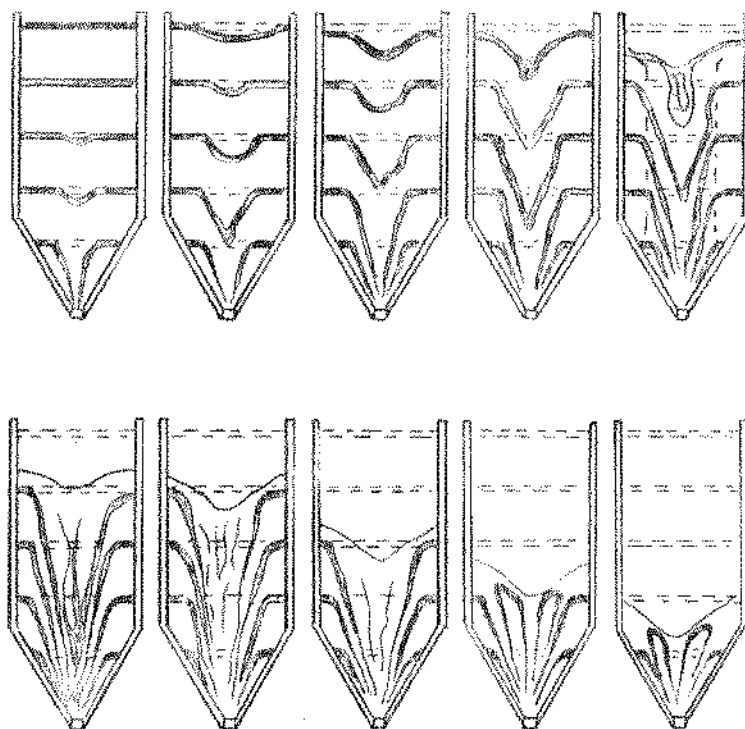


Fig. 4.2 - Fluxo padrão de um silo simples, registrado por Luft [2].

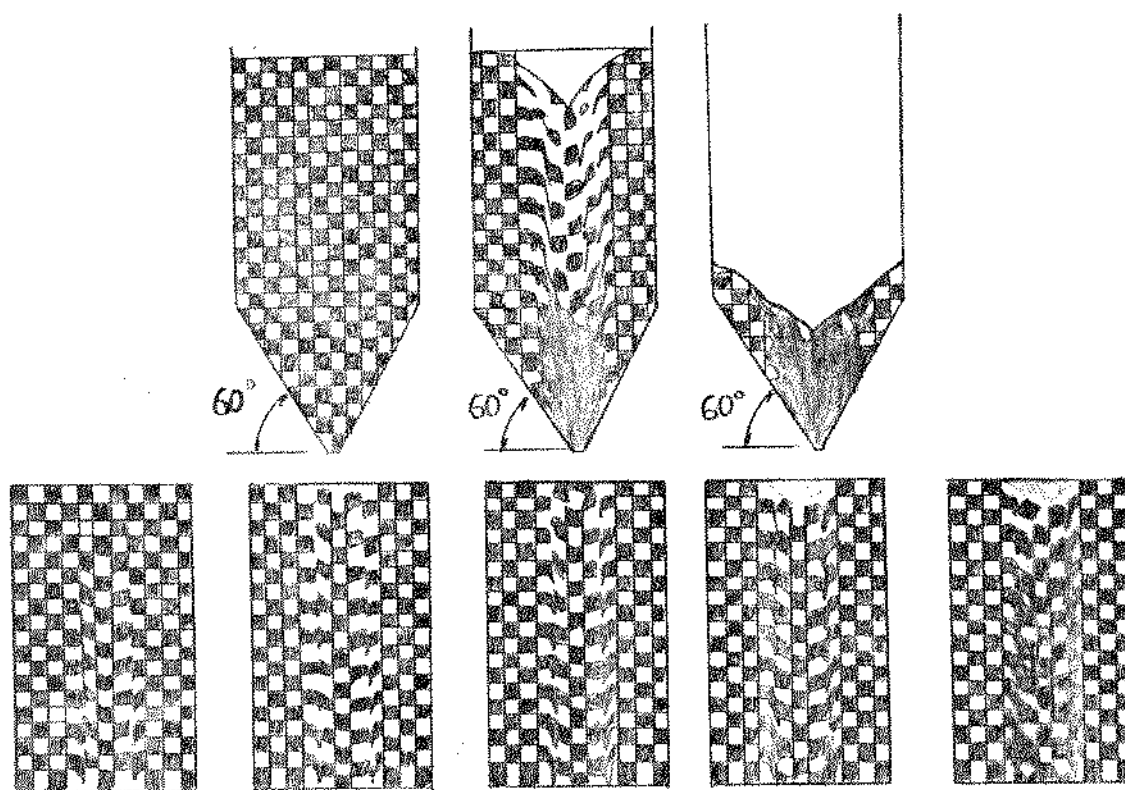


Fig. 4.3 - Método de visualização do fluxo padrão proposto por Kvapil [10].

A determinação de uma equação completa, que considere todos os fatores físicos do material e da geometria do silo é uma

tarefa bastante complexa, devido à enorme quantidade de fatores envolvidos. Vários autores propuseram equações particulares para o cálculo da vazão W , aplicáveis a particulares formas de boca de descarga e materiais utilizados em testes, como por exemplo:

1) Kvapil [10],

$$W = C \cdot D^3 \quad \left[\text{Kg/mín} \right], \quad (4.6)$$

com $\beta = 3$, e sem especificar o valor da constante C .

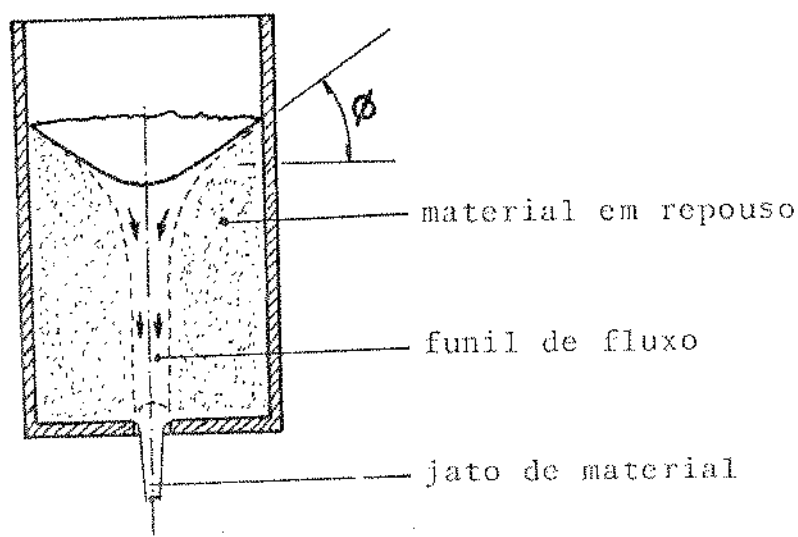


Fig. 4.4 - Esquema do fluxo dentro de um silo cilíndrico para uma boca de descarga plana, conforme Durand [12].

2) Gregory [13],

$$W = 0,144 \cdot D^{2,5} \quad \left[\text{Kg/mín} \right] \quad (4.7)$$

3) Shirai [14],

$$W = 0,068 \cdot D^{2,5} \quad \left[\text{Kg/mín} \right] \quad (4.8)$$

com $C = 0,068$ e $\beta = 2,5$.

4) Beverloo [15],

$$W = 0,06 \cdot K \cdot \gamma \cdot \sqrt{g} \cdot (D - 2,9d)^{2,5} \quad \left[\text{Kg/mín} \right] \quad (4.9)$$

onde:

γ = densidade do material $\left[\text{ton/m}^3 \right]$;

g = aceleração da gravidade $\left[\text{m/s}^2 \right]$;

K = constante que depende do material

d = maior dimensão do grão $[\text{cm}]$;

D = diâmetro da boca de descarga $[\text{cm}]$.

Destas equações (4.6 a 4.9) verifica-se uma grande variação nas constantes C e β , o que implica em uma melhor análise dos fatores envolvidos, o que será realizado no capítulo 4.3.

4.2 Influência da granulometria

O tamanho e a forma dos grãos exercem uma significativa influência no valor da vazão. Esta condição pode ser observada na Figura 4.5, relativa a areia grossa seca, em ensaios realizados por Durand [12]. Nota-se nesta figura que, para uma dada vazão o aumento do tamanho de grão resulta na necessidade de uma maior área (A) de descarga da boca do silo. Nos testes, o ângulo (θ) do cone de saída do silo é menor que o ângulo de repouso (ϕ) do material.

Para considerar a influência do tamanho do grão, Durand [12] propõe a utilização de uma área corrigida (A'), dada pela expressão:

$$A' = \frac{\pi}{4} \cdot (D - 1,5d)^2 \quad \left[\text{cm}^2 \right], \quad (4.10)$$

onde:

D = diâmetro da boca de descarga do silo $[cm]$;

d = diâmetro do maior grão $[cm]$.

Esta condição resulta em um alinhamento dos pontos correspondente ao tamanho dos grãos, permitindo uma linearidade da variação da vazão, como pode ser notado na Figura 4.6, eliminando-se assim a influência do tamanho dos grãos.

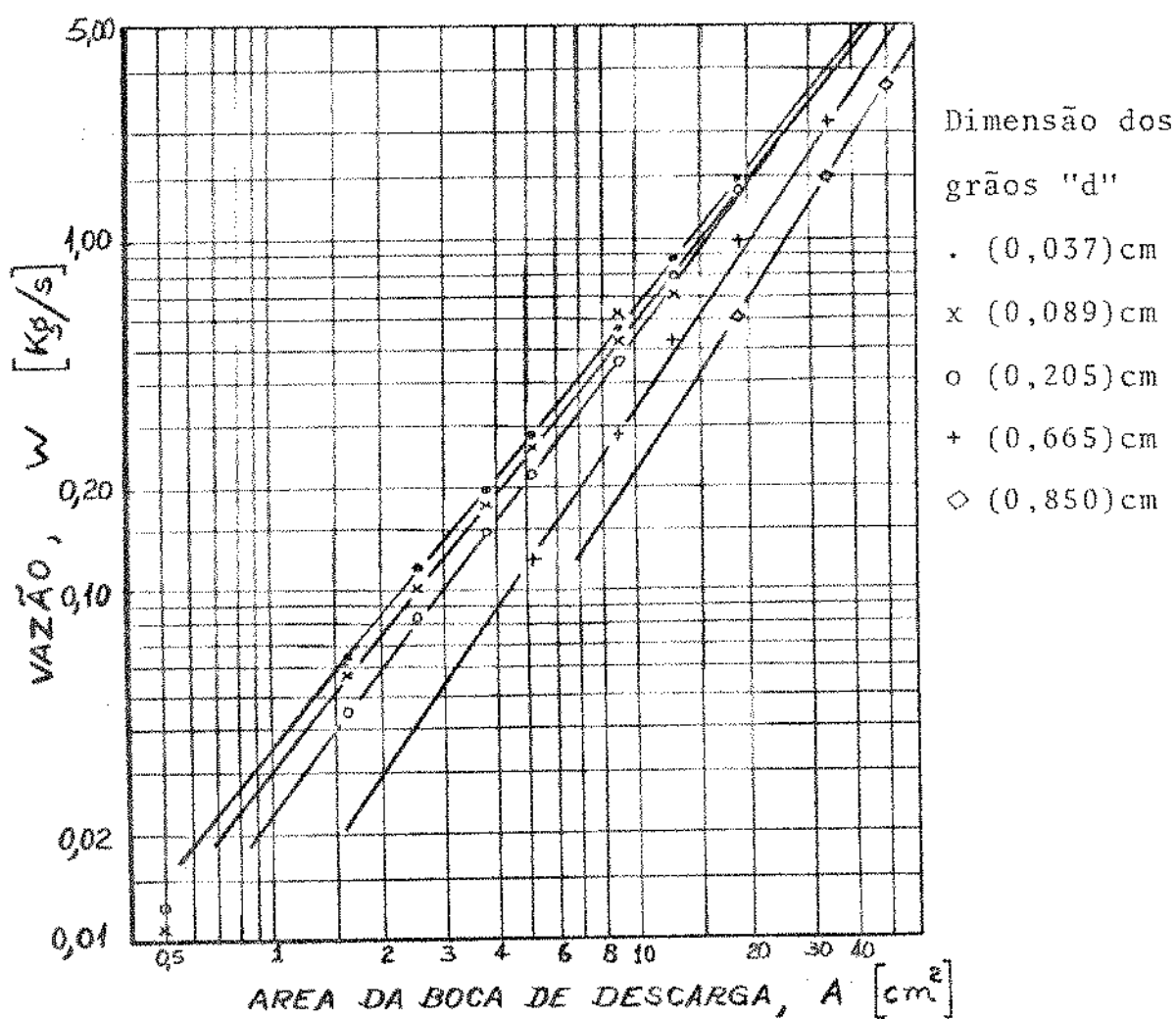


Fig. 4.5 - Variação da vazão em função da área total da boca de descarga, para diferentes tamanhos de grãos de areia seca [12].

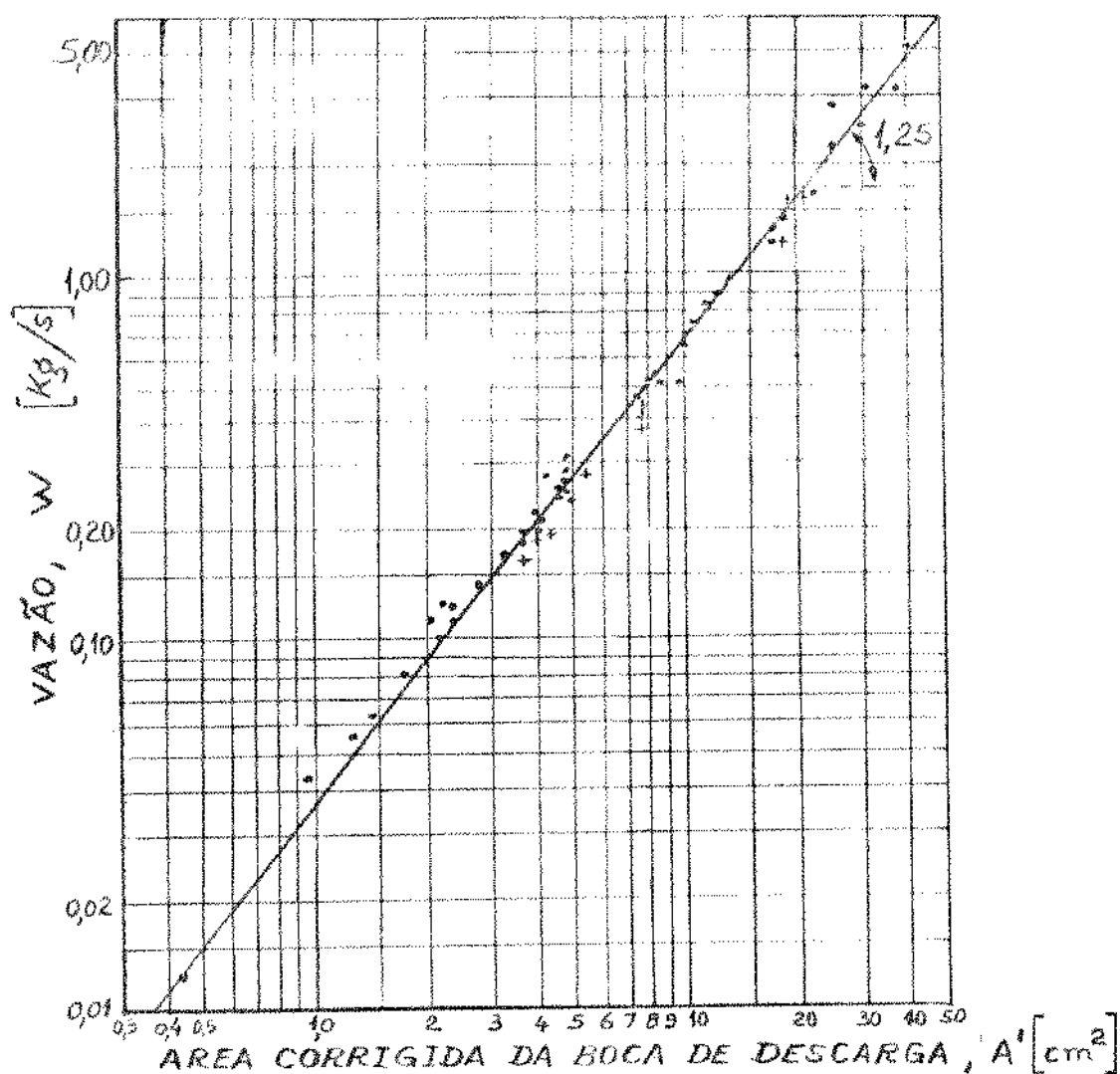


Fig. 4.6 - Variação da vazão em função da área corrigida da boca de descarga [12].

Este método é particularmente válido para materiais de granulometria grossa, e de pouca influência para pós finos.

4.3 Teoria do fluxo

A Figura 4.7 mostra uma pequena coluna de material (Δh), em queda livre no funil de fluxo, onde a força de atrito das partículas nas paredes do funil de fluxo é desprezada em relação

ao peso "P" do elemento " Δh ".

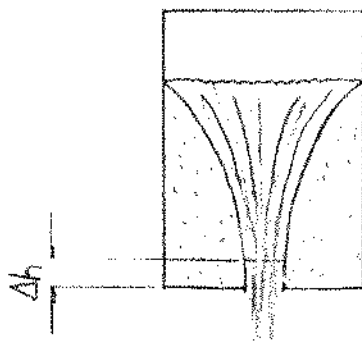


Fig. 4.7 - Funil de fluxo em um silo.

A velocidade " v_o " do elemento é dada por:

$$P \cdot \Delta h = \frac{m \cdot v_o^2}{2}$$

onde:

$$v_o = \sqrt{\frac{2 \cdot P \cdot \Delta h}{m}} \quad (4.11)$$

P = peso da coluna [Kgf];

m = massa da coluna [Kg];

v_o = velocidade de queda livre da coluna [m/s];

Δh = altura de uma pequena coluna de material [m].

A massa (m) do elemento é:

$$m = \frac{0,1 \cdot A \cdot \Delta h \cdot \gamma}{g}, \quad [\text{Kg}] \quad (4.12)$$

onde γ é a densidade do material [ton/m³]. Substituindo-se este valor (m) na equação 4.11, resulta:

$$v_o = 100 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{P}{A \cdot \gamma}} \left[\text{m/s} \right] , \quad (4.13)$$

sendo a relação:

$$\sigma = \frac{P}{A} \left[\text{Kg f/cm}^2 \right] , \quad (4.14)$$

a tensão média de compressão no elemento. Conhecendo-se esta tensão na boca de descarga, a velocidade resulta:

$$v_o = 447 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \sigma}{\gamma}} \left[\text{m/s} \right] . \quad (4.15)$$

Na prática, a velocidade (v_o) é menor que a velocidade calculada pela equação 4.15. Então, deve-se introduzir um coeficiente de descarga " λ ", que depende principalmente da granulometria, forma e mistura dos grãos, área e forma da boca de descarga, e da inclinação (θ) do cone de descarga do silo.

Na prática, a equação 4.15 é dado por:

$$v_o = 447 \cdot \lambda \cdot \sqrt{g \cdot \frac{\sigma}{\gamma}} \left[\text{m/s} \right] \quad (4.16)$$

Para silo com grande inclinação no cone de descarga, como mostrado na Figura 4.8, todo o material se movimenta.

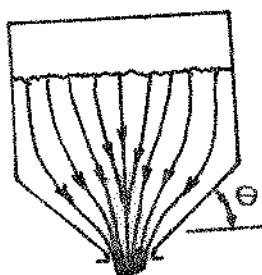


Fig. 4.8 - Fluxo em um silo com fundo cônico.

A pressão média acima da boca de descarga pode ser tomada como u ma pressão hidrostática,

$$\sigma_o = \frac{\gamma \cdot \Delta h}{10} \quad \left[\text{Kgf/cm}^2 \right] \quad (4.17)$$

onde:

Δh = altura de uma pequena coluna de material no silo
 $\left[\text{m} \right]$;

γ = densidade do material $\left[\text{ton/m}^3 \right]$.

Neste caso, a equação da velocidade é dada por:

$$v_o = \lambda \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad \left[\text{m/s}^2 \right], \quad (4.18)$$

onde o coeficiente de descarga " λ " é determinado a partir de um modelo reduzido, e utilizado no cálculo de silos com grandes di mensões, por meio de um fator de correção de escala.

A equação empírica da velocidade que Zenkov [9] apresen ta é:

$$v_o = \lambda \cdot \sqrt{0,02 \cdot g \cdot v \cdot R} \quad \left[\text{m/s} \right] \quad (4.19)$$

onde:

R = raio hidráulico $\left[\text{cm} \right]$, com:

redondo : $R = D/4$

quadrado : $R = a/4$

$$v = \frac{1}{f} + 2f - \sqrt{1 + f^2}; \quad (4.20)$$

$f = \text{tg}\phi$ = coeficiente de atrito estático do material;

A variação da constante "v" é mostrada na Figura 4.9 onde nota-se que a partir do valor mínimo $v = 1,56$, haveria um aumento. Isto não é verdade pois o ângulo de repouso (ϕ) de maioria dos materiais estão entre 20° a 45° (anexo A). Por isso, adota-se o valor mínimo de "v" para " ϕ " entre 40° a 45° .

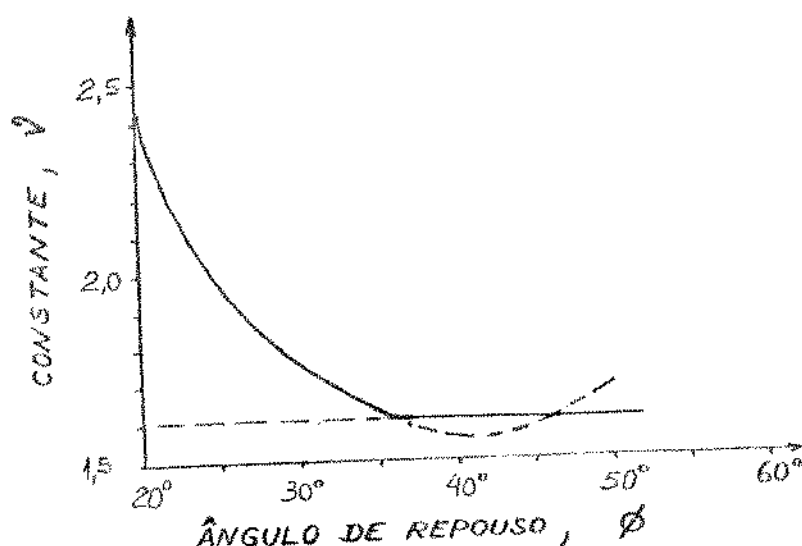


Fig. 4.9 - Diagrama da equação 4.20, $v=f(\phi)$.

A vazão proposta para orifícios circulares, em materiais de diferentes granulometria, é dada por;

$$W = \gamma \cdot A' \cdot v', \quad (4.21)$$

onde

$$A' = \pi/4 \cdot (D - 1,5 \cdot d)^2 \quad [\text{cm}^2], \quad (4.22)$$

$$v' = \lambda \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot v \cdot R'} \quad [\text{m/s}], \quad (4.23)$$

$$R' = \frac{1}{4} \cdot (D - 1,5 \cdot d) \quad [\text{cm}]. \quad (4.24)$$

Substituindo-se na equação 4.21, resulta;

$$W = 0,85 \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot \sqrt{g \cdot v} \cdot (D - 1,5d)^{2,5} \quad \left[\text{Kg/min} \right] \quad (4.25)$$

O coeficiente de descarga " λ " é determinado a partir do dispositivo proposto neste trabalho, onde conhecendo-se o material mede-se a vazão, determinando-se o coeficiente com a equação;

$$\lambda = \frac{W}{0,85 \cdot \gamma \cdot \sqrt{g \cdot v} \cdot (D - 1,5 \cdot d)^{2,5}} \quad , \quad (4.26)$$

onde " W " é a vazão medida no dispositivo do material analisado.

Os valores de " λ " variam com as propriedades do fluxo, a densidade, a umidade, o ângulo de repouso, a granulometria, a forma dos grãos, a forma da abertura da boca de descarga, a inclinação do cone de saída, a inclinação do duto de transporte, as curvas dos dutos, a secção do duto e outros fatores.

O coeficiente de descarga " λ " está relacionado com a perda de carga devido ao atrito. Os valores aproximados [2] de " λ " são:

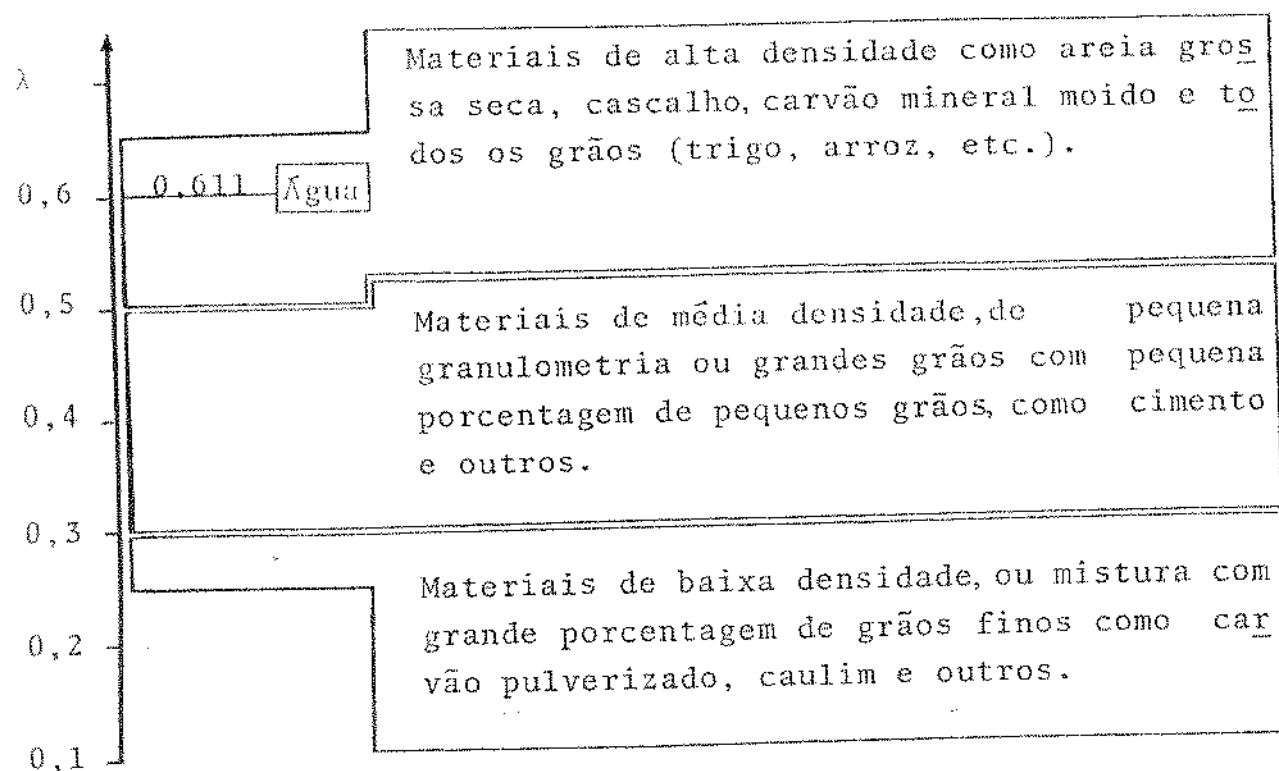


Fig. 4.10 - Coeficiente de descarga " λ ".

Para a água o coeficiente de descarga " λ " é da ordem de 0,611, que corresponde ao "coeficiente de contração" da hidráulica para placas de orifícios, utilizadas nas medições de fluxo.

4.4 Influência da altura " h " de material na vazão de um determinado orifício

A experiência realizada por Durand [12] mostra que não há variação da vazão de material através da boca de descarga de um silo, em função da altura do material nele contido, como mostrado na Figura 4.11.

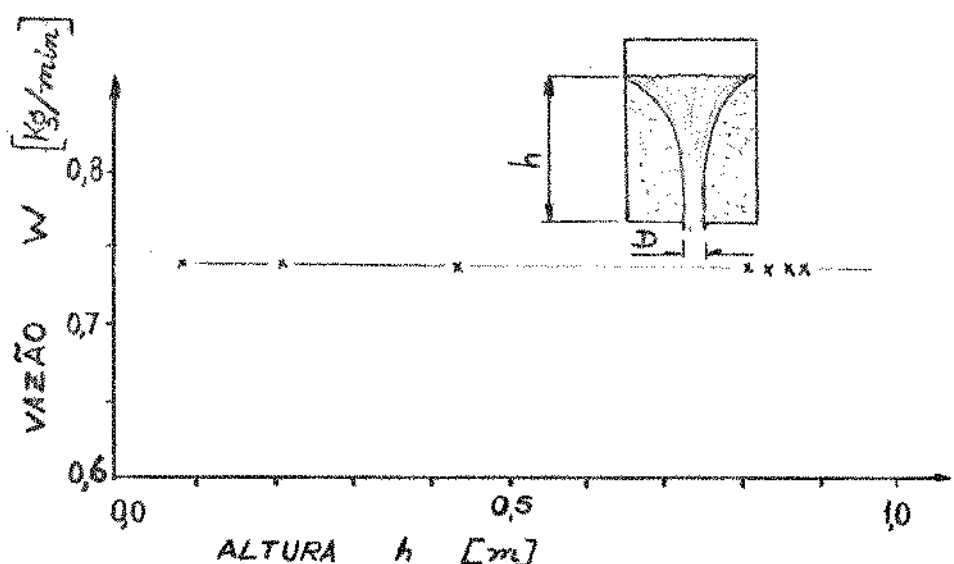


Fig. 4.11 - Vazão em função da altura de material acima da boca de descarga de um silo [12]. Diâmetro total da boca de descarga $D = 8\text{mm}$, tamanho dos grãos $d = 0,37\text{mm}$.

Conclui-se que, acima da boca de descarga, a uma altura " h_0 ", os arcos vão rompendo-se, como foi mostrado na Figura 4.2,

formando-se a seguir outros arcos no mesmo local, e que abaixo desta altura " h_0 " os grãos caem em queda livre. Com as equações 4.4 e 4.23 a altura " h_0 " é dada por;

$$h_0 = \frac{\lambda^2}{2 \cdot g} \cdot (2 \cdot g \cdot v \cdot R') = \lambda^2 \cdot v \cdot \frac{1}{4} \cdot (D - 1,5d) =$$

$$= 0,0025 \cdot \lambda^2 \cdot v \cdot (D - 1,5 \cdot d) \quad \left[m \right] \quad (4.27)$$

4.5 Variação da área transversal no fluxo de materiais em queda livre abaixo da boca de descarga

A área transversal do fluxo está diretamente ligada com a velocidade dos grãos (ou altura da queda do material), como mostrado na Figura 4.12.

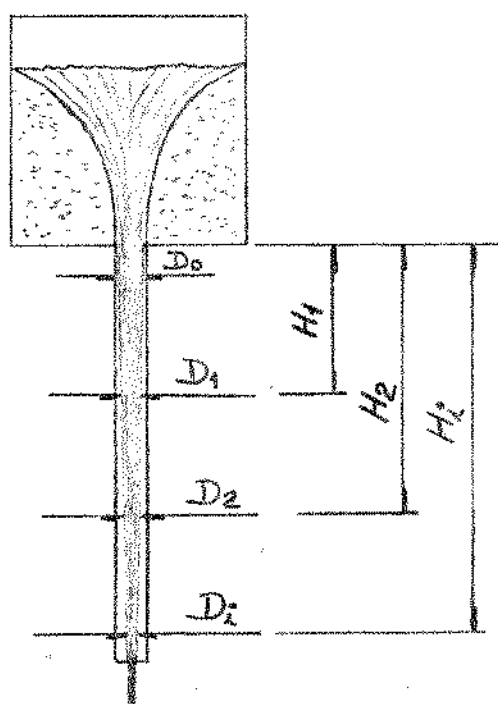


Fig. 4.12 - Variação da área do fluxo de material em queda livre, abaixo da boca de descarga.

A equação da velocidade (v_i), em cada i ésima secção, é dada por:

$$v_i = v_o + \sqrt{2 \cdot g \cdot H_i} = \frac{W}{6 \cdot \gamma \cdot A_i} = \frac{0,21 \cdot W}{\gamma \cdot D_i^2} \quad \left[\frac{m}{s} \right]. \quad (4.28)$$

O diâmetro transversal do fluxo diminui com o aumento da velocidade dos grãos, logo pela Figura 4.12,

$$v_o < v_1 < v_2 < v_i \quad e$$

$$D_o > D_1 > D_2 > D_i;$$

onde

$$v_i = \text{velocidade média dos grãos no ponto "i"} \quad \left[\frac{m}{s} \right];$$

$$D_i = \text{diâmetro do fluxo na secção "i"} \quad [cm].$$

Se na secção "i" a área transversal do fluxo for maior que a área transversal do duto (boca de descarga), o fluxo será interrompido nesta secção.

A equação para o diâmetro ocupado pelo material em que da livre é:

$$D_i = \left[\frac{0,21 \cdot W}{\gamma \cdot (v_o + \sqrt{2 \cdot g \cdot H_i})} \right]^{0,5} \quad [cm] \quad (4.29)$$

onde:

$$H_i = \text{altura da secção "i" abaixo da boca de descarga} \quad [m];$$

$$W = \text{vazão} \quad [Kg/min];$$

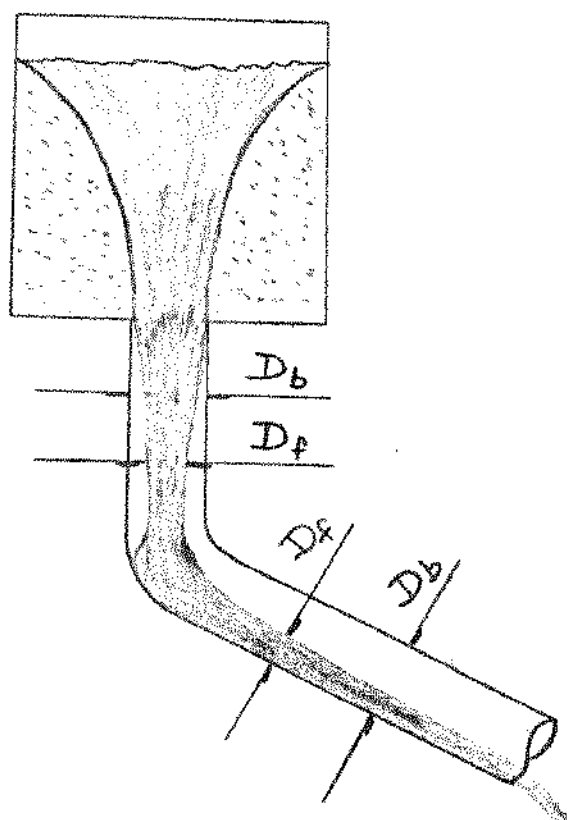
g = aceleração da gravidade $[m/s]$;

v_0 = velocidade inicial na boca de descarga (equação 4.15), $[m/s]$;

γ = densidade do material $[ton/m^3]$.

4.6 Fluxo em dutos curvos

Nos dutos curvos a velocidade dos grãos diminuem devido à perda de carga, conseqüentemente a área do fluxo aumenta nesta secção. Isto ocorre porque na curva o material muda de direção com o impacto, ver Figura 4.13. Se a velocidade média dos grãos for pequena, a ponto de que os grãos comecem a parar, o fluxo é interrompido. Tal fato ocorre devido ao atrito estático ser maior que o dinâmico (entre grãos).



D_b = diâmetro da boca de descarga

D_f = diâmetro da seção transversal do fluxo

Fig. 4.13 - Fluxo em dutos curvos.

4.7 Fluxo em dutos inclinados

Em dutos inclinados a vazão (W_2) apresenta uma diferença em relação à vazão na vertical (W_1).

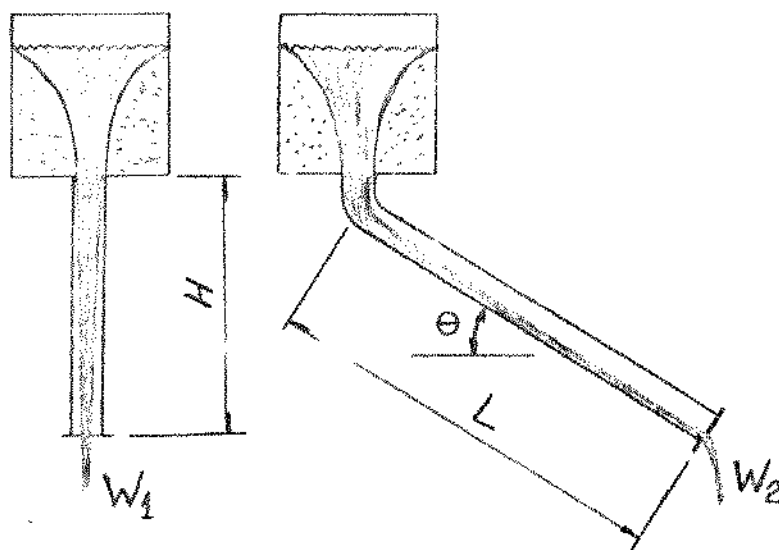


Fig. 4.14 - Fluxo de material em duto inclinado e vertical.

A relação entre estas vazões é dada por;

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = r \quad (4.30)$$

onde a relação "r" varia com o ângulo de inclinação " θ " do duto, conforme Figura 4.15. Esta variação é devida à perda de carga dentro do duto. Tem-se as seguintes considerações sobre o comportamento do fluxo de material, nas três regiões (A, B, C):

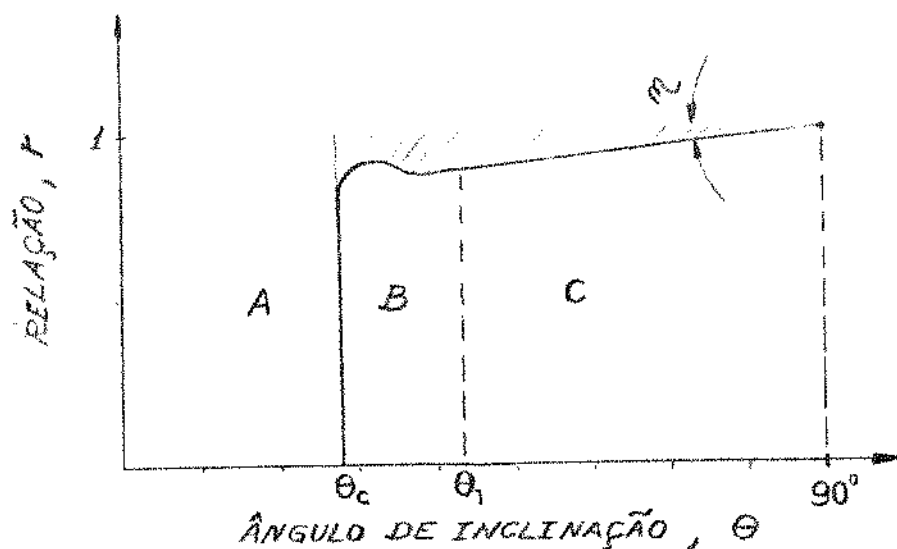


Fig. 4.15 - Variação da relação de vazões (r) em função do ângulo de inclinação (θ) do duto.

Região "A"

Abaixo do ângulo crítico " θ_c " não há escoamento (descarga pelo duto), pois $\lambda_2 = 0$ consequentemente $W_2 = 0$. O material fica retido no duto voltando a fluir em um ângulo superior ao " θ_c ".

Região "B"

Apresenta fluxo instável devido ao atrito que ora é do material contra a parede ora é entre os grãos, causando aumento ou diminuição da vazão.

Região "C"

A variação da vazão apresenta uma linearidade a partir do " θ_c ", considerado como um ângulo a partir do qual existe o fluxo livre. A vazão cresce linearmente com o ângulo de inclinação do duto (θ), correspondendo a uma reta com ângulo " η ", conforme Figura 4.15. As medidas experimentais mostraram que:

-O ângulo " η " é pequeno, ou seja, não há um significativo aumento da vazão " W " em função do ângulo de inclinação " θ ".

- Para diferentes materiais, a variação do ângulo " η " também é pequena, como por exemplo;

Areia grossa ($d = 0,3\text{cm}$) : $\eta = 1,31^\circ$,

Areia fina ($d = 0,02\text{cm}$) : $\eta = 0,61^\circ$,

como será visto no capítulo 6.

- Granulometria homogênea implica em valores menores do ângulo " η ".

- Para areia grossa, a passagem da inclinação de $\theta = 45^\circ$ para $\theta = 90^\circ$ correspondeu a um aumento de 11% na vazão. Para areia fina o aumento foi de 1%. Por isso, como seria de se esperar, quanto maior " θ ", maior a vazão. Porém este aumento não foi significativo. Então, a utilização de um ângulo $\theta_e = 45^\circ$ sempre permitirá o fluxo de descarga, para areia grossa ou fina, podendo ser notada nas Figuras 6.1 e 6.2.

- A equação bastante difundida, e que consta em muitos manuais, é dada por

$$\theta \geq 45^\circ + \frac{\phi}{2}, \quad (4.31)$$

correspondente a uma estimativa muito pessimista quanto ao ângulo de inclinação a ser adotado nas calhas de descarga, implicando em grandes inclinações (θ), com consequente elevação da altura " H " da boca de descarga do silo em relação ao ponto de descarga.

A Figura 4.16 mostra pelo gráfico que para uma distância " s " a variação da altura em função da inclinação da calha é consideravelmente grande, e que empregando-se inclinações (θ) inferiores, a altura entre os pontos de carga e descarga é menor. Consequentemente, diminui o custo das estruturas.

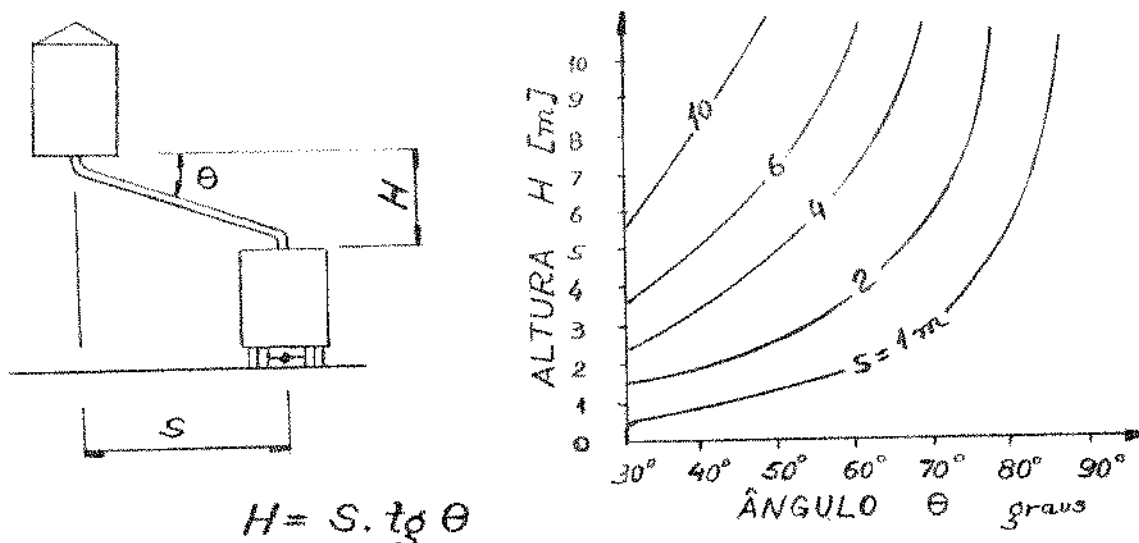


Fig. 4.16 - Altura entre o ponto de carga e do ponto de descarga do material em função de " θ ".

4.7.1 Área transversal do fluxo no duto

A área transversal do fluxo no duto é dada por:

$$A = \frac{W}{6 \cdot \gamma \cdot (v_0 + \lambda \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L \cdot \sin \theta})} \quad (4.32)$$

O aumento da velocidade dos grãos faz com que a área transversal do fluxo diminua. Em dutos inclinados, a área do fluxo pode permanecer constante (mesma velocidade). Isto ocorre quando a inclinação do duto está próxima ao ângulo crítico, ou seja quando o fluxo é interrompido. A Figura 4.17 mostra a seção transversal do fluxo em função da inclinação do duto.

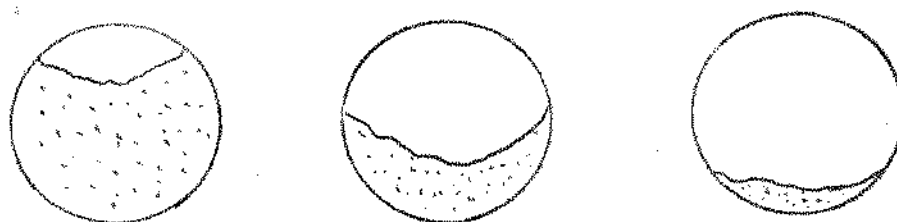


Fig. 4.17 - Área transversal do fluxo em dutos inclinados; para areia grossa.

Se o material estiver parado dentro do duto, o fluxo começará quando a inclinação (θ) do duto for maior que o ângulo de repouso (ϕ) do material. Estando o material fluindo, a interrupção do fluxo deverá ocorrer quando a inclinação atingir o ângulo de atrito crítico (θ_c) do material. O ângulo " θ_c " é determinado com o dispositivo construído e proposto neste trabalho.

4.7.2 Granulometria

A granulometria influi na vazão. Materiais heterogêneos (granulometria variável) apresentam vazões variáveis.

4.7.3 Diâmetro do duto

Em um projeto de tubulações o interesse é determinar o diâmetro (D) do duto e a inclinação mínima (θ), para uma certa vazão. Partindo-se da equação 4.26, e de um dispositivo proposto neste trabalho para dutos inclinados (θ), a constante " λ " é determinada para o material analisado. Em seguida, pela equação 4.25 obtém-se o diâmetro do duto em função da vazão (W) com a equação;

$$D \geq \left(\frac{W}{0,85 \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot \sqrt{g \cdot v}} \right)^{0,4} + 1,5 \cdot d \quad (4.33)$$

4.8 Exemplo de cálculo da vazão através de um orifício de determinado silo

Como exemplo de aplicação do método apresentado, admi

tindo-se os seguintes valores para Areia grossa seca:

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$\lambda = 0,55 \text{ (areia grossa sêca)}$$

$$\gamma = 1,35 \text{ ton/m}^3$$

$$D = 2 \text{ cm (conforme capítulo 3.5)}$$

$$d = 0,3 \div 0,03 \text{ cm (heterogênea)}$$

$$\phi = 30^\circ$$

$$f = \text{tg}\phi = 0,577$$

$$A' = \pi/4 (D - 1,5d)^2 = 1,89 \text{ cm}^2$$

$$v = 1/f + 2f - \sqrt{1 + f^2} = 1,73$$

e sendo a vazão (W) dada pela equação 4.25,

$$W = 0,85 \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot \sqrt{g \cdot v} \cdot (D - 1,5d)^{2,5} \quad [\text{Kg/min}]$$

$$W = 7,78 \cdot [\text{Kg/min}]$$

este valor servirá para determinar-se o valor aproximado da vazão do material analisado através de uma bôca de descarga.

Baseando-se na Figura 4.5, para areia grossa sêca, com granulometria 0,3cm e para a bôca de descarga com diâmetro de 2 cm (área de $3,14\text{cm}^2$) a vazão é de 6,60 Kg/min. Logo o coeficiente (λ_e) de descarga desse material é;

$$\lambda_e = \frac{6,60}{0,85 \cdot 1,35 \cdot \sqrt{9,8 \cdot 1,73} (2 - 1,5 \cdot 0,3)^{2,5}} = \frac{6,6}{14,13} = 0,47,$$

que utiliza-se para o cálculo da área da bôca de descarga de silos, em função da vazão desejada (equação 4.33).

$$D = \left(\frac{W}{0,85 \cdot 0,47 \cdot 1,35 \cdot \sqrt{9,8 \cdot 1,73}} \right)^{0,4} + 1,5 \cdot 0,3 = \left(\frac{W}{2,2} \right)^{0,4} + 0,45$$

Como exemplo, para encher um caminhão de 15 toneladas de areia seca em 5 minutos, a boca de descarga deverá ter um diâmetro

$$D = \left(\frac{3000}{2,2} \right)^{0,4} + 0,45 = 18,4 \text{ cm}$$

Pela equação 3.14 o diâmetro mínimo deve ser:

$$D \geq \frac{2000 \cdot \tau_o}{k \cdot \gamma \cdot g} (1 + \operatorname{sen} \phi) = \frac{2000 \cdot 3,66 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + \operatorname{sen} 30^\circ)}{0,5 \cdot 1,35 \cdot 9,8} = 1,66 \text{ cm}$$

onde " τ_o " (tensão inicial de cisalhamento) é obtida na Tabela III.1.

A altura equivalente " h_e " de queda do material é dada pela equação 4.27, resultando

$$\begin{aligned} h_e &= 0,25 \cdot \lambda_e^2 \cdot v \cdot (D - 1,5d) = \\ &= 0,25 \cdot (0,47)^2 \cdot 1,73 \cdot (2 - 1,5 \cdot 0,3) = 0,15 \text{ cm}, \end{aligned}$$

que é desprezível, conforme o capítulo 4.4.

NOTAS

a) Este exemplo numérico é referido ao dispositivo experimental utilizado neste trabalho. Os valores calculados serão

utilizados para o dimensionamento dos componentes deste dispositivo.

b) O silo deve ter uma capacidade volumétrica superior à do material coletado, correspondente a um dado tempo de escoamento.

c) A altura do material no silo deve ser superior à altura inicial " h_0 ", para que não ocorram variações na vazão.

d) As dimensões adotadas para a construção do dispositivo, são:

- Altura do silo : $h = 20$ cm
- Diâmetro do silo : $D_s = 7,0$ cm
- Diâmetro da boca de descarga: $D = 2,0$ cm
- Capacidade do dispositivo: $V = 12$ dm³, ou seja, 16 Kg de areia seca.

e) O sistema deve operar durante aproximadamente 2 minutos, com fluxo constante. O primeiro minuto é ocupado para coletar o material, e o minuto seguinte para pesar e retornar o material ao silo alimentador. O outro recipiente coleta o material para a próxima pesagem.

4.8.1 Determinação aproximada da vazão para vários materiais.

Utilizando-se a tabela do Anexo A e a equação 4.25,

$$W = 0,85 \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot \sqrt{g \cdot v} \cdot (D - 1,5d)^{2,5}, \quad \left[\text{Kg/min} \right]$$

onde

$$v = 1/f + 2f - \sqrt{1 + f^2},$$

$$f = \operatorname{tg} \phi ,$$

resultam os valores calculados da vazão (W) mostrados na Tabela IV.1.

Tabela IV.1 - Valores dos parâmetros a serem considerados no cálculo da vazão (W).

Material	λ	γ ton/m ³	v	d cm	D cm	g m/s ²	ϕ	Γ	W Kg/min
Areia Grossa	0,55	1,35	1,73	0,30	2,0	9,8	30°	0,58	7,78
Areia Branca	0,33	1,52	1,65	0,02	2,0	9,8	33°	0,65	9,35
Alumina	0,20	0,90	2,20	0,03	2,0	9,8	22°	0,40	3,80
Arroz	0,60	0,75	2,41	0,40	2,0	9,8	20°	0,36	4,31

4.8.2 Análise da variação da vazão de dois materiais em função do diâmetro da boca de descarga.

Analisando-se areia grossa seca ($d \leq 0,3$ cm) e areia branca ($d = 0,02$ cm), com suas características apresentadas no capítulo 4.8.1, a tabela IV.2 e a Figura 4.18, mostram as porcentagens relativas da variação da vazão, onde utilizou-se a equação 4.25 para os devidos cálculos, ou seja,

$$W = 0,85 \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot \sqrt{g \cdot v} \cdot (D - 1,5d)^{2,5} \quad [\text{Kg/min}].$$

Tabela IV.2 - Variação da vazão em função da granulometria e diâmetro da boca de descarga.

D cm	W' d = 0,3cm [Kg/min]	W d = 0,02cm [Kg/min]	$\frac{W-W'}{W} \%$
1,4	2,29	3,76	-64
1,8	5,51	7,14	-30
2,0	7,78	9,33	-20
2,77	21,32	21,28	0
3,0	27,00	26,03	4
5,0	115,00	94,31	18
10	733,00	537,51	27
20	$4,39 \cdot 10^3$	$3,05 \cdot 10^3$	31
50	$4,49 \cdot 10^4$	$3,02 \cdot 10^4$	33
100	$2,57 \cdot 10^5$	$1,71 \cdot 10^5$	33
≥ 150	$7,11 \cdot 10^5$	$4,72 \cdot 10^5$	34

A vazão iguala-se quando o diâmetro da boca de descarga do silo atinge o valor de 2,7 cm. Mostrando que a vazão de areia grossa é menor até $D = 2,7$ cm e após este valor é maior.

A Figura 4.18 serve para escolha do diâmetro da boca de descarga de um silo que contenha o material analisado nesse equipamento proposto e construído.

A Tabela IV.3 apresenta dois materiais analisados e com a vazão calculada para uma boca de descarga de 2 cm de diâmetro.

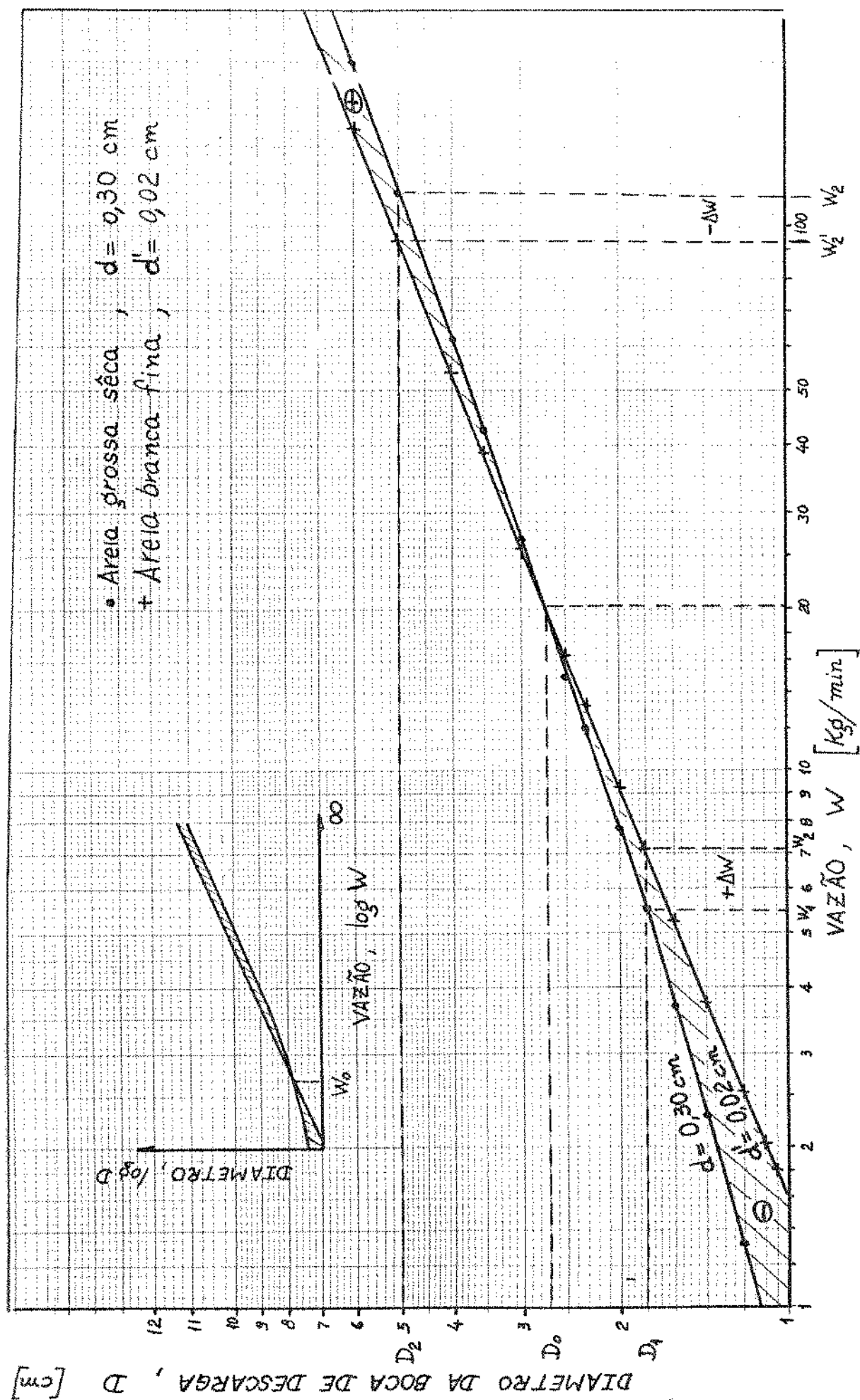


Fig. 4.18 - Valores da vazão em função da variação da abertura "D".

Tabela IV.3 - Vazão da areia seca para uma boca de descarga de 2 cm e granulometria variável.

Grandeza		Material	
		Areia Grossa	Areia Fina
d	cm	0,30	0,02
γ	ton/m ³	1,35	1,52
λ	-	0,33	0,55
ϕ	graus	33°	30
W	Kg/min	9,33	7,78

5. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Foi projetado um equipamento especialmente concebido para a determinação da vazão (W) na boca de descarga e em dutos inclinados, acoplados à boca de descarga do silo, como mostrado na Figura (5.1).

5.1 Objetivos

O dispositivo foi construído para analisar o fluxo de grãos com granulometria inferior a 4 mm, secos, boa fluidez, não muito abrasivos, não cortantes, e ângulos de repouso (ϕ) entre 10° e 45° .

O dispositivo permite determinar a vazão e o ângulo de inclinação crítico para os materiais, dentro das limitações propostas.

Sendo dimensionado para laboratórios, o dispositivo é de tamanho reduzido. A altura (h) do silo deve ser maior que a medida " h_0 ". Como determinado no capítulo 4.8, o volume do silo foi adotado como $V = 13 \text{ dm}^3$ (ou seja, 13 kg de areia seca), para um diâmetro da boca de descarga de 2,0 cm.

5.2. Equipamento construído

O desenho esquemático do dispositivo construído é apresentado na Figura 5.1, o desenho de detalhes na Figura 5.2, e as fotos complementares nas Figuras 5.3 a 5.5.

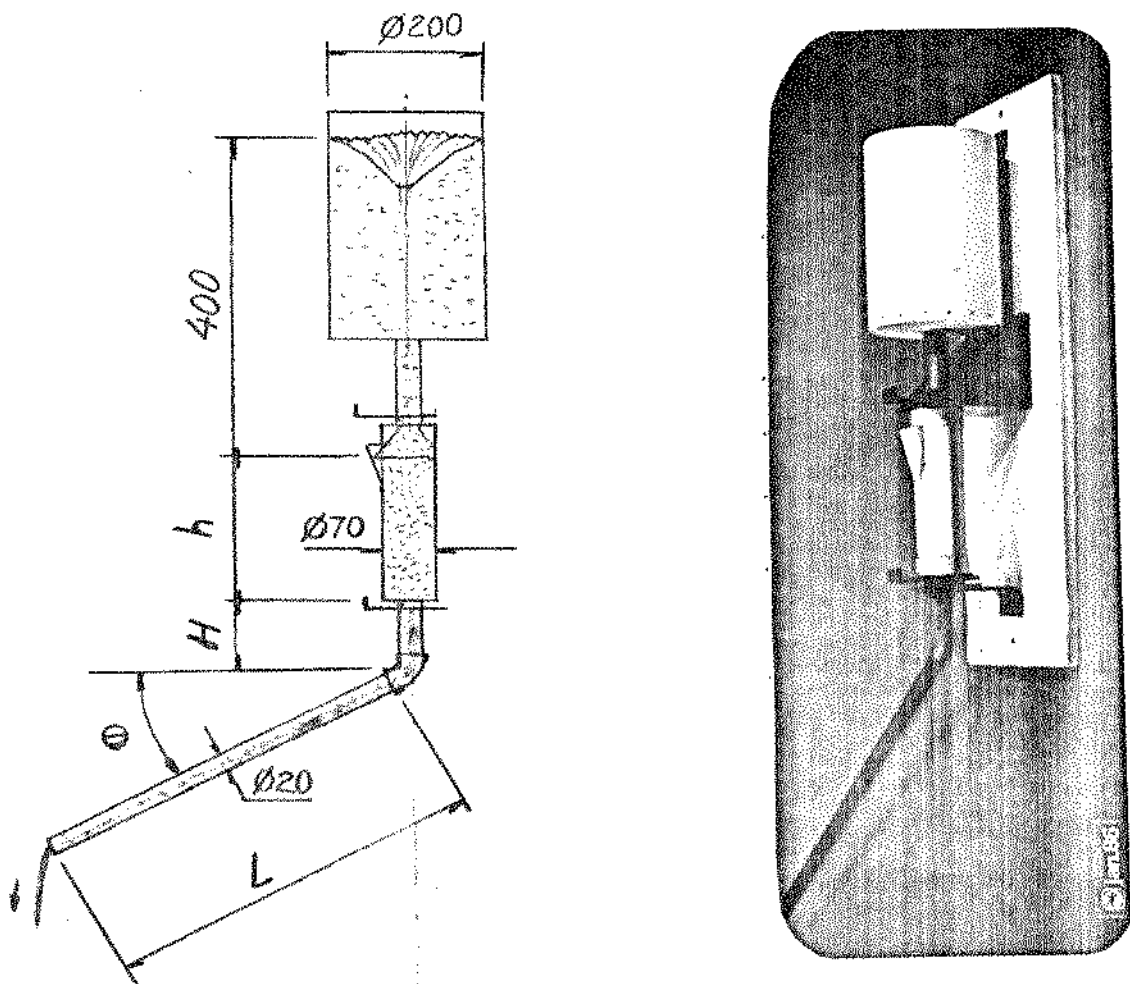


Fig. 5.1 - Desenho esquemático e fotografia do dispositivo utilizado nos ensaios experimentais.

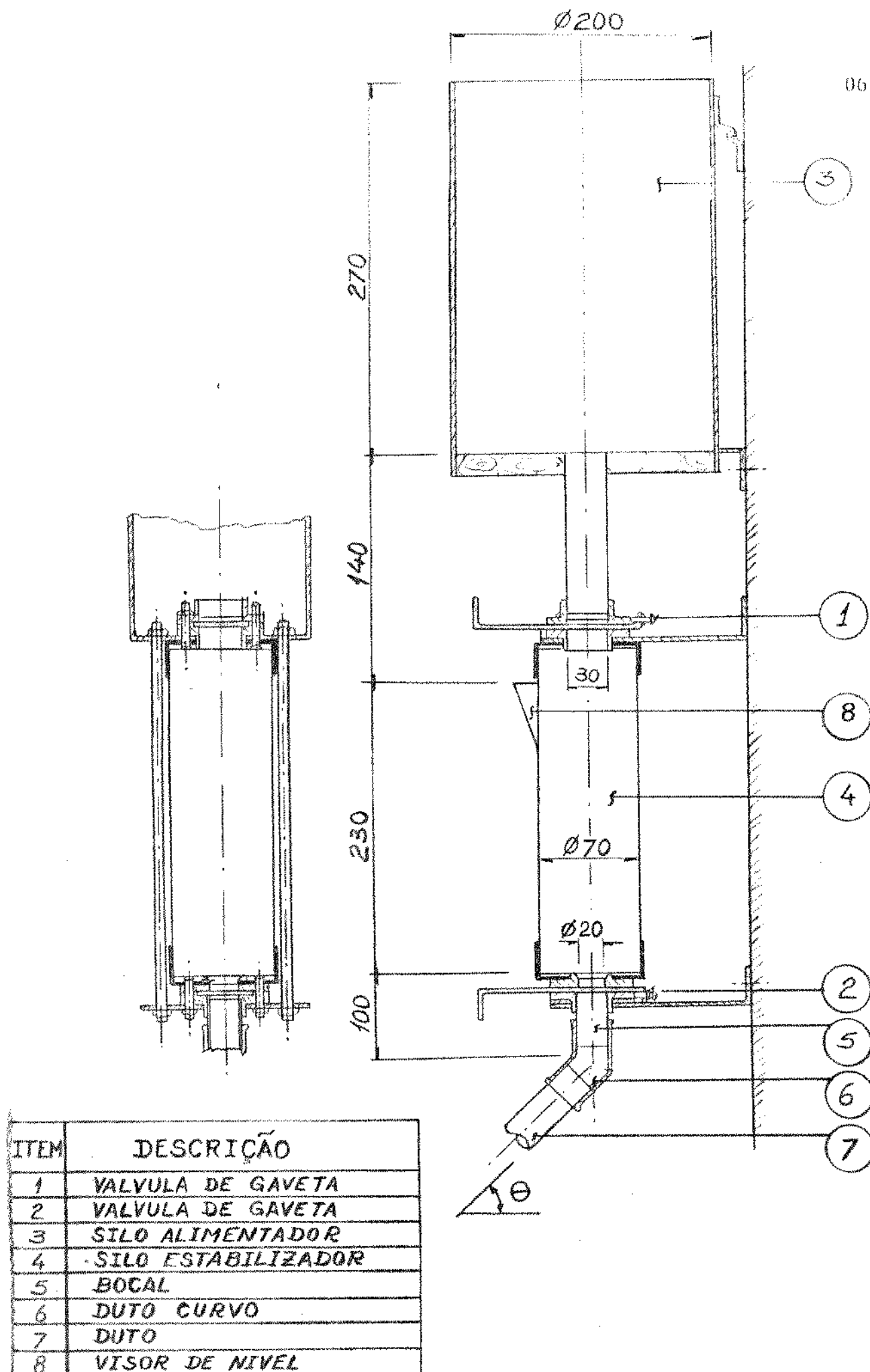


Figura 5.2 - Desenho detalhado do dispositivo utilizado nos ensaios experimentais.

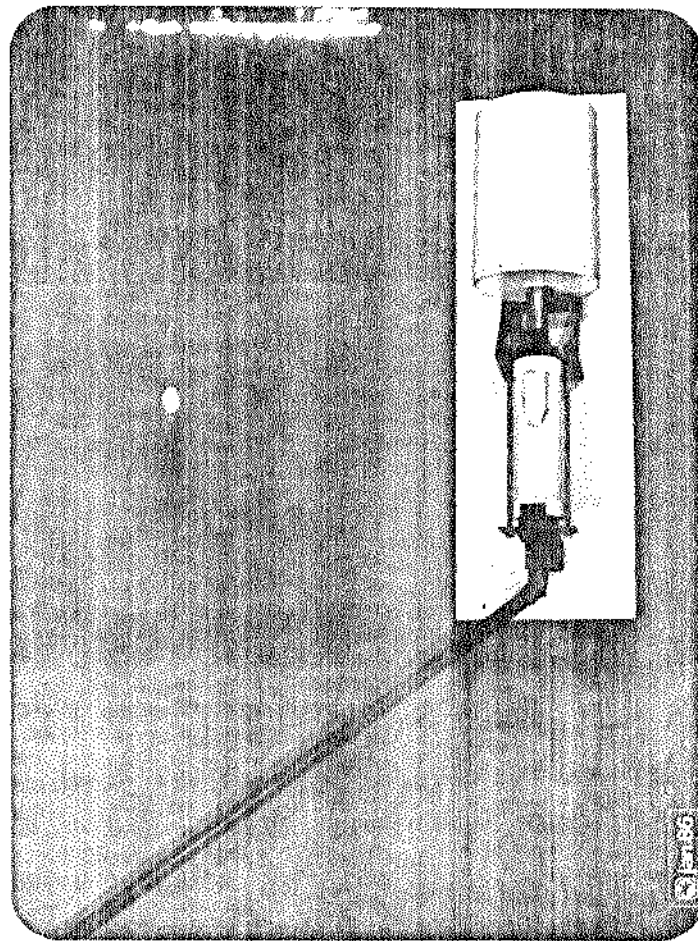


Fig. 5.3 - Vista frontal do equipamento.

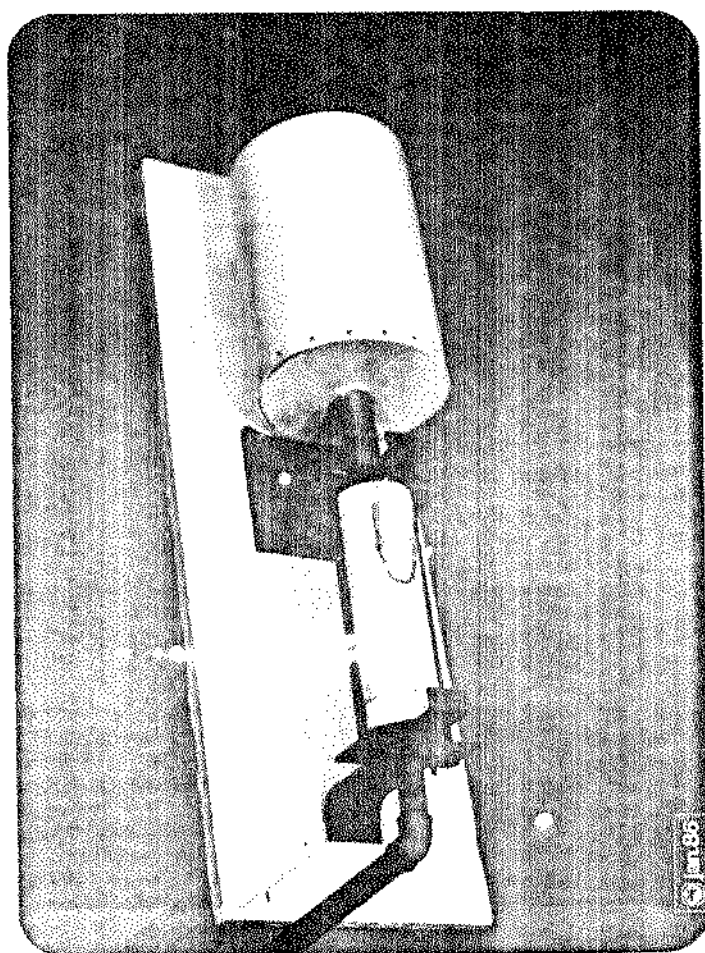


Fig. 5.4 - Vista inferior do equipamento.

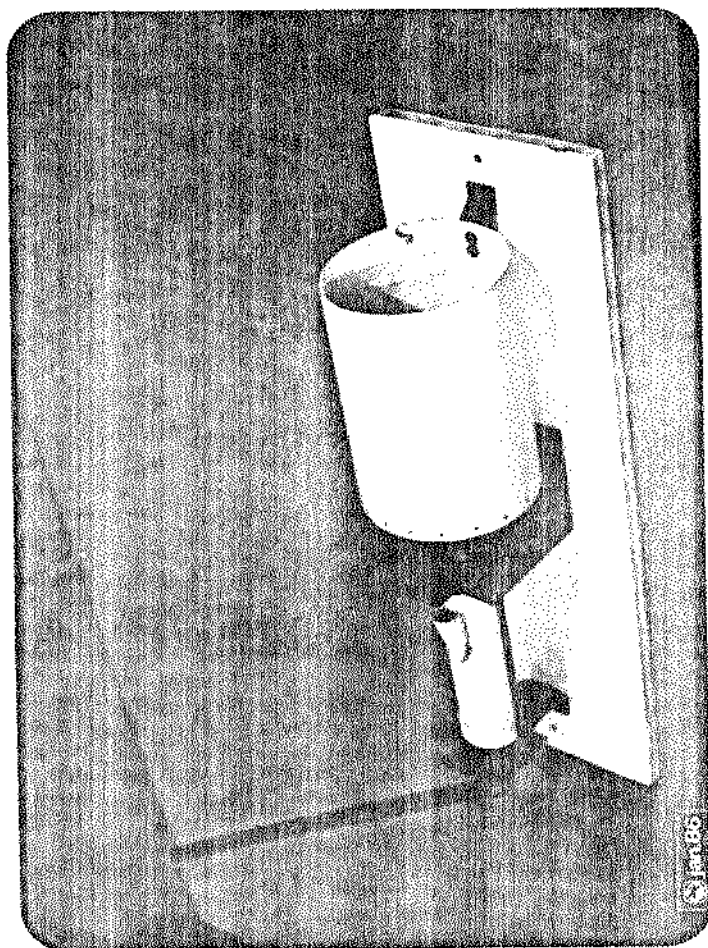


Fig. 5.5 . Vista superior do equipamento.

O dispositivo é composto das seguintes partes principais;

1) Válvula de gaveta superior - interrompe o fluxo de material entre o silo alimentador e o silo estabilizador.

2) Válvula de gaveta inferior - controla e interrompe o fluxo entre o silo estabilizador e o duto de transporte.

3) Silo alimentador - alimenta o silo estabilizador durante um determinado tempo.

4) Silo estabilizador - mantém constante a pressão na boca de descarga, pela manutenção da altura constante de material nele contido.

5) Bocal - (duto de saída) - tubo acoplado na Válvula (2) com diâmetro interno de 20mm.

6) Duto curvo - tubo de 20mm de diâmetro interno, com uma curva de ângulo $\theta \leq 90^\circ$.

7) Duto reto - tubo de comprimento "L" variável e diâmetro interno de 20mm.

8) Visor de nível - abertura lateral no silo estabilizador, utilizada para verificação da manutenção da altura constante do material.

Os equipamentos complementares ao dispositivo, são:

- Um cronômetro para medir o tempo de duração do escoamento (vazão).

- Dois coletores de materiais (recipientes), para coletar o material que flui através da boca de descarga ou do duto.

- Uma balança para pesar o coletor e o material nele contido.

- Nível de bolha para medir o ângulo " θ " de inclinação do duto (7) em relação à horizontal.

6. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

6.1 Medição da vazão

O sistema requer uma sequência ordenada de operações, para que a vazão seja medida nas condições normais de regime. O procedimento das operações, são:

- Encher o silo (3) com o material a ser analisado.
- Abrir a válvula (1) até que o silo (4) esteja completamente carregado, verificando o nível pelo visor (8).
- Abrir a válvula (2), esperando um determinado tempo para que o fluxo esteja normalizado.
- Acionar o cronômetro juntamente com o início da coleta de material no segundo recipiente.
- O material coletado no primeiro recipiente é descarregado no silo (3).
- Após um minuto, retira-se o segundo recipiente, pesa-se e retorna-se o material ao silo (3), enquanto o primeiro recipiente coleta o material para a próxima medida, e assim por diante.

Para cada medida efetuada anota-se nas tabelas os valores obtidos. As médias calculadas são registradas nos gráficos do capítulo 7.

6.2 Montagem do equipamento

O equipamento pode ser montado com diferentes sistemas de descarga, ou sejam, descarga direta, descarga por meio de du

tos verticais e inclinados, e descarga com dutos inclinados de comprimento variável, a seguir descritas.

6.2.1 Descarga direta

O material passa diretamente pela boca de descarga, como mostrado na Figura 6.1.

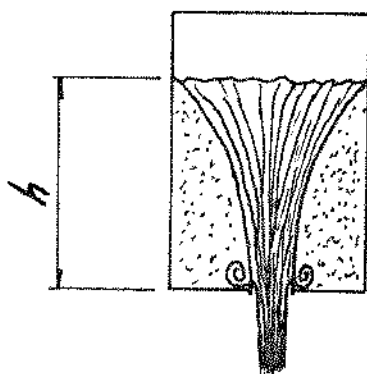


Fig. 6.1 - Silo estabilizado com descarga direta.

6.2.2 - Descarga por meio de dutos verticais

Acopla-se um duto vertical (bocal) de comprimento (L), como mostrado na Figura 6.2.

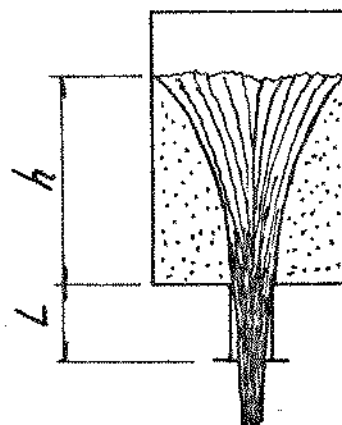


Fig. 6.2 - Silo estabilizado, com descarga por meio de dutos verticais.

6.2.3 Descarga por meio de tubos inclinados

Acopla-se um duto curvo após o bocal (onde o ângulo " θ " é variável), e um duto reto de comprimento constante (Figura 6.3).

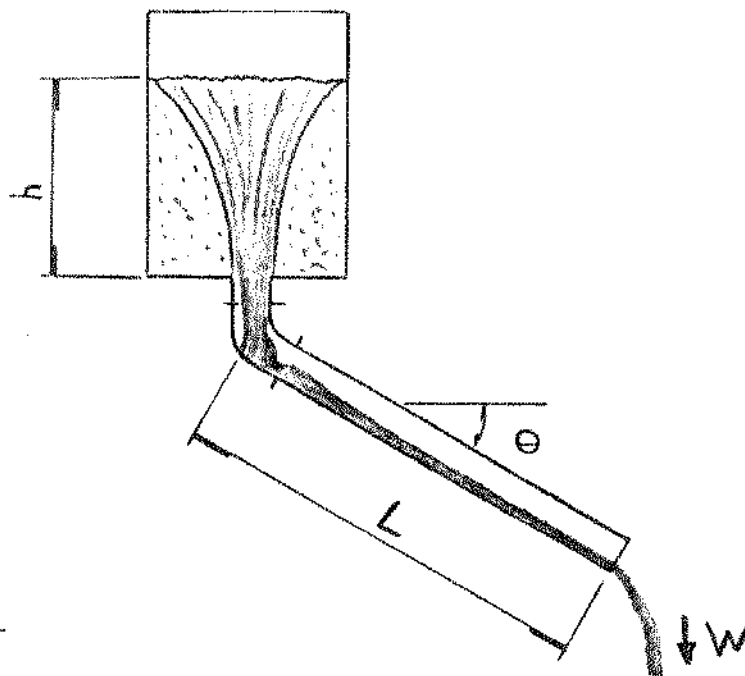


Fig. 6.3 - Silo estabilizado, com descarga por meio de dutos inclinados.

6.2.4 Descarga com dutos inclinados de comprimento variável

Montagem semelhante ao item 6.2.3, onde a inclinação (θ) do duto é constante, e o comprimento (L) é variável (Figura 6.3).

6.3 Materiais escolhidos

Para a verificação experimental da variação da vazão,

nas diferentes condições adotadas, foram utilizados os seguintes materiais:

1) AREIA GROSSA SECA

- Densidade = $1,35 \text{ ton/m}^3$
- Ângulo de repouso = 30°
- Código CEMA = B37
- Granulometria = $0,01 < d < 0,30 \text{ cm}$
- Mistura heterogênea.

2) AREIA BRANCA PARA FUNDIÇÃO

- Densidade = $1,52 \text{ ton/m}^3$
- Ângulo de repouso = 33°
- Código CEMA = B37
- Granulometria = $0,020 < d < 0,025 \text{ cm}$
- Mistura homogênea.

Esses materiais foram escolhidos devido à sua facilidade de obtenção, boa fluidez, baixa granulometria e densidade suficiente para que a massa coletada em um minuto não ultrapasse 10Kg.

Conforme equação 4.25, a vazão teórica é:

- Areia grossa seca $W = 7,78 \text{ Kg/min}$
- Areia branca de fundição $W = 9,33 \text{ Kg/min}$

6.4 Resultados experimentais obtidos

6.4.1 Apresentação das tabelas

A tabela apresentada é utilizada para a determinação experimental do coeficiente de descarga " λ " e da vazão média do material analisado.

O esboço do aparelho com ângulo (θ) de inclinação do duto e o raio (ρ) de curvatura estão no lado superior direito da tabela. As características do material e do aparelho são apresentados no lado superior esquerdo da tabela, onde inicialmente especifica-se o nome do material a ser utilizado.

- O código CEMA [16] qualifica o material quanto à espécie (Anexo A).

- A Granulometria (d) do material é a variação das dimensões dos grãos.

- A Densidade (γ) é o peso (em toneladas) do material por metro cúbico.

- O Ângulo de Repouso (ϕ) do material é obtido com o equipamento da Figura 2.1.c.

- A Tensão de Cisalhamento (τ_o) é medida com os equipamentos das Figuras 2.2 e 3.4, ou para certos materiais com a Tabela III.1.

- O Coeficiente de Atrito Estático ($f = \tan \phi$) é a tangente do ângulo de repouso do material.

- A Constante Característica do Material (v) é obtida pela Equação 4.20.

- A Área do Bocal de Descarga (A) é calculada conforme a vazão desejada.

- O Raio Hidráulico (R) do Bocal obtido é conforme a Equação 3.18.

- O Diâmetro Nominal do Tubo (D_t) é o diâmetro interno do tubo onde passa o material.

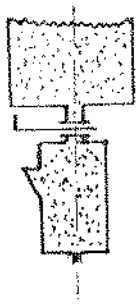
- As medidas experimentais são feitas conforme capítulo 6.1, onde anota-se o número do experimento (N°), seguido do tempo (t) de duração da vazão, do ângulo de inclinação (θ) do duto, da massa (m) de material colhida durante este certo tempo (t). A vazão (W) é a divisão da massa (m) em kilogramas pelo tempo (t) em minutos. Após um certo número de leituras calcula-se a vazão média. O coeficiente de Descarga (λ) é calculado pela equação 4.26.

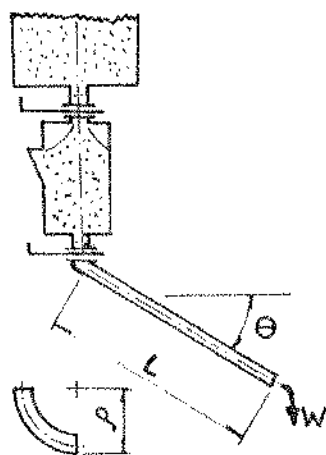
Como o material apresenta variações com a umidade relativa do ar, temperatura ambiente, e outros fatores, o lado direito da tabela é reservado a observações desta natureza.

Abaixo tem-se o espaço reservado aos comentários que possam surgir durante o ensaio, em relação ao equipamento ou ao comportamento anormal do fluxo.

No rodapé tem-se o espaço para preenchimento do nome do executor e aprovador do ensaio, juntamente com a data, o número do ensaio e da folha.

6.4.2 Tabelas dos ensaios

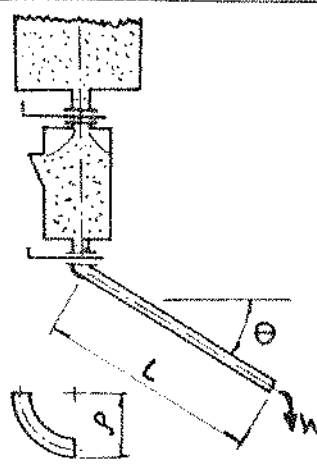
Material: <u>Areia Grossa Seca</u>							
Código CIMA: <u>B37</u>							
Granulometria		$d = 0 \div 0,5$ cm					
Densidade		$\gamma = 1,55$ ton/m ³					
Ângulo de Repouso		$\phi = 30^\circ$ Graus					
Tensão Cisalhamento Inicial		$\tau_0 = 3,66 \cdot 10^{-5}$ kg/cm ²					
Coef. Atrito Estático		$\mu = 0,577$					
Constante Caract. Material		$v = 1,73$					
Área Boca! de Descarga		$A = 3,14$ cm ²					
Raio Hidráulico do Boca!		$R = 0,50$ cm					
Diâmetro Nominal do Tubo		$D_t = -$ mm					
MEDIDAS EXPERIMENTAIS							
Nº	Tempo t s	Âng. Incli. θ	Massa m kg	Vazão W Kg/min		Coef. λ	Observações
				Valor	Média		
01	60	90°	7,64	7,64	7,68 $\pm 0,08$	0,540	
02			7,68	7,68			
03			7,74	7,74			
04			7,77	7,77			
05			7,76	7,76			
06			7,58	7,58			
07			7,62	7,62			
Comentários: <u>fluxo livre, sem boca! de saída (tubo reto)</u>							
Medida do Fluxo de Granéis Sólidos			Exec. <u>Osmar</u>		Aprov. _____		Ensaio nº <u>1.01</u>
			Data <u>24/09/85</u>		Data <u>30/09/85</u>		Folha <u>1</u> / <u>5</u>

Material: <u>Areia Grossa Sêca</u>											
Código CEMA: <u>B37</u>											
Granulometria	$d = 0 \div 0,3$	cm									
Densidade	$\gamma = 1,35$	ton/m ³									
Ângulo de Repouso	$\phi = 30^\circ$	Gráus									
Tensão Cizalhamento Inicial	$\tau_0 = 3,66 \cdot 10^{-3}$	kg/cm ²									
Coef. Atrito Estático	$f = 0,577$										
Constante Caract. Material $\sigma = 1,73$											
Área Bocal de Descarga	$A = 3,14$	cm ²	<table><tr><td>θ</td><td>70°</td><td>60°</td><td>50°</td></tr><tr><td>R mm</td><td>22</td><td>22</td><td>22</td></tr></table>	θ	70°	60°	50°	R mm	22	22	22
θ	70°	60°		50°							
R mm	22	22		22							
Raio Hidráulico do Bocal	$R = 0,5$	cm									
Diâmetro Nominal do Tubo	$D = 20$	mm									

MEDIDAS EXPERIMENTAIS							
Nº	Tempo t s	Âng. Incli. θ	Massa m kg	Vazão W		Coef. λ	Observações
				Kg/min			
				Valor	Média		
01	60	70º	8,64	8,64	8,69 ±0,05	0,615	
02			8,66	8,66			
03			8,76	8,76			
04			8,73	8,73			
05			8,68	8,68			
01	60	60º	8,50	8,50	8,52 ±0,04	0,603	
02			8,55	8,55			
01	60	50º	8,51	8,51	8,64 ±0,13	0,611	
02			8,64	8,64			
03			8,76	8,76			

Comentários: fluxo em dutos inclinados (50° à 70°), com comprimento $L = 1000$ mm.

Medida do Fluxo de Granéis Sólidos	Exec. <u>Osmar</u>	Aprov. _____	Ensaio nº <u>1.03</u>
	Data <u>07/10/85</u>	Data ____/____/____	Folha <u>3/5</u>

Material: <u>Areia Grossa Sêca</u>			
Código CEMA: <u>B37</u>			
Granulometria	$d = 0 \div 0,3$	cm	
Densidade	$\gamma = 1,35$	ton/m ³	
Ângulo de Repouso	$\phi = 30^\circ$	Graus	
Tensão Cisalhamento Inicial	$\tau_0 = 3,66 \cdot 10^{-3}$	kg/cm ²	
Coef. Atrito Estático	$\mu = 0,577$		
Constante Caract. Material $\alpha = 1,73$			
Área Boca! de Descarga	$A = 3,74$	cm ²	
Raio Hidráulico do Boca!	$R = 0,50$	cm	
Diâmetro Nominal do Tubo	$D_t = 20$	mm	

θ	35°	30°
ρ mm	22	22

MEDIDAS EXPERIMENTAIS							
Nº	Tempo t s	Âng. Incli. e	Massa m kg	Vazão W		Coef. λ	Observações
				Kg/min			
				Valor	Média		
01	60	35°	8,58	8,58	8,56 ±0,04	0,606	
02			8,60	8,60			
03			8,58	8,58			
04			8,51	8,51			
05			8,55	8,55			
01	60	30°	8,94	8,94	8,92 ±0,02	0,631	
02			8,90	8,90			
03			8,92	8,92			
04			8,93	8,93			

Comentários: fluxo em dutos inclinados (30° a 35°) com comprimento $L = 1000$ mm.			
Medida do Fluxo de Granéis Sólidos	Exec. <u>Osmar</u>	Aprov. _____	Ensaio nº 1.04
	Data <u>08/10/85</u>	Data ____/____/____	Folha <u>4</u> / <u>5</u>

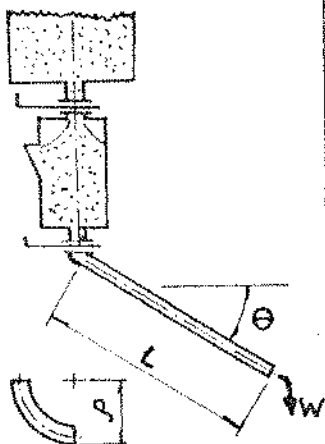
Material: Areia Grossa Seca										
Código CBMA: B37										
Granulometria		$d = 0 \div 0,3$		cm						
Densidade		$\gamma = 1,35$		ton/m ³						
Ângulo de Repouso		$\phi = 30^\circ$		Graus						
Tensão Cisalhamento Inicial		$\tau_0 = 3,66 \cdot 10^{-3}$		kg/cm ²						
Coef. Atrito Estático		$\mu = 0,577$								
Constante Caract. Material $v = 1,73$										
Área Boca de Descarga		$A = 3,14$		cm ²						
Raio Hidráulico do Boca		$R = 0,50$		cm						
Diâmetro Nominal do Tubo		$D_t = 20$		mm						
						θ	28,5°	28°	27,5°	
						ρ mm	22	22	22	
MEDIDAS EXPERIMENTAIS										
Nº	Tempo t s	Âng. Incli. θ	Massa m kg	Vazão W Kg/min		Coef. λ	Observações			
				Valor	Média					
01	60	28,5°	8,42	8,42	8,34 $\pm 0,06$	0,590				
02			8,30	8,30						
03			8,37	8,37						
04			8,28	8,28						
05			8,31	8,31						
01	60	28°	8,50	8,50	8,34 $\pm 0,11$	0,590				
02			8,42	8,42						
03			8,42	8,42						
04			8,19	8,19						
05			8,16	8,16						
06			8,25	8,25						
07			8,30	8,30						
08			8,35	8,35						
09			8,41	8,41						
10			8,36	8,36						
01	60	27,5°	0	0	0	0	Fluxo Interrompido			
02			0	0						
Comentários: fluxo em dutos inclinados (28,5° à 27,5°) com comprimento L = 1000 mm.										
Medida do Fluxo de Granéis Sólidos			Exec. Osmar		Aprov. _____		Ensaio nº 1.05			
			Data 24/09/85		Data ____/____/____		Folha 5 / 5			

Tabela VI.1 - Valores da vazão e do coeficiente " λ " em função do ângulo " θ " de inclinação do duto.

Material = areia grossa seca ($d = 0,3\text{cm}$)

Ângulo θ	Vazão W [Kg/min]	Coeficiente λ	Observações
90°	7,68 $\pm$ 0,08	0,540	Descarga livre na atm.
90°	9,36 $\pm$ 0,13	0,660	
70°	8,69 $\pm$ 0,05	0,615	
60°	8,52 $\pm$ 0,04	0,603	
50°	8,64 $\pm$ 0,13	0,611	
35°	8,56 $\pm$ 0,04	0,606	
30°	8,92 $\pm$ 0,02	0,631	
28,5°	8,34 $\pm$ 0,06	0,590	
28°	8,34 $\pm$ 0,11	0,590	
27,5°	0	0	Interrupção do fluxo

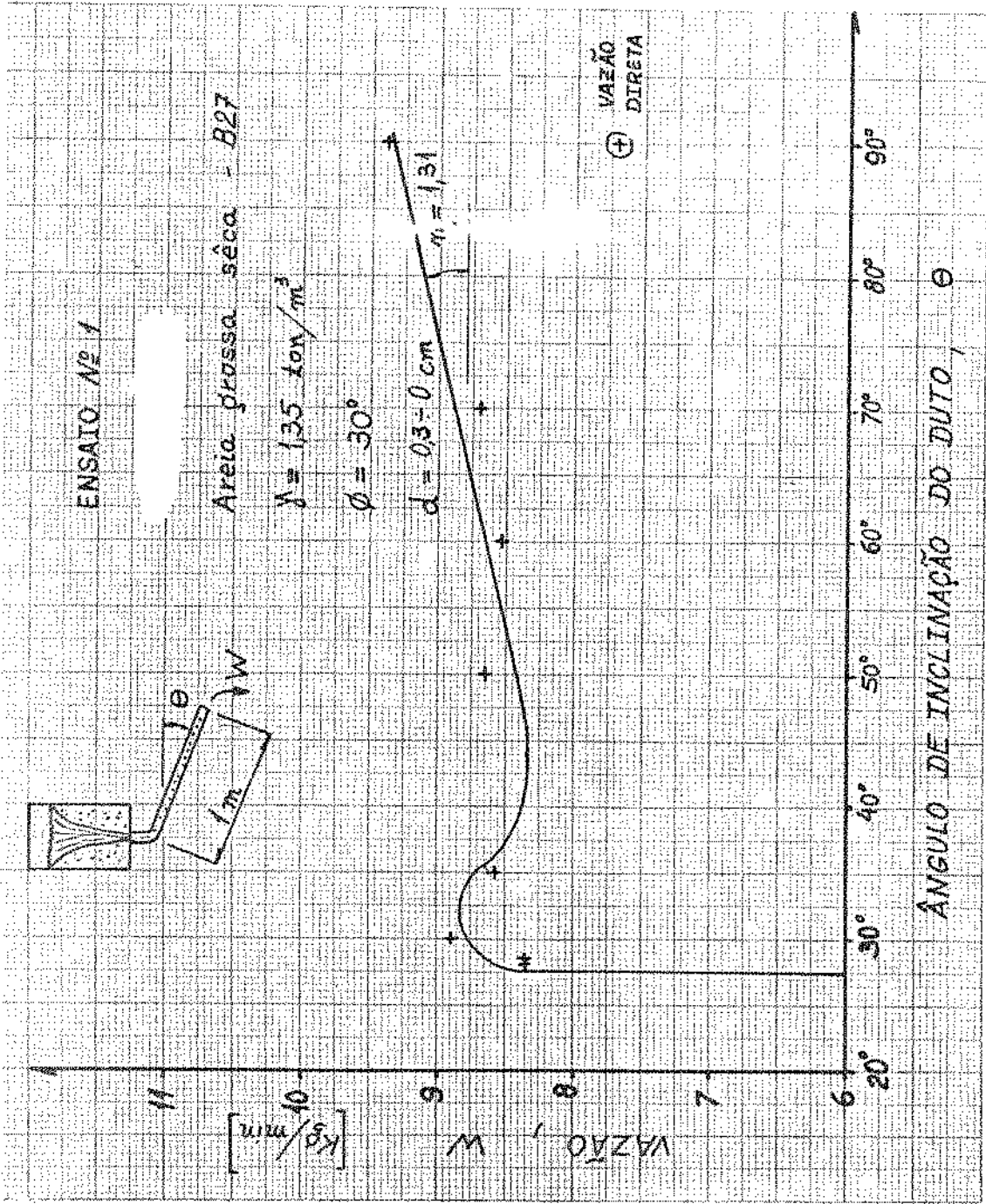
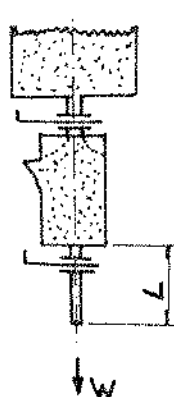
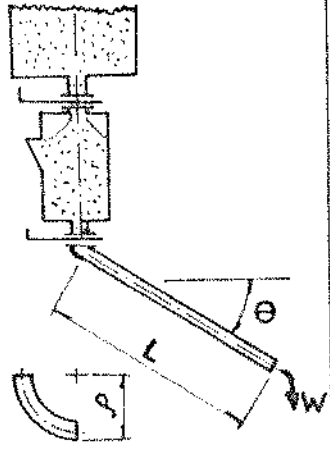


Fig. 6.1 - Variação da vazão (W) em função do ângulo (θ) de inclinação do duto, conforme Tabela VI.1.

Material: <u>Areia Branca de Fundição</u>							
Código CIMA: <u>B37</u>							
Granulometria		$d = 0,02$		cm			
Densidade		$\gamma = 1,52$		ton/m ³			
Ângulo de Repouso		$\phi = 33^\circ$		Graus			
Tensão Cisalhamento Inicial		$\tau_0 = 9,0 \cdot 10^{-3}$		kg/cm ²			
Coef. Atrito Estático		$\mu = 0,65$					
Constante Caract. Material		$\psi = 1,65$					
Área Bocal de Descarga		$A = 3,14$		cm ²			
Raio Hidráulico do Bocal		$R = 0,50$		cm			
Diâmetro Nominal do Tubo		$D_t = 20$		mm			
MEDIAS EXPERIMENTAIS							
Nº	Tempo t s	Âng. Incli. θ	Massa m kg	Vazão W Kg/min		Coef. λ	Observações
				Valor	Média		
01	60	90°	9,66	9,66	9,68	0,729	
02			9,72	9,72	±0,04		
Comentários: saída do fluxo por meio de bocal (tubo reto com 100 mm de comprimento.							
Medida do Fluxo de Granéis Sólidos			Exec. <u>Osmar</u> Data <u>11/10/85</u>		Aprov. _____ Data ____/____/____		Ensaio nº 2.02 Folha <u>2</u> / <u>4</u>

Material: <u>Areia Branca de Fundição</u>									
Código CEMA: <u>B37</u>									
Granulometria		$d = 0,02$		cm					
Densidade		$\rho = 1,52$		ton/m ³					
Ângulo de Repouso		$\phi = 33^\circ$		Graus					
Tensão Cisalhamento Inicial		$\tau_0 = 9,0 \cdot 10^{-3}$		Kg/cm ²					
Coef. Atrito Estático		$f = 0,65$							
Constante Caract. Material		$v = 1,65$		m					
Área Bocal de Descarga		$A = 3,14$		cm ²					
Raio Hidráulico do Bocal		$R = 0,50$		cm					
Diâmetro Nominal do Tubo		$D_t = 20$		mm					
						θ	70°	50°	40°
						ρ mm	22	22	22

MEDIDAS EXPERIMENTAIS								
Nº	Tempo t s	Âng. Incli. θ	Massa m kg	Vazão W Kg/min		Coef. λ	Observações	
				Valor	Média			
01	60	70°	9,64	9,64	9,58 $\pm 0,05$	0,722		
02			9,56	9,56				
03			9,55	9,55				
01	60	50°	9,35	9,35	9,31 $\pm 0,04$	0,702		
02			9,28	9,28				
03			9,30	9,30				
01	60	45°	9,40	9,40	9,30 $\pm 0,17$	0,701		
02			9,40	9,40				
03			9,10	9,10				
01	60	40°	9,35	9,35	9,35 $\pm 0,01$	0,705		
02			9,36	9,36				
03			9,35	9,35				

Comentários: fluxo em dutos inclinados (70° à 40°) com o comprimento $L = 1000$ mm.

Medida do Fluxo de Granéis Sólidos	Exec. <u>Osmar</u>	Aprov. _____	Ensaio nº 2.03
	Data <u>11/10/85</u>	Data ____/____/____	Folha <u>3</u> / <u>4</u>

Material: <u>Areia Branca de Fundição</u>							
Código CEMA: <u>B37</u>							
Granulometria	$d = 0,02$	cm					
Densidade	$\gamma = 1,52$	ton/m ³					
Ângulo de Repouso	$\phi = 33^\circ$	Graus					
Tensão Cisalhamento Inicial	$\tau_0 = 9,0 \cdot 10^{-3}$	kg/cm ²					
Coef. Atrito Estático	$f = 0,65$						
Constante Caract. Material	$v = 1,65$	m					
Área Bocal de Descarga $A = 3,14$			cm ²				
Raio Hidráulico do Bocal $R = 0,50$			cm				
Diâmetro Nominal do Tubo $D_t = 20$			mm				
			θ	<u>35°</u>	<u>32,5°</u>	<u>30°</u>	
			ρ mm	<u>22</u>	<u>22</u>	<u>22</u>	
MEDIDAS EXPERIMENTAIS							
Nº	Tempo t s	Âng. Incli. θ	Massa m kg	Vazão W Kg/min		Coef. λ	Observações
				Valor	Média		
01	60	35°	9,56	9,56	9,55 $\pm 0,03$	0,720	
02			9,52	9,52			
03			9,58	9,58			
01	60	32,5°	9,40	9,40	9,36 $\pm 0,06$	0,705	
02			9,39	9,39			
03			9,30	9,30			
01	60	30°	9,47	9,47	9,42 $\pm 0,04$	0,710	
02			9,40	9,40			
03			9,40	9,40			
01	60	28°	0	0			
02	60	27°	0	0			
Comentários: fluxo em dutos inclinados (35° à 27°) com comprimento $L = 1000$ mm.							
Medida do Fluxo de Granéis Sólidos			Exec. <u>Osmar</u>		Aprov. _____		Ensaio nº 2.04
			Data <u>11/10/85</u>		Data ____/____/____		Folha <u>4</u> / <u>4</u>

Tabela VI.2 - Valores da vazão e do coeficiente " λ ", em função do ângulo " θ " de inclinação do duto.

Material = areia branca fina ($d = 0,02\text{cm}$)

Ângulo	Vazão W Kg/min	Coeficiente λ	Observações
90°	9,21 $\pm$ 0,02	0,694	Descarga livre na atm.
90°	9,68 $\pm$ 0,04	0,729	
70°	9,58 $\pm$ 0,05	0,722	
50°	9,31 $\pm$ 0,04	0,702	
45°	9,30 $\pm$ 0,17	0,701	
40°	9,35 $\pm$ 0,01	0,705	
35°	9,55 $\pm$ 0,03	0,720	
32,5°	9,36 $\pm$ 0,06	0,705	
30°	9,42 $\pm$ 0,04	0,710	
28°	0	0	Interrupção do fluxo

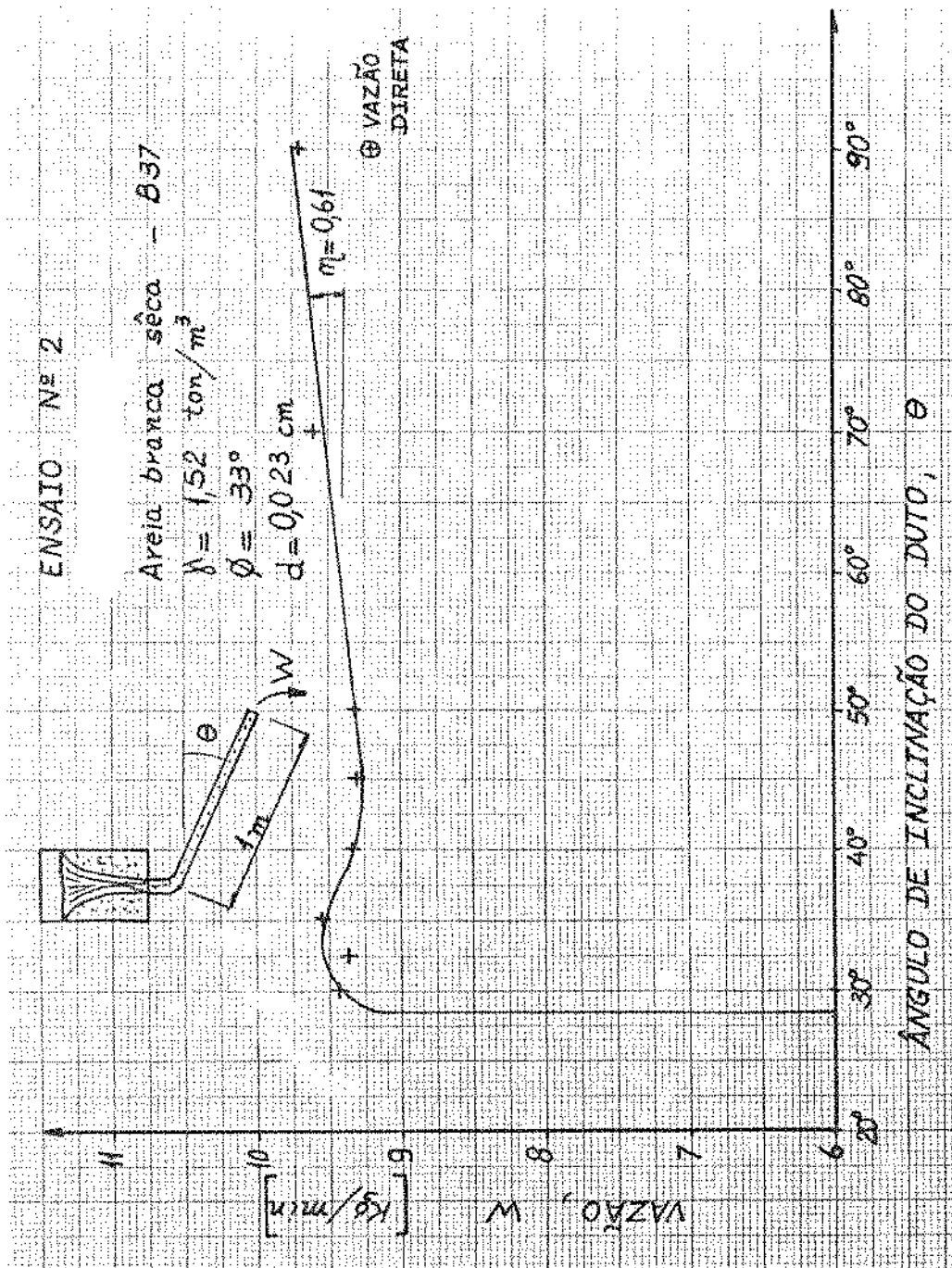


Fig. 6.2 - Variação da vazão (W) em função do ângulo (θ) de inclinação do duto, conforme Tabela VI.2.

7. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Não foi objetivo da pesquisa efetuada a verificação da influência do valor do diâmetro da boca de descarga no valor da vazão, motivo da utilização de diâmetro fixo no dispositivo experimental.

7.1 Influência da forma da boca de descarga e do material

A configuração da boca de descarga possui duas formas básicas:

- a) orifício livre;
- b) duto reto.

O fluxo através destas formas apresenta as configurações mostradas nas Figuras 7.1 a, b.

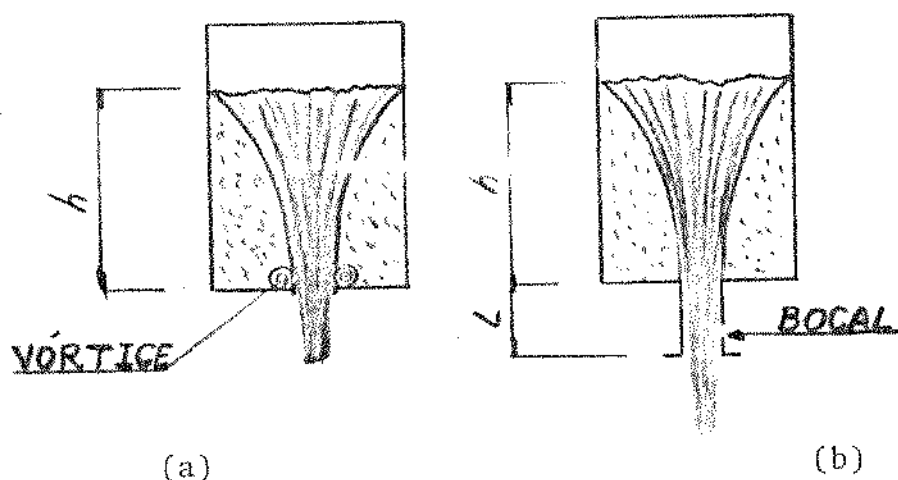


Fig. 7.1 - Fluxo em silos de fundo chato:

- a) saída livre,
- b) saída por duto reto.

A influência destas formas na vazão de descarga é caracte

terizada por uma sensível variação no valor da vazão. Esta afirmação é comprovada pelos resultados experimentais apresentados nos ensaios 1.01 e 1.02, onde constam os seguintes valores das vazões (W):

a) Saída livre:

$$W_a = 7.68 \text{ Kg/min,}$$

b) Descarga por duto reto

$$W_b = 9,36 \text{ Kg/min,}$$

correspondentes a areia grossa, seca.

Comparando-se estes valores, resulta uma maior vazão de descarga para o duto reto, correspondente a +22%. Esta diferença depende também das características do material em escoamento, como mostrado a seguir.

Nos ensaios 2.01 e 2.02, correspondentes a areia branca, de granulometria fina e homogênea, tem-se os seguintes valores:

a) Saída livre:

$$W_a = 9,21 \text{ Kg/min}$$

b) Descarga por duto reto:

$$W_b = 9,68 \text{ Kg/min}$$

Nota-se que também neste caso, a descarga por duto reto apresentou uma maior vazão, com diferença de apenas +6%. Estas diferenças podem ser associadas não apenas ao estrangulamento do fluxo acima do orifício de saída do silo, mas também à granulome

tria, e a coesão entre os grãos do material.

7.2 Análise do comportamento do fluxo acima da boca de descarga

Observando-se o fluxo de materiais na boca de descarga de um silo as seguintes conclusões são apresentadas.

7.2.1 Influência da pressão atmosférica

Acima da altura " h_0 " a tensão no fluxo " σ_f " é menor que a tensão " σ_0 " na boca de descarga, e abaixo da boca de descarga a tensão é atmosférica, menor que as tensões anteriores. A mudança brusca da tensão " σ_0 " para " σ_{atm} " faz com que o material parado estrangule o fluxo, conforme mostra a Figura 7.2.

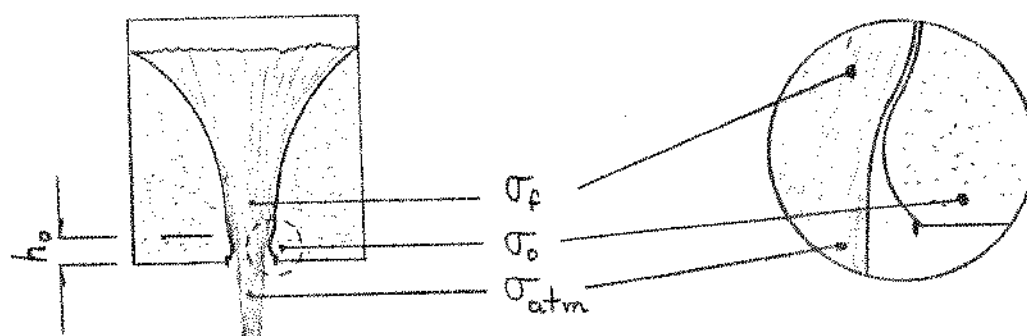


Fig. 7.2 - Tensões no material dentro de um silo

Acoplando-se um bocal na boca de descarga do silo, conforme mostra a Figura 7.3, o material parado acima da boca de descarga estrangula o fluxo com menor intensidade, pois a mudança de tensão na boca de descarga é suave.

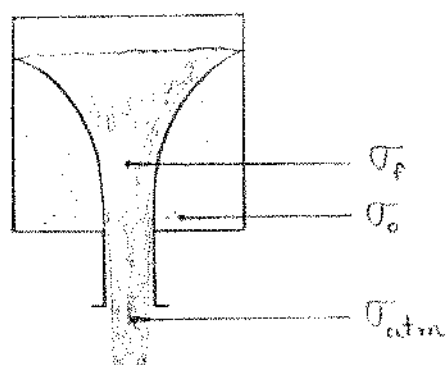


Fig. 7.3 - Silo com bocal na boca de descarga.

7.2.2 Influência devido a formação de vórtices.

O fluxo apresenta uma turbulência acima da bôca de descarga, formando vórtices que diminuem a área do fluxo, ver Figura 7.4.

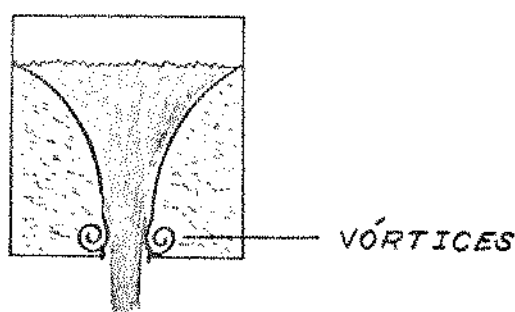


Fig. 7.4 - Fluxo em um silo

A formação desse vórtices é devido à brusca variação de pressão (tensão) na bôca de descarga; o que não ocorre quando acopla-se um bocal (Figura 7.3).

7.2.3 Influência da aceleração de Coriolis

O fluxo apresenta uma tendência a girar, devido a força centrífuga criada pela aceleração de Coriolis. Esse fenômeno influi com menor intensidade quando o bocal é acoplado, pois a superfície atritante do bocal é mais fixa.

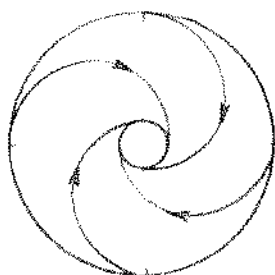


Fig. 7.4 - Vista superior de um silo com material descarregando.

7.3 Fluxo em dutos curvos

O fluxo em dutos curvos perde parte da energia cinética (Figura 4.13), isto porque os grãos mudam de direção com o impacto contra a parede do duto curvo. Esta diminuição da energia aumenta a área transversal do fluxo, diminuindo a velocidade dos grãos. A energia perdida é transformada em calor e dissipada nos grãos e no duto.

7.4 Fluxo em dutos inclinados

O fluxo é interrompido quando a inclinação do duto estiu

ver no ângulo (θ_c) crítico (atrito dinâmico), e só começa a fluir acima do ângulo de repouso do material (atrito estático).

Materiais homogêneos em dutos inclinados apresentam menores variações na vazão que materiais heterogêneos. Nesta experiência a areia seca (heterogênea) apresentou 21% de variação na vazão para $\theta = 28^\circ$ a 90° , enquanto areia branca (homogênea) apresentou 3% para a mesma variação de " θ ".

8. SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTO DE FUTUROS TRABALHOS

Em relação ao comportamento do fluxo dos diversos grãos, através de diferentes orifícios e formas de dutos, quer no manuseio de grãos, sugere-se os seguintes temas para futuras pesquisas:

a) Determinação das tensões nas paredes laterais dos silos em processo de carga ou descarga, devido à significativa variação nos valores das tensões.

b) Verificação da influência do diâmetro do silo e da altura de material nas paredes inferiores (fundo) silos.

c) Desenvolvimento de dispositivos que reduzam as tensões nas paredes dos silos, quando em processo de carga ou descarga.

d) Estudo do melhor raio de curvatura do duto de descarga, em função do material.

e) Cálculo da pressão que o fluxo de material exerce sobre uma válvula desviadora de fluxo.

ANEXOS

- A - Código de classificação dos materiais (CEMA).
- B - Tipos de bocas de descarga.
- C - Tipos de calhas.
- D - Pressão nas paredes do silo.
- E - Estudo de dimensões da válvula de fluxo tipo duas vias.

Tabela A.1 - Código de classificação dos materiais a granel, se
gundo suas características, conforme CEMA [16].

CARACTERÍSTICA DO MATERIAL		CÓDIGO
TAMANHO	Muito fino - abaixo de 100 mesh	A
	Fino - abaixo de 3 mm	B
	Granular - abaixo de 13 mm	C
	Em pedaços - acima de 13 mm	D
	Irregular - duro e altamente agregável	E
CAPACIDADE DE ESCOAMENTO E ÂNGULO DE REPOUSO (ϕ)	Escoamento muito fácil - $\phi < 20^\circ$	1
	Escoamento fácil - $20^\circ < \phi < 30^\circ$	2
	Escoamento médio - $30^\circ < \phi < 45^\circ$	3
	Escoamento difícil - $\phi > 45^\circ$	4
ABRASIVIDADE	Não abrasivo	5
	Abrasivo	6
	Muito abrasivo	7
	Muito cortante - corta ou arranha o <u>re</u> vestimento da correia	8
CARACTERÍSTI CAS MISTAS (Algumas <u>ve</u> zes pode-se aplicar mais de uma destas característi cas)	Muito poeirento	L
	Combina-se com o ar e desenvolve caracte rísticas fluidas	M
	Contém poeira explosiva	N
	Contaminável, o que pode afetar o uso	P
	Desagregável, o que pode afetar o uso	Q
	Produz gases nocivos ou poeira	R
	Altamente corrosivo	S
	Medianamente corrosivo	T
	Higroscópico	U
	Pegajoso ou pastoso	V
	Contém óleos ou produtos químicos que podem afetar as peças de borracha	W
	Compactável	X
	Muito leve e fofo - pode ser carregado pelo vento	Y
	Temperatura elevada	Z

EXEMPLO: Um material muito fino, de escoamento fácil, abrasivo e
contendo poeira explosiva poderia ser designado: clas
se A26N.

ANEXO A

Tabela A.2 - Valores do peso específico (γ) e do ângulo de repouso (ϕ), para diferentes materiais [16].

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (t/m^3)	ÂNGULO DE REPOUSO ϕ	CÓDIGO
Ácido salicílico	0,47	-	B25U
Acetato de cálcio	2,0	-	-
Ácido bórico refinado	0,9	-	B26T
Aço (fragmentos) triturado	1,6-2,4	-	D27W
Algodão em caroço, desfiado e seco	0,6	29°	C25W
Algodão em caroço, seco não desfiado	0,3-0,4	35°	C35W
Algodão, torta britada	0,6-0,7	-	B35
Algodão, torta granulada	0,6-0,7	-	B25W
Algodão sem caroço	0,2	-	B25Y
Algodão, farinha	0,6	-	B35W
Algodão polpa	0,6	-	B35W
Alumina	0,8-1,0	22°	B27M
Alumínio, hidratado	0,3	34°	C35
Alumínio, fragmentos de	0,1-0,2	-	E46Y
Alumínio, óxido de	1,1-1,9	-	E17M
Alumínio, silicato de	0,7	-	B35S
Alumínio, sulfato de	0,8	32°	C25
Alfafa, sementes de	0,1-0,2	-	B15N
Alfafa, farinha de	0,2	-	B46Y
Amonia, nitrato de	0,7	-	C36NWS
Amonia, sulfato de (granular)	0,7-0,9	-	C26S
Amonia, cloreto de (cristalino)	0,7-0,8	-	B25S

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (t/m^3)	ÂNGULO DE REPOUSO ϕ	CÓDIGO
Amêndoas, quebradas ou inteiras	0,4	-	C56Q
Amendoim descascado	0,2-0,3	-	D25Q
Amendoim com casca	0,6-0,7	-	C25Q
Antracito, carvão de pedra em pó abaixo de 3 mm	0,9	35°	B35TY
Arsênico pulverizado	0,4	-	A26
Arseniatos iniciais	1,1	-	B45R
Argila xistosa moída	1,4-1,6	-	D26QZ
Argila xistosa esmagada	1,4	39°	C36
Argila calcinada	1,3-1,6	-	B37
Argila seca refinada	1,6-1,9	35°	C37
Argila seca granulada	1,0-1,2	35°	D36
Argamassa úmida	2,4	-	B46T
Argamassa de cimento	2,15	-	37Q
Arenito, (britado)	1,4	-	D37
Areia úmida	1,8-2,1	45°	B47
Areia seca	1,4-1,8	35°	B37
Areia de fundição preparada	1,3-1,4	-	B47
Areia de fundição usada	1,3-1,6	39°	D37Z
Areia silicosa seca	1,4-1,6	-	B27
Areia (de macho) de fundição	1,0	41°	B45X
Arroz descascado	0,73-0,78	20°	B15
Arroz com casca	0,58	-	B25M
Arroz granulado, com areia	0,68-0,73	-	B35
Asfalto em pasta para pavimentação	1,4	-	C45
Asfalto em brita, abaixo de 13 mm	0,7	-	C45
Asbestos, minério em rocha	1,3	-	D27R

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (t/m ³)	ÂNGULO DE REPOUSO	CÓDIGO
Asbestos em fragmentos	0,5-0,4	-	E46XY
Aveia	0,4	21°	C25M
Aveia laminada	0,3	-	C25NY
Aço (cavado, lascas)	1,2-2,4	35°	E37V
Adubo, farinha de ossos	0,9	-	B36
Arseniato de chumbo	1,1	-	B45R
Basalto preto menor que 13 mm	1,4-1,6	-	C37
Basalto preto, pedaços, 50 < a < 75 mm	1,6-1,8	-	D37
Bório, carbonato de	1,1	-	A45
Bauxita, em brita, a < 75 mm	1,2-1,4	-	D37
Bauxita, minério	1,3-1,6	-	D37
Bagago	0,1-0,2	-	E45Y
Baquelite e plásticos similares pulverizados	0,6	-	B25
Barinita (minério)	2,9	-	D36
Barites pulverizado	2,3	-	B26
Beterraba seca	0,2	-	E45
Beterraba úmida	0,4-0,7	-	E46
Beterraba inteira	0,7	-	D35
Bentonita crua	0,6	-	D46X
Bentonita, 100 mesh e abaixo	0,8-1,0	-	A26XY
Bicarbonato de sódio	0,6	42°	A45Y
Borracha recuperada	0,4	32°	D45
Borracha granulada	0,8	35°	D45
Bórax, pedaços, 50 < a < 75 mm	1,0	-	D36
Bórax, pedaços, 38 < a < 50 mm	0,9-1,0	-	D36
Bórax, peneirados, a < 13 mm	0,9-1,0	-	C36

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (t/m ³)	ÂNGULO DE REPOUSO ϕ	CÓDIGO
Bórax refinado	0,7-0,9	-	B26T
Boro	1,2	-	-
Carvão em pó	0,7-1,0	20°	-
Carvão de pedra, escoria de	0,7	35°	D37T
Carvão de lenha	0,2-0,4	35°	D36Q
Carvão antracitoso uniforme	0,9-1,0	27°	C26
Carvão betuminoso, 50 mesh e abaixo	0,8-0,9	45°	B45T
Carvão betuminoso e uniforme	0,7-0,9	35°	-
Carvão betuminoso, minério	0,7-0,9	38°	D35T
Carvão betuminoso fofo, a < 13 mm	0,6-0,8	40°	C45T
Carvão betuminoso, desagregado	0,8-0,1	-	D36T
Carvão, linhita	0,6-0,7	38°	D36T
Cálcio, acetato de	2,0	-	-
Cálcio, carbureto de (britado)	1,1-1,3	-	D26N
Cálcio, lactado de	0,4	-	D45QTX
Carvão animal, 100 mesh e abaixo	0,3-0,4	-	A25Y
Carvão animal	0,4-0,6	-	B35
Carvão negro (em pó)	0,06-0,1	-	A35Y
Carvão negro (em bolinhas)	0,3	-	B15Q
Carne (pedaços de)	0,8-0,9	-	E35VW
Capim, semente de (posto natural)	0,6	-	B25NY
Cana de açúcar, cortada a faca	0,2	-	E45V
Caulim, a < 75 mm	1,0	35°	D36
Caulim (talco), 100 mesh	0,6-0,9	45°	A46Y
Cal moída, a < 3 mm	0,6	40°	B35MX
Cal hidratada, pulverizada	0,3-0,6	42°	A35MX
Cal em cristais	0,9	30°	D35

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (t/m ³)	ÂNGULO DE REPOUSO ϕ	CÓDIGO
Cal	0,9	-	A35
Calcário argiloso (adubo)	1,3	-	C27
Cavacos de papel	0,3-0,4	-	E45
Cavacos, papel ou madeira macia	0,2-0,4	-	E45
Cacau	0,4-0,6	-	C25Q
Cacau em flocos	0,5	-	C25
Cacau em pó	0,4-0,6	-	A45XY
Cafê em pó	0,3	-	B25MY
Cafê, grãos verdes	0,4	25°	C25Q
Cafê moído	0,3	23°	B25
Cafê torrado	0,3-0,4	-	C15
Cafê solúvel	0,3	-	B45PQU
Carbureto de cálcio (britado)	1,1-1,3	-	D26N
Carvão ativado, seco, refinado	0,1-0,3	-	B25Y
Carborundo a < 75 mm	1,6	-	D27
Caseína	0,6	-	B35
Castanha de caju	0,3-0,4	-	D46
Carbonato de potássio	0,8	-	B26
Carbonato de boro	1,1	-	A45
Casca e resíduos de madeira	0,2-0,3	-	E46Y
Centeio	0,7	23°	B15M
Cascalho seco	1,45	-	B28L
Cascalho molhado	1,6	23°	D17
Cereal quebrado	0,7-0,8	-	C25W
Cereal em espiga	0,9	-	-
Cereal com casca	0,7	21°	C25NW

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (t/m ³)	ÂNGULO DE REPOUSO ϕ	CÓDIGO
Cereal em sementes	0,3	-	B25W
Cereal com granulação de areia	0,6-0,7	-	B25W
Cereal em farinha	0,6	35°	B35W
Chumbo, arseniato de	1,1	-	B45R
Chumbo (minério)	3,2-4,4	30°	B36RT
Chumbo, óxidos de	1,0-2,4	-	B53
Chumbo, óxido pulverizado	3,2-4,0	-	-
Chocolate, bolo de (prensado)	0,6-0,7	-	D25
Cimento, argamassa de	1,2-1,4	-	D26
Cimento Portland fluidificado	1,0-1,2	-	A16M
Cimento em pedras	1,6-1,8	-	D36
Cimento Portland	1,6	39°	A26N
Cinza, fuligem com terra	1,6	32°	B35
Cinza seca de carvão, a < 13 mm	0,6	40°	C46TY
Cinza seca de carvão, a < 75 mm	0,6	-	D46T
Cinza úmida de carvão, a < 13 mm	0,7-0,8	50°	C46T
Cinzas	0,6-0,7	42°	A47
Cinzas do gás (úmidas)	1,3	-	D47T
Cloreto de potássio	1,2	-	B27
Cloreto de potássio em grãos	2,0-2,1	-	C26T
Cloreto de magnésio	0,6	-	C46
Cloreto de amônia, cristalino	0,7-0,9	-	B25
Clinquer (cimento)	1,2	30°-40°	D37
Cogumelos	0,4	-	-
Coque, petróleo calcinado	0,6	-	D36Y
Coque miúdo, a < 6 mm	0,4-0,6	30°-45°	C37Y
Coque desagregado	0,3-0,5	-	D47QVT

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (t/m^3)	ÂNGULO DE REPOUSO ϕ	CÓDIGO
Concreto, escória	1,6	-	D56
Concreto, brita, a < 50 mm (pouca água)	1,8-2,4	-	D26
Concreto, brita, a < 100 mm (média água)	1,8-2,4	-	D26
Concreto, brita, a < 150 mm (muita água)	1,8-2,4	-	D26
Coco, farinha de	0,6-0,7	35°-40°	B35W
Coco, torta de (massa)	0,6-0,7	30°	B35W
Coco, torta de (granulado)	0,4	20°	D25W
Coco granulado	0,3	20°	D25
Cobre, minério de	1,9-2,4	-	D27
Cobre, minério de (britado)	1,6-2,4	-	D27
Cobre, sulfato de	1,2-1,4	31°	D35
Cortiça, massa fina	0,2	-	B45MY
Cortiça granulada	0,2	-	C45
Cola de carpinteiro moída, a < 3 mm	0,6	-	B26
Cola granulada (com pérolas)	0,6	25°	C25
Cola vegetal pulverizada	0,6	-	-
Coco fragmentado	0,3	-	E45
Cristais de ácido oxálico	1,0	-	B358V
Criolito (poeira)	1,2-1,4	-	A36
Criolito granulado	1,4-1,6	-	D36
Diatomite	0,2	-	A36MY
Dióxido de manganês	1,3	-	-
Dolomita granulada	1,6	-	D26
Ebonita britada, a < 13 mm	1,0-1,1	-	C25
Ervilha seca	-	-	C15NQ
Escória de alto forno, esmagada	1,5	25°	A27

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (t/m ³)	ÂNGULO DE REPOUSO ϕ	CÓDIGO
Estearita (pedra sabão), talco fino	0,6-0,7	-	A45XY
Espato ^f fluor, peneirada, a < 13 mm	1,4-1,6	-	C46
Espatofluor, 13 < a < 75 mm	1,8-2,0	-	D46
Esterco	0,4-0,8	-	E45ST
Farelo	0,2-0,3	-	B35NY
Ferro, minério de	-	35°	D36
Ferro, minério de (britado)	-	-	C26
Ferro, óxido de (pigmento)	-	40°	A45
Ferro fundido, lascas de	2,1-3,2	-	C46
Ferro cromado	2,0-2,3	-	D27
Ferro, escória de forno	0,9	35°	D37T
Ferro, cavacos	2,0	-	D45NY
Feldspato, peneirada a < 13 mm	1,1-1,4	38°	B36
Feldspato, 38 < a < 75 mm	1,4-1,8	34°	D36
Feldspato, 200 mesh	1,6	-	-
Fermento em pó	0,6-0,9	-	A25
Fosfato (super) triplo, fertilizante moido	0,8-0,9	-	B45T
Fosfato, pedra de (quebrada, seca)	1,2-1,36	25°-30°	D26
Fosfato, pedra de (pulverizada)	0,95	40°	B36
Fosfato (super triplo)	0,8-0,9	-	B36R
Fosfato de sódio	0,8-1,0	-	-
Fosfato de trisódio	1,0	-	B36
Fosfato de trisódio (granular)	1,0	26°	B25
Fosfato de trisódio (pulverizado)	0,8	40°	B35
Fosfato de dicálcio	0,6-0,8	-	A45
Fosfato de disódio	0,4-0,5	-	B26QT

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO	ÂNGULO DE REPOUSO ϕ	CÓDIGO
Fosfato fertilizante	1,0	26°	B25T
Fuligem, pó de carvão de caldeira	0,6	-	A17MTY
Gelatina granulada	0,5	-	C25Q
Geiserita, rocha de precipitação	1,6-2,2	-	D27
Gelo moído	0,6-0,7	-	D16
Gergelim, sementes de	0,4	-	B26
Gilsonito (espécie de asfalto)	0,6	-	C26NT
Gipsita, gesso natural (poeira não exposta ao ar)	1,5	-	-
Gipsita, poeira exposta ao ar	1,0-1,1	42°	A36Y
Gipsita, peneirada de 13 mm	1,1-1,3	40°	C36
Gipsita, pedaços de 38 < a < 75 mm	1,1-1,3	30°	D26
Giz granuloso	1,2-1,4	-	D26
Giz, 100 mesh e abaixo	1,0-1,2	-	A46MXV
Gluten, farinha de	0,6	-	B25P
Goma laca	1,3	-	C45
Goma laca, em pó ou granulada	0,5	-	B25PY
Grão seco, consumido em alimentação animal (cereal)	0,5	-	E25WY
Grão seco de cevada	0,4	-	C45
Grão úmido de cevada	0,9-1,0	-	C45T
Granito, peneirado, a < 13 mm	-	-	C27
Granito, pedaços, 38 < a < 75 mm	1,6-1,4	-	D27
Granito quebrado	1,5-1,6	-	D27
Greda de pisoeiro (oleosa)	1,0	-	B26
Greda de pisoeiro (queimada)	0,6	-	B26
Greda de pisoeiro em bruto	0,6	35°	B26

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (t/m ³)	ÂNGULO DE REPOUSO ϕ	CÓDIGO
Grafite, flocos de	0,6	-	C25
Gramma seca, cortante	1,4-1,6	-	D27
Gramma, sementes de	0,1-0,2	-	B25NY
Hematita	1,5-1,7	-	B26
Hematita mineral (fina)	2,4-3,5	-	A45R
Hematita mineral (grande)	2,0-3,0	-	B27
Lava de fornalha, granular, seca	1,0	25°	C27
Lava de fornalha, granular, úmida	1,4-1,6	45°	B47
Lama, melação	1,1	-	A15V
Lactose	0,5	-	A25PX
Leite em pó (seco)	0,6	-	B25P
Leite em pó integral	0,3	-	B35PUXY
Leite, flocos secos de	0,08-0,1	-	B25MPY
Linhaça, semente de linho	0,7	21°	B25NW
Linhaça, farinha de	0,4	34°	B25W
Linhaça, bolo de	0,6	-	B25P
Linhaça, bolo de (tamanho de ervilha)	0,8	-	C35W
Limalha	2,0	-	D47WZ
Linhita, seca ao ar	0,7-0,9	-	D25
Litopon (pigmento branco usado em linóleos)	0,7-0,8	-	A25M
Lixo doméstico	0,8	-	E45VW
Lodo	0,6-0,8	-	E25TW
Lúpulo, seco	0,6	-	E35
Lúpulo, úmido	0,8-0,9	-	E35T
Madeira, casca e resíduos de	0,2-0,3	45°	E46Y
Madeira fatias tiradas c/ plaina	0,1-0,2	-	E45V

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (t/m ³)	ÂNGULO DE REPOUSO ϕ	CÓDIGO
Madeira, cavacos de	0,1-0,5	-	E45MY
Magnésio, cloreto de	0,5	-	C46
Magnésio, sulfato de	1,1	-	-
Malte seco e moído, a < 3 mm	3,5	-	B25N
Malte, seco, integral	0,4-0,5	-	C25W
Malte, úmido ou verde	1,0	-	C45
Malte, farinha de	0,6	-	B25
Malte, broto de	0,2	-	-
Manganês, dióxido de	1,3	-	-
Manganês, minério de	2,0-2,3	39°	D37
Manganês, sulfato de	1,1	-	C27
Mármore, moído, a < 13 mm	1,3-1,5	-	D27
Milho descascado e moído	0,6	-	C25
Miacina, (ácido nicotínico)	0,6	-	B26
Mica moída	0,2	34°	B36
Mica pulverizada	0,2	-	A26MY
Mica, flocos de	0,3	-	B16MY
Molibdênio em pó	1,7	40°	B25
Milho	0,9	-	C15N
Mostarda, sementes de	0,7	-	B15N
Neve, formada pela chuva	0,2-1,0	-	-
Neve, logo após a queda	0,08-0,2	-	-
Níquel	1,3-2,4	-	D27T
Nogueira, casca de (triturada)	0,5-0,7	-	B37
Ostra, casca de (moída a < 13 mm)	0,8-1,0	-	C36T
Ostra, casca de, integral	1,3	-	D36TV

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (t/m ³)	ÂNGULO DE REPOUSO ϕ	CÓDIGO
Ossos	0,5-0,6	-	-
Papel, polpa de	0,6-1,0	-	E15MV
Pedra pome, a < 3 mm	0,6-0,7	-	E47
Pedra calcária para agricultura	1,1	29°	B26
Pedra calcária moída	1,4	38°	C26X
Pedra britada	2,0-2,3	-	D26
Pedra mole (escavada com pá)	1,6-1,8	-	D36
Pedregulho para diques, barreiras	1,4-1,6	38°	D36
Pedregulho, seixo (cristal de rocha)	1,4-1,6	39°	D36
Peixe, farinha de	0,5-0,6	-	B45W
Peixe, pedaços de	0,6-0,8	-	B45W
Pirita, pedaços 50 < a < 75 mm	2,2-2,3	-	D26T
Pirita em pelotas	1,9-2,1	-	C26T
Potássio, sulfato de	0,7-0,8	-	B46X
Potássio, sal de (silvita, etc.)	1,3	-	B25T
Potássio, carbonato de	0,8	-	B26
Potássio, cloreto de (pelotas)	1,9-2,1	-	C26T
Potássio, nitrato de	1,2	-	C16T
Pólvora	1,0	-	B25T
Poeira de pedra calcária	1,4	38°	C26X
Pó de esmeril	3,7	-	A27
Poliestireno	0,6	-	B25
Quartzo, poeira de	1,1-1,3	-	A27Y
Quartzo, peneirada a < 13 mm	1,3-1,4	-	C27Z
Quartzo, pedaços 38 < a < 75 mm	1,4-1,5	-	D27Z
Sabão, em bolas ou granuloso	0,2-0,4	-	B25Q
Sabão em lascas	0,2-0,4	30°	C25Q

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (t/m ³)	ÂNGULO DE REPOUSO φ	CÓDIGO
Sabão detergente	0,2-0,8	-	-
Sabão em flocos	0,08-0,2	-	B35QXY
Sabão em pó	0,3-0,4	-	B25X
Sabão em lâminas ou granuloso	0,6-0,8	-	B25
Sal comum seco, sem refinamento	0,6-0,9	-	B26TU
Sal comum seco refinado	1,1-1,3	25°	D26TVW
Sal, bolo de (seco), sem refino	1,4	36°	B36TW
Sal, bolo de (seco), triturado	1,0-1,4	-	B26NT
Sal, sulfato de alumínio, refinado	0,7-0,8	30°-45°	B35
Sal de alume, granulado	0,8-1,0	-	D35
Salitre	1,3	-	-
Sinter	1,4	-	W
Serragem	0,1-0,2	36°	B35
Sílica	1,4-1,6	-	B27
Soda calcinada, em blocos de pó	0,8	22°	C26
Soda calcinada pesada	0,9-1,0	32°	B36
Soda calcinada leve	0,3-0,6	37°	A36Y
Sódio, nitrato de	1,1-1,3	24°	D25
Sódio, fosfato de	0,8-1,0	-	-
Sódio, sulfato de (alumínio)	1,2	31°	-
Sorgo, semente de (espécie de milho)	0,7-0,8	-	B26
Soja quebrada	0,5-0,6	35°	C26NW
Soja integral	0,7-0,8	21°-28°	C26NW
Soja, bolo de (a > 13 mm)	0,6-0,7	32°	D35W
Soja em flocos, crua	0,3-0,4	-	C25Y
Soja, farinha de (fria)	0,6	32°-37°	B35
Soja, farinha de (quente)	0,6	-	B35T

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (t/m ³)	ÂNGULO DE REPOUSO ϕ	CÓDIGO
Sulfato em pó	0,8-1,0	-	B25NW
Sulfato moído, a < 13 mm	0,8-1,0	-	C25NS
Sulfato, a < 75 mm	1,3-1,4	-	D25NS
Sulfato ferroso	1,0-1,2	-	C36
Taconita em grãos	1,9-2,1	-	D17Q
Talco em pó	0,8-1,0	-	A25MY
Talco, peneirado a < 13 mm	1,3-1,4	-	C25
Talco, pedaços 38 < a < 75 mm	1,4-1,5	-	D25
Talco sólido	2,7	-	-
Tabaco, folhas de (secas)	0,2	-	E45QV
Tabaco, pedaços de	0,2-0,4	-	D45Y
Tabaco, caule de	0,2	-	E45Y
Terra seca e escavada	1,1-1,3	35°	B36
Terra e bauxita seca	1,1	35°	B26
Titânio em esponja	1,0-1,1	-	E47
Tijolo duro	2,0	-	D47Z
Tijolo mole	1,6	-	D47
Torresmo quebrado, a < 75 mm	0,6-0,8	-	D45
Trevo, semente de	0,8	-	B25N
Trigo	0,7-0,8	-	C25N
Trigo negro	0,6-0,7	25°	B25N
Trigo moído	0,6-0,7	-	B25N
Trigo, sementes de	0,4	-	B25W
Trigo, flor de	0,6	-	A45PN
Tungue, polpa de (triturado)	0,4	-	D25
Vermiculita dilatada	0,2	-	C35Y
Vermiculita mineral	1,1-1,3	-	D36Y

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (t/m ³)	ÂNGULO DE REPOUSO φ	CÓDIGO
Vidro quente	1,3-1,6	-	D27Z
Vidro, pedaços que tornarão a se fundir	1,3-1,9	-	D37Z
Zinco, pó de	3,2	-	-
Zinco concentrado	1,2-1,3	-	B26
Zinco, minério de (triturado)	2,6	38°	-
Zinco, minério de (queimado)	1,8	38°	C36
Zinco, óxido de (pesado)	0,5-0,6	-	A35X
Zinco, óxido de (leve)	0,1-0,2	-	A35XY

ANEXO B

TIPOS DE BOCAS DE DESCARGA

De acordo com os seus principais empregos, a bôca de descarga do silo pode ser dividida em três tipos: direta, gaveta e pivotada.

A bôca de Descarga direta permite ajustar ou interromper o fluxo de material girando o sistema conforme mostra a Figura B.1. Esse equipamento possui a desvantagem de ser grande e pesado.

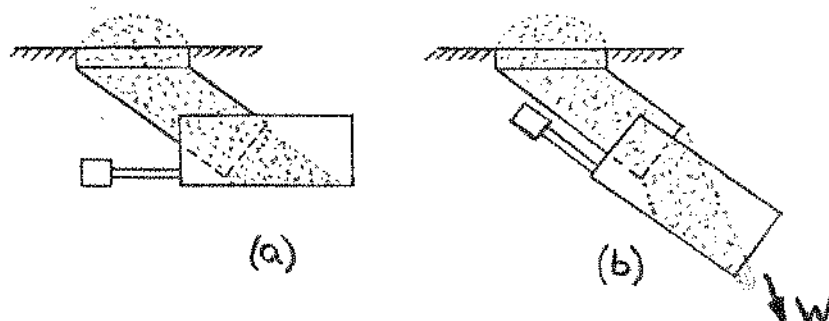


Fig. B.1 - Bôca de descarga direta.

A bôca de Descarga por gaveta é uma chapa que desliza em um encaixe interrompendo ou variando o fluxo, conforme mostra a Figura B.2. Normalmente ela é de construção simples, compacta e acionada por meios manuais. Suas desvantagens são; resistência no encaixe dificultando a abertura, os grãos podem tornar-se calços quando fecha. Utilizada principalmente para pequenos grãos com boa fluidez.

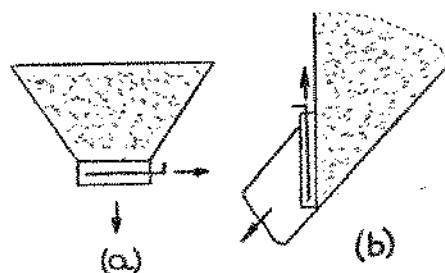


Fig. B.2 - Boca de descarga por gaveta.
a) tipo fundo de silo;
b) tipo lateral de silo.

A boca de Descarga Pivotada apresenta uma superfície cilíndrica pivotada no eixo horizontal, conforme mostra a Figura 11.3.a, b, c, e, f. Comparando-se com os sistemas anteriores, este apresenta a vantagem de abrir e fechar com menor esforço. A desvantagem é que grandes grãos podem calçar a bôca quando essa estiver fechando. O projeto da Figura B.3.d não apresenta essa desvantagem.

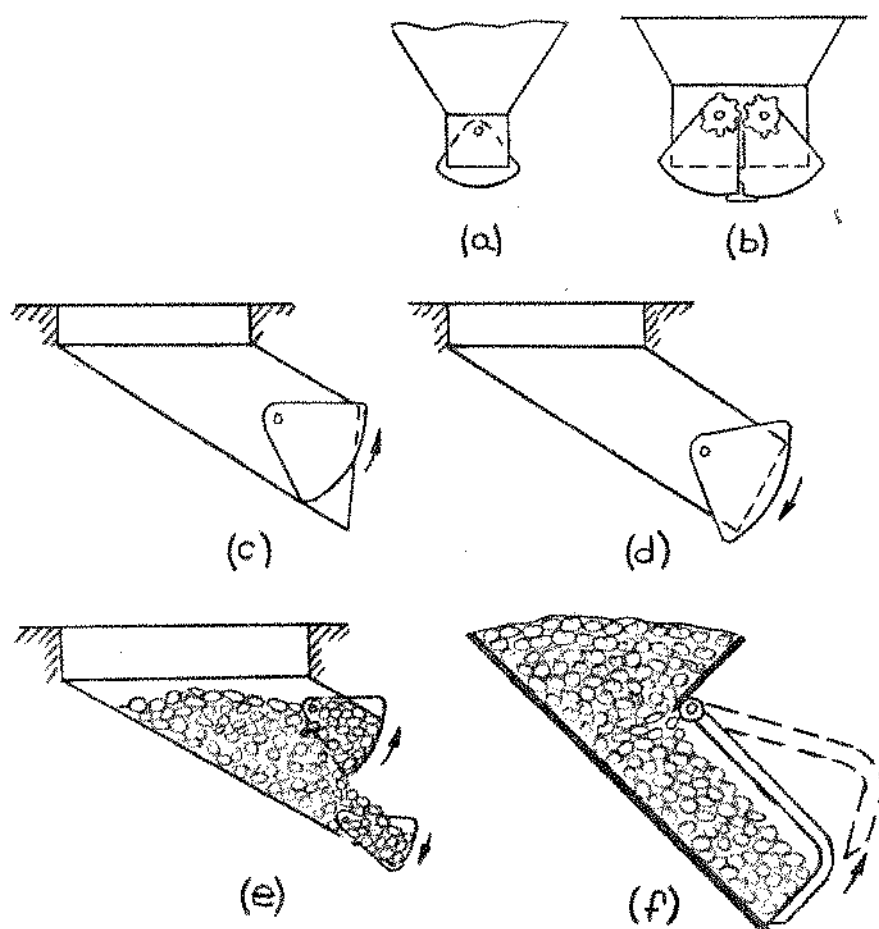


Fig. B.3 - Boca de descarga pivotada

Para descarregamentos automatizados pode-se utilizar uma Válvula de descarga de controle volumétrico, tipo pneumático, conforme Figura B.4. A cada ciclo, uma quantidade fixa de material (volume) é descarregado.

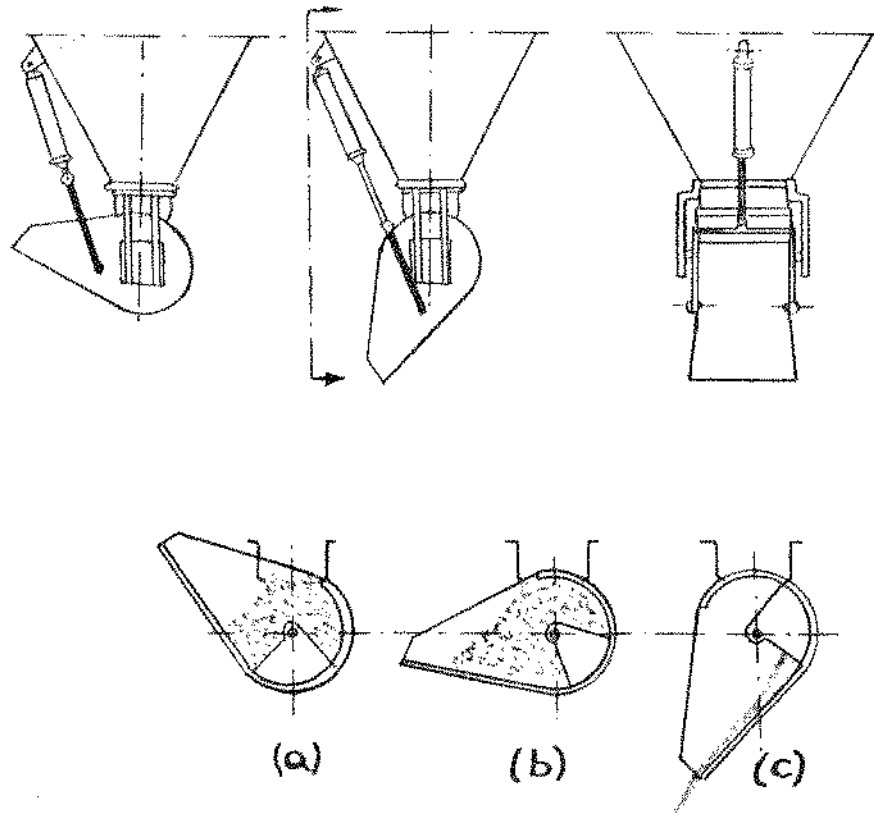


Fig. B.4 - Válvula de descarga de controle volumétrico pneumático.

- a) posição quando carregando.
- b) posição intermediária.
- c) posição quando descarregando.

ANEXO C

TIPOS DE CALHAS

As calhas servem para evitar que o material transportado não sofra influência do meio exterior, como por exemplo umidade, corpos estranhos, formação de poeiras, etc.

As secções das calhas podem ser quadradas, redondas, retangulares, em forma de "U" e planas.

A Calha giratória serve para distribuir a carga em círculos (ver Figura C.1).

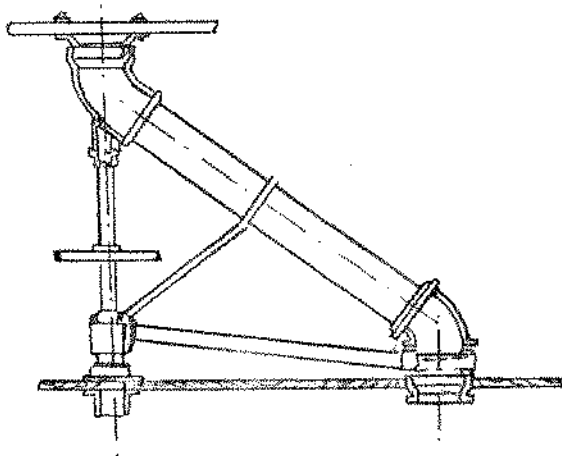


Fig. C.1 - Calha tipo giratória.

ANEXO D

PRESSÃO NAS PAREDES DO SILO

A pressão nas paredes do silo de materiais a granel não se assemelha com a pressão Hidráulica. O cálculo desta pressão é fundamental para o dimensionamento da estrutura das paredes do silo. Alguns autores [2, 3, 8], apresentam a teoria para de terminar a pressão nessas paredes.

A Figura D.1 mostra as forças envolvidas em um volume infinitesimal. Considerando-se que as pressões " p_v " e " p_h " são constantes para todos os pontos da superfície do arco.

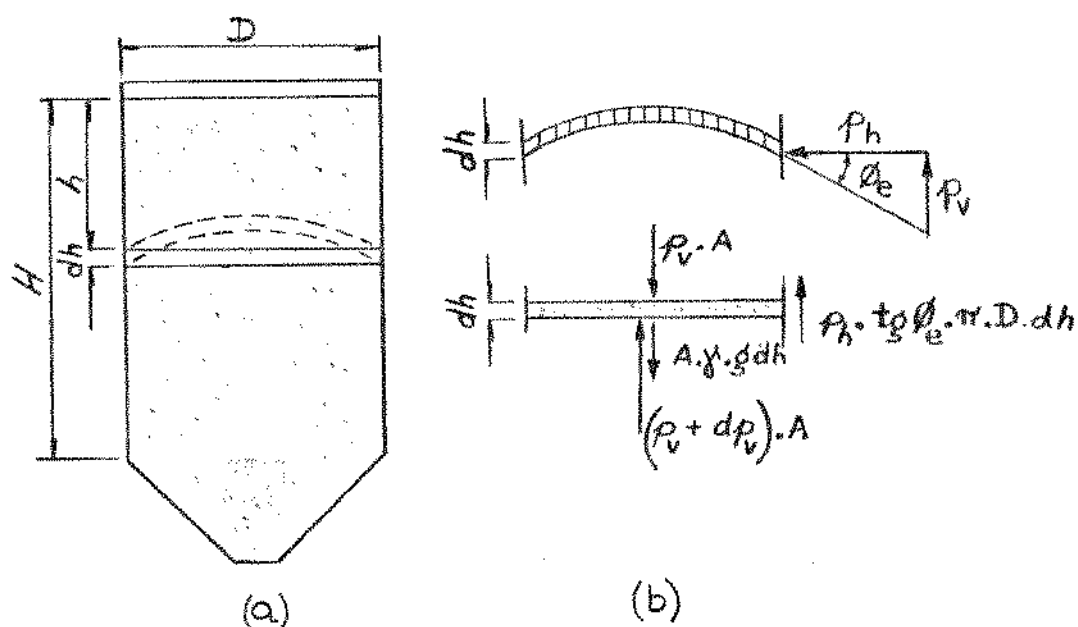


Fig. D .1 - Diagrama da pressão distribuída de um silo.

- ϕ_e = ângulo de atrito externo (grãos x parede);
 f_e = coeficiente de atrito externo (grãos x parede);
 h = altura do material acima do volume infinitesimal [m];
 p_v = pressão vertical [kgf/cm²];
 p_h = pressão horizontal [kgf/cm²].

Para materiais granulares a pressão horizontal (p_h) é proporcional à pressão vertical (p_v), como mostra a equação

$$p_h = Mp_v \quad , \quad (D.1)$$

onde "M" é o coeficiente de Mobilidade do material [2]. Rankine [2] mostrou que;

$$M = \frac{p_h}{p_v} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{1 - \sin\phi}{1 + \sin\phi} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad . \quad (D.2)$$

No equilíbrio das forças verticais do volume infinitesimal da Figura D.1, obtêm-se as equações de Janssen [2], onde; a Pressão vertical no arco de altura "h" é dada por;

$$p_v = \frac{g \cdot \gamma \cdot R}{M \cdot f_e} \cdot \left(1 - \frac{1}{\frac{M \cdot f_e \cdot h}{R}} \right) \quad , \quad (D.3)$$

e a Pressão Horizontal;

$$P_h = \frac{g \cdot \gamma \cdot R}{f_c} \left(1 - \frac{1}{\frac{M \cdot f_e \cdot h}{R}} \right) \quad (D.4)$$

Para silos de diferentes diâmetros a Figura D.2 apresenta o diagrama da pressão horizontal em função da altura (h) do material (Figura D.1.a).

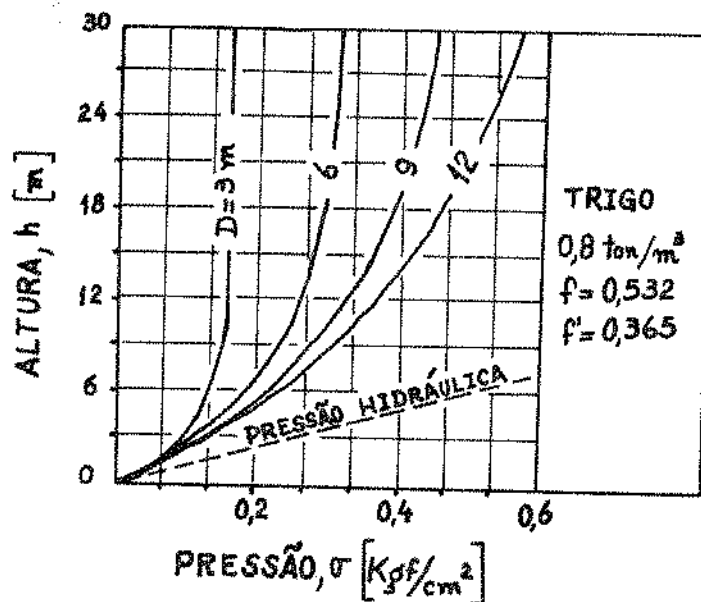


Fig. D.2 - Diagrama da pressão horizontal na parede de um silo de aço conforme equação de Janssen [2], para trigo com ; $k = 0,6$

$$\gamma = 0,8 \text{ ton/m}^3$$

$$f = 0,532$$

$$f_e = 0,365$$

Um silo descarregando material pela boca de descarga central apresenta um aumento da pressão dinâmica (p_d) na parede lateral deste silo [17]. A Figura D.3.a mostra a variação da pressão horizontal na parede do silo em função da altura (h) de material (Figura D.1.a). Quando o silo está sendo carregado

(sem descarregamento) a variação da pressão horizontal na parede do silo em função da altura (h) de material é maior que a anterior (silo sendo descarregado), conforme mostra a Figura D.3.

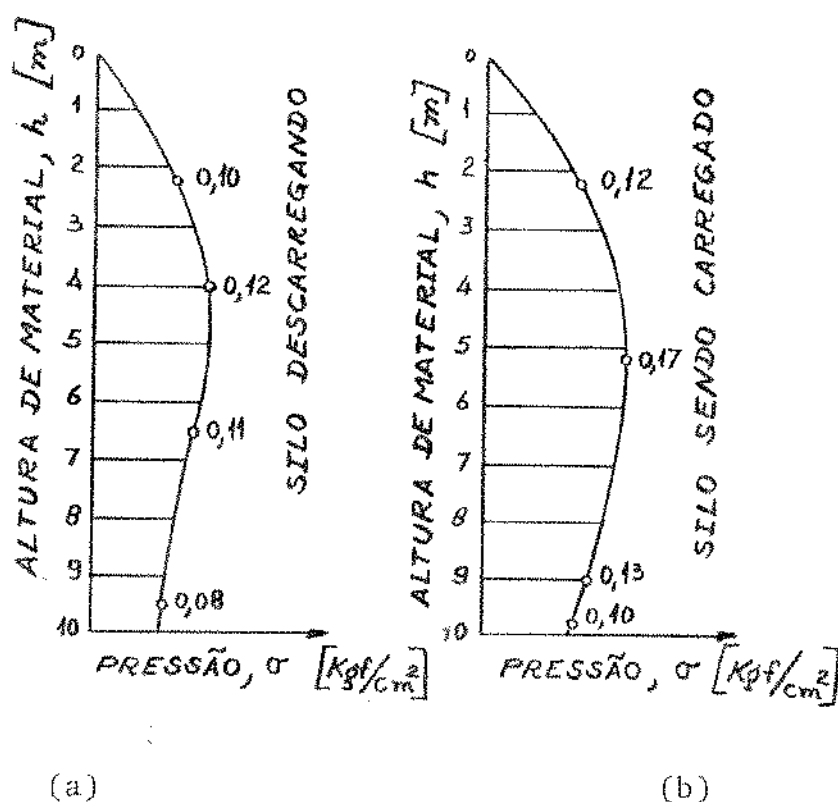


Fig. D.3 - Pressão horizontal na parede do silo de 10 m de altura e 1,26 m de diâmetro para silo sendo descarregado (caso a) e sendo carregado sem descarga (caso b).

Alguns autores afirmam que a pressão na lateral de um silo com fluxo é quatro a três vezes maior que a pressão na lateral do silo com o material em repouso [8]. Outras publicações mais recentes como;

- o Código Alemão [17], recomenda uma sobre-taxa na pressão de duas vezes para uma altura de 3/4 da altura total do silo,
- o Código Russo [18], recomenda uma sobre-taxa na pressão de 1,8 para 2/3 da altura em relação ao fundo do silo,

- o Código Francês, recomenda um fator de segurança de duas vezes, no dimensionamento das estruturas do silo.

Mesmo obedecendo esses códigos, o silo pode trincar depois de um determinado tempo de uso, devido à pressão dinâmica do material na parede do silo, provocando fadiga na estrutura [19]. Por isso, muitos autores estudam dispositivos de silos que diminuem a tensão nas paredes do silo.

ANEXO E

ESTUDO DE DIMENSÕES DA VÁLVULA DESVIADORA DE FLUXO TIPO DUAS VIAS

A Válvula desviadora de fluxo tipo duas vias (Figura E.1) é apresentada neste trabalho para ajudar os projetistas no cálculo geométrico dos detalhes construtivos, quando já se conhece a inclinação (θ) dos dutos e a abertura da boca de descarga, calculada conforme capítulos anteriores.

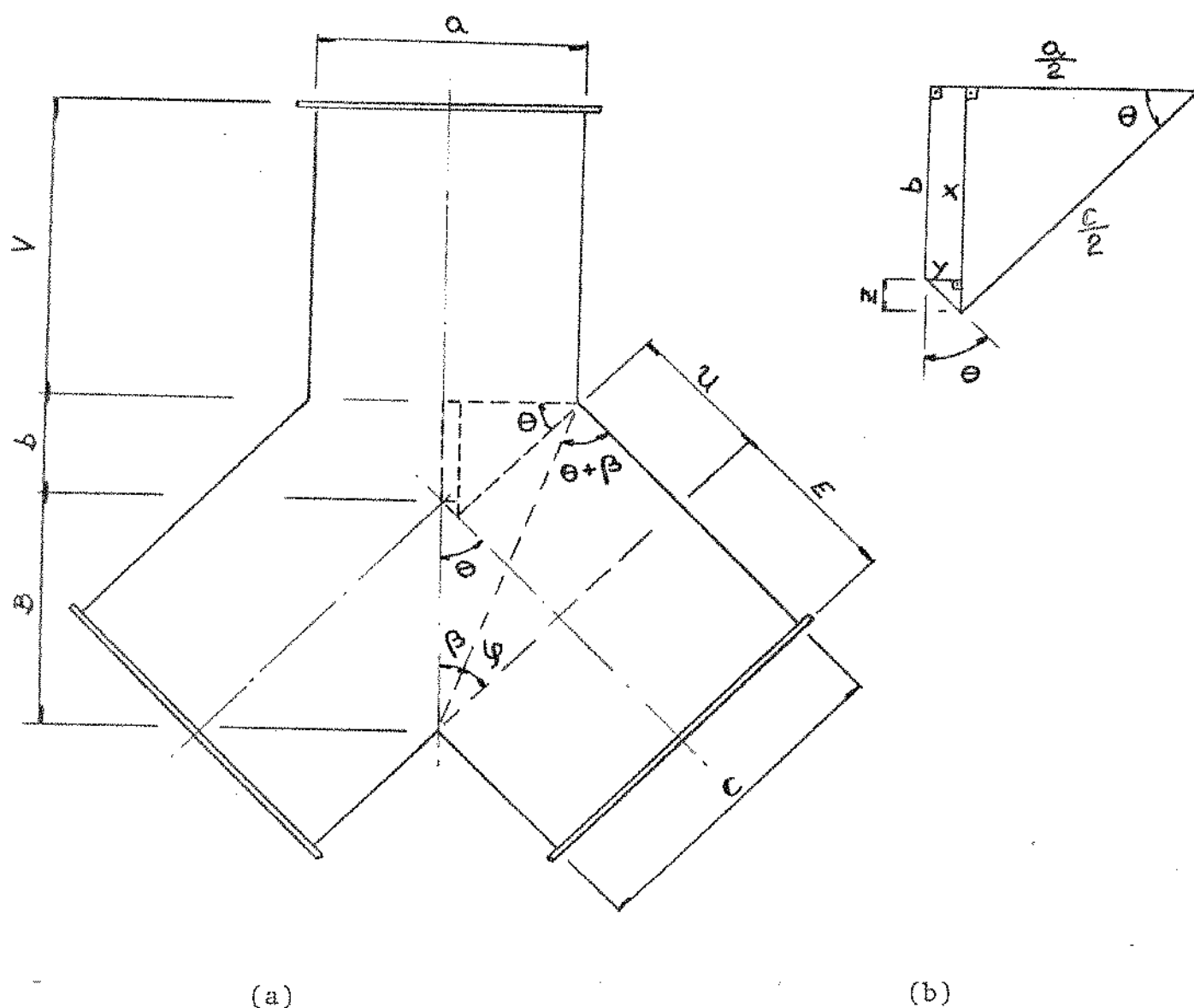


Fig. E.1 - Válvula desviadora de fluxo tipo duas vias.

As relações geométricas da Válvula da Figura E.1 são as seguintes:

$$x = \frac{c \cdot \text{sen}\theta}{2}$$

$$y = \frac{a}{2} - \frac{c}{2} \cdot \cos\theta$$

$$z = \frac{y}{\text{tg}\theta}$$

$$b = x - z$$

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

$$\text{tg}(\theta + \beta) = c/U$$

As dimensões são obtidas pelas equações:

$$B = \frac{c}{2 \cdot \text{sen}\theta}$$

$$b = \frac{c - a \cdot \cos\theta}{2 \cdot \text{sen}\theta}$$

$$\text{tg}\beta = \frac{a}{2 \cdot (B + b)} = \frac{a \cdot \text{sen}\theta}{2c - a \cdot \cos\theta}$$

$$U = \frac{c}{\text{tg}(\theta + \beta)}$$

O cálculo da dimensão "b", quando $a \neq c$, é dado por:

$$\begin{aligned}
 b &= x - z = \frac{c \cdot \operatorname{sen} \theta}{2} - \frac{\frac{a}{2} - \frac{c \cdot \cos \theta}{2}}{\operatorname{tg} \theta} = \\
 &= \frac{c \cdot \operatorname{sen} \theta}{2} - \frac{1}{2 \cdot \operatorname{tg} \theta} (a - c \cdot \cos \theta) = \\
 &= \frac{c \cdot \operatorname{sen}^2 \theta}{2 \cdot \operatorname{sen} \theta} - \frac{a \cdot \cos \theta}{2 \cdot \operatorname{sen} \theta} + \frac{c \cdot \cos^2 \theta}{2 \cdot \operatorname{sen} \theta} = \\
 &= \frac{c - a \cdot \cos \theta}{2 \cdot \operatorname{sen} \theta} .
 \end{aligned}$$

O cálculo do ângulo " β ", quando $a \neq c$, é dado por:

$$\begin{aligned}
 \operatorname{tg} \beta &= \frac{a}{2 \cdot (B + b)} = \frac{a}{2 \cdot \left(\frac{c}{2 \cdot \operatorname{sen} \theta} + \frac{c - a \cdot \cos \theta}{2 \cdot \operatorname{sen} \theta} \right)} = \\
 &= \frac{a \cdot \operatorname{sen} \theta}{2c - a \cdot \cos \theta} .
 \end{aligned}$$

Quando a boca de descarga do silo apresenta a mesma di mensão do duto tem-se $a = c$, e portanto,

$$B = \frac{c}{2 \cdot \operatorname{sen} \theta}$$

$$b = \frac{c - c \cdot \cos \theta}{2 \operatorname{sen} \theta} = \frac{c}{2} \left(\frac{1 - \cos \theta}{\operatorname{sen} \theta} \right) = \frac{c}{2} \cdot \operatorname{tg} \theta / 2$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{c \cdot \operatorname{sen} \theta}{2c - c \cdot \cos \theta} = \frac{\operatorname{sen} \theta}{2 - \cos \theta} = \frac{\operatorname{sen} \theta}{1 + 1 - \cos \theta} =$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\operatorname{sen} \theta}{1 + \operatorname{sen} \theta \cdot \frac{(1 - \cos \theta)}{\operatorname{sen} \theta}} = \frac{\operatorname{sen} \theta}{1 + \operatorname{sen} \theta \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}}$$

$$U = \frac{c}{\operatorname{tg}(\theta + \beta)}$$

Tabela E.2 - Tabela de dimensões de válvulas desviadoras de fluxo tipo duas vias, para 10 diferentes tamanhos de Válvulas.

Válvula	Valores fornecidos			Valores calculados			
Nº	θ	a mm	c mm	β	U	b mm	B mm
01	20°	500	500	17,88°	643	44,0	731
02	20°	300	500	8,13°	935	319	731
03	45°	500	500	28,65°	147	104	354
04	45°	300	500	15,06°	288	204	354
05	60°	500	500	29,98°	0,16	144	289
06	60°	300	500	16,99°	115,6	202	289
07	45°	500	300	55,14°	54	38	212
08	70°	500	500	29,54°	84	175	266
09	30°	500	500	23,79°	366	67	500
10	30°	300	500	11,46°	566	240	500

BIBLIOGRAFIA

- |01| Vennard, "Elementary Fluid Mechanics", John Wiley, New York, 1961, p.3
- |02| Stepanoff, Alexey J., "Gravity flow of bulk solids and transportation of solids in suspension", John Wiley & Sons Inc., New York, London, Sydney, Toronto, pages 191, 1969.
- |03| Ketchun, Walls, "Bins and grain elevators," 3rd ed., McGraw Hill, New York, 1919.
- |04| Zens and Othmer, "Fluidization and Fluid-Particle Systems", Reinhold, New York, 1960, chap.4, p.136.
- |05| A. Spivakorsy e V. Dyachkov, "Conveyors and Related Equipament", Peace Publishers, Moscou pages 390 to 423 chapter XIX .
- |06| Fraser, "Discussion of Papers", Trans. Inst. Chem. Engrs. (London), vol. 40, 1962, p.263, Photographs of flow pattern included.
- |07| Jenike, "Storage and Flow of Solids", Bull Univ. Utah, vol. 53, n°26, 1969 p.6 .
- |08| M. and A. Reimberts', "Silos - Traité Theorique e Pratique", 4th ed. Editions Eyrolles Paris, 1965, p.26.
- |09| Zenkov, "Mechanics of Bulk Solids", 2nd ed., Mashgiz Moscou, 1964 (in Russian).
- |10| Kvapil, "Theorie der Schüttgutbewegung", VEB Verlag Technik, Berlin, 1959.

- [11] Atyaman, "Causes of Hanging in Ore Chutes", Can. Mining J., Nov. 1960, pp.77-81, Dec. 1960, pp.72-75, Jan. 1961, pp.41-45.
- [12] Durand and Condolios, "Ecoulement d'un Materiau Grenu a Travers un Orifice Circulaire", Travaux, Mar. 1956, 113-116.
- [13] Gregory, Appl. Chem. (London), vol.2, suppl. issue 1, 1952, pp. 51-57.
- [14] Shirai, Chem. Eng. (Tokio), vol.16, 1952 pp.86-89. (0,09 - 0,36 in orifices tested).
- [15] Beverloo, Leniger, and Velde, "The flow of Granular Solids Through Orificies", Chem. Eng. Sci., vol.15, 1961, pp.260-269.
- [16] CEMA, "Conveyor Equipament Manufacturers Association", USA.
- [17] Din 1055, "Lastannamen für Bauten, Lasten in Silozellen", Blatt 6, Nov. 1964.
- [18] Haeger and Safarian, J. Ass. Concrete Inst., vol.64, n°9, 1967, pp.575-79.
- [19] ASME, Theimer, "Failures of Reforced Concrete Grain Silos", ASME Paper 68-MH-36, Oct. 1968 (in Germany).