

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMT 594 - TRABALHO DE FORMATURA

**"PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM LEITO FLUIDIZADO
PARA AULAS DEMONSTRATIVAS"**

Coordenador : Prof. Dr. Stephan Woly nec

Orientador: Prof. Dr. Jose Deodoro Trani Capocchi

Aluno : Edson Mitsunobu Cintho Nº USP 1791400

1995

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800004076

INDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. DESCRIÇÃO DO FENÔMENO DE FLUIDIZAÇÃO.....	2
2.1. ETAPAS DO PROCESSO DE FLUIDIZAÇÃO.....	2
2.2. CURVAS DE QUEDA DE PRESSÃO EM LEITOS FLUIDIZADOS.....	3
3. FLUIDONÂMICA DE LEITOS FLUIDIZADOS.....	5
3.1. QUEDA DE PRESSÃO EM LEITO FIXO.....	5
3.2. VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO.....	7
3.3. QUALIDADE DE FLUIDIZAÇÃO.....	8
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	11
4.1. PROJETO E CONSTRUÇÃO DO LEITO FLUIDIZADO.....	11
4.1.1. CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO.....	11
4.1.2. MEMORIAL DE CÁLCULO.....	13
4.2. EQUIPAMENTOS.....	15
4.3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
4.3.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	16
4.3.2. DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA REAL.....	17
4.3.3. LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE FLUIDIZAÇÃO.....	17
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
6. CONCLUSÕES.....	27
7. SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....	28
ANEXO 1.: FATOR DE FORMA DE PARTÍCULAS	29
ANEXO 2.: DESENHOS.....	30
ANEXO 3.: MASSAS ESPECÍFICAS DO AR E DA ÁGUA	32
ANEXO 4.: VISCOSIDADE DO AR.....	33
ANEXO 5.: TABELAS DAS CURVAS DE FLUIDIZAÇÃO.....	34
ANEXO 6 : PROPOSTA PARA AULAS DE LABORATÓRIO.....	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

SIMBOLOGIA

A_t : área da secção transversal do leito (m^2)
 A_{or} : área da secção transversal do orifício (m^2)
 A_0, A_1, A_2, A_3 : coeficientes do polinômio interpolador
 C_d : coeficiente de orifício para cálculo do distribuidor
 d_{or} : diâmetro de orifício (m)
 $\overline{dp}$: diâmetro médio de partícula de uma distribuição granulométrica,
 $\overline{dp} = \sum (x/dp_i)^{-1} \cdot 1$ (m)
 D_t : diâmetro do leito (m)
 Fr : número de Froude, $Fr = u_{mf}^2 / (g \cdot dp)$ (adimensional)
 g : aceleração da gravidade, ($m \cdot s^{-2}$)
 G_o, G_f : vazão mássica superficial do fluido ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)
 L : altura do leito de sólidos, (m)
 L_{mf} : altura do leito na condição de mínima fluidização, (m)
 N_{or} : número de orifícios por unidade de área de distribuidor (m^{-2})
 Δp_r : queda de pressão no leito (Pa)
 Δp_d : queda de pressão no distribuidor (Pa)
 Q_l : vazão lida no manômetro ($l \cdot min^{-1}$)
 Q_r : vazão real do manômetro, obtida por aferição do rotâmetro ($l \cdot min^{-1}$)
 Re_p : número de Reynolds de partícula, $Re_p = (\rho_g \cdot dp \cdot u_o) / \mu_g$ (adimensional)
 u_o : velocidade superficial do fluido, ($m \cdot s^{-1}$)
 u_{or} : velocidade superficial de orifício ($m \cdot s^{-1}$)
 u_{mf} : velocidade superficial do fluido na condição de mínima fluidização, $m \cdot s^{-1}$
 W : peso das partículas do leito, (N)
 x : fração retida por faixa de granulometria (adimensional)

SÍMBOLOS GREGOS

ε : fração de vazios do leito, adimensional
 ε_{mf} : fração de vazios na condição de mínima fluidização, adimensional
 μ_g : viscosidade do fluido gasoso, ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)
 ϕ_s : fator de forma de partícula ou esfericidade (adimensional)
 ρ_g : massa específica do fluido gasoso ($kg \cdot m^{-3}$)
 ρ_s : massa específica do sólido particulado ($kg \cdot m^{-3}$)

LISTA DE FIGURAS

1	Esquema básico de um leito fluidizado	1
2	Etapas da operação de leitos fluidizados	3
3	Variação de Δp com u_o para um leito de areia com granulometria uniforme ⁽⁴⁾	3
4	Desvios do comportamento ideal da curva $\Delta p \times u_o$ ⁽¹⁾ a: Efeito do atrito entre partículas b: Efeito da presença de regiões não fluidizadas no leito	4
5	Efeito da forma das partículas na fração de vazios ⁽¹⁾ (partículas com tamanho uniforme, leito fixo)	6
6	Efeito do tamanho de partícula em ε_{mf} ⁽⁴⁾ . (a): areia, $\phi_s = 0.67$; (b): areia, $\phi_s = 0.86$; (c): areia, $\phi_s = 0.86$, vários diâmetros	7
7	Efeito da distribuição granulométrica na fração de vazios em leitos fixos ⁽⁴⁾	7
8	Diagrama simplificado para classificação de sólidos particulados quanto às suas características de fluidização (fluidização com ar, condições ambiente)	9
9	Coeficiente de orifício em função de Re_t ⁽⁴⁾	11
10	a: Detalhe do leito fluidizado b: Detalhe do leito e da montagem dos rotâmetros	12
11	Queda de pressão no distribuidor em função da vazão mássica de ar	15
12	Posição das tomadas de pressão no levantamento das curvas $\Delta p \times u_o$	18
13	Curva de distribuição granulométrica - areia	19
14	Variação da queda de pressão no leito com a vazão mássica de ar, para um leito de areia de 1.6 kg. (Ensaio 1). Tomada de pressão no topo do leito encoberta pelo nível de sólidos. No regime de leito fixo, vale a expressão $\Delta p = 13.5783 + 29433.G_o$ (Pa), com coef. de correlação de 0.9993	20

15	Variação da queda de pressão no leito com a vazão mássica de ar, para um leito de areia de 1.6 kg.(Ensaio 2). Tomada de pressão no topo do leito acima do nível de sólidos. No regime de leito fixo, vale a expressão $\Delta p = 92.9584 + 33233.G_o$ (Pa), com coef. de correlação de 0.9921	21
16	Variação da queda de pressão no leito com a vazão mássica de ar, para um leito de areia de 1.6 kg.(Ensaio 3). Tomada de pressão no topo do leito acima do nível de sólidos. No regime de leito fixo, vale a expressão $\Delta p = 96.5596 + 28242.G_o$ (Pa), com coef. de correlação de 0.9996	21
17	Variação da queda de pressão no leito com a vazão mássica de ar, para um leito de areia de 2.6 kg.(Ensaio 4). Tomada de pressão no topo do leito encoberta pelo nível de sólidos. No regime de leito fixo, vale a expressão $\Delta p = 240.57 + 44249.G_o$ (Pa), com coef. de correlação de 0.9989	22
18	Variação da queda de pressão no leito com a vazão mássica de ar, para um leito de areia de 2.6 kg.(Ensaio 5). Tomada de pressão no topo do leito encoberta pelo nível de sólidos. No regime de leito fixo, vale a expressão $\Delta p = 45.48 + 48388.G_o$ (Pa), com coef. de correlação de 0.9971	22
19	Variação da queda de pressão no leito com a vazão mássica de ar, para um leito de areia de 2.6 kg.(Ensaio 6). Tomada de pressão no topo do leito acima do nível de sólidos. No regime de leito fixo, vale a expressão $\Delta p = 124.97 + 52210.G_o$ (Pa), com coef. de correlação de 0.9995	23
20	Variação da queda de pressão no leito com a vazão mássica de ar, para um leito de areia de 2.6 kg.(Ensaio 7). Tomada de pressão no topo do leito acima do nível de sólidos. No regime de leito fixo, vale a expressão $\Delta p = 76.72 + 52788.G_o$ (Pa), com coef. de correlação de 0.9995	23
21	Material particulado (areia), $\overline{d_p} = 248 \mu m$	26

LISTA DE TABELAS

1	Classificação das aplicações dos leitos fluidizados em função dos mecanismos envolvidos no processo ⁽²⁾	2
2	Fator de forma para areia e sílica ⁽⁴⁾	6
3	Resumo dos grupos de sólidos segundo a classificação de Geldart e suas propriedades ⁽²⁾	10
4	Estimativa de u_{mf} para areia segundo dados de literatura (dados retirados da ref. 4)	13
5	Estimativa de Δp_{mf} para areia segundo dados de literatura (dados retirados da ref. 4)	14
6	Tabela de aferição de rotâmetros ⁽⁹⁾ (pressão de trabalho: 2 bar, 25°C)	15
7	Curva de aferição de rotâmetros	16
8	Curva de distribuição granulométrica da areia e diâmetro médio de partícula (d_p)	19
9	Densidade real da areia determinada em ensaio de picnometria	20
10	Valores de Δp_{mf} , G_{mf} obtidos graficamente para leitos com 1.6 e 2.6 kg de sólidos	24
11	Valores de u_{mf} , ε_{mf} , ϕ_s , Rep e Fr para fluidização de areia, $\overline{dp}=248\mu m$	25
12	Propriedades do ar e da água na temperatura dos ensaios	25
13	Valores médios das propriedades de fluidização da areia, $\overline{dp}=248\mu m$	25

1. INTRODUÇÃO

Um leito fluidizado forma-se, em determinadas condições, pela passagem de um fluido líquido ou gasoso através de um leito de partículas sólidas (fig.1). Aumentando-se a vazão G_0 , atinge-se uma condição onde as partículas são sustentadas pelo fluido ascendente, isto é, a condição de *leito fluidizado*.

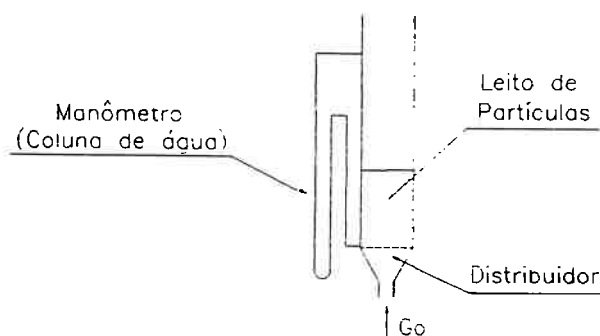


Figura 1: Esquema básico de um leito fluidizado

Este sistema sólido-fluido comporta-se como um líquido com a densidade aparente do leito, apresentando propriedades importantes para aplicações em engenharia.

Em um leito fluidizado, há uma rápida transferência de calor e de massa entre as partículas sólidas e o fluido⁽¹⁾. Normalmente, ocorre intensa agitação dos sólidos e o coeficiente de transferência de calor na interface entre o leito e uma superfície nele imersa é bastante elevada. Deste modo, os leitos fluidizados são utilizados tanto em trocadores de calor como em reatores químicos, onde o controle de temperatura é importante e grandes quantidades de calor devem ser retiradas do sistema ou fornecidas ao mesmo. Além disso, devido ao comportamento líquido dos leitos fluidizados, sólidos particulados podem ser transportados através de tubulações, permitindo a operação contínua dos processos.

Os setores químico e petroquímico são os que mais utilizam a tecnologia dos leitos fluidizados, principalmente em reatores de craqueamento de petróleo. Em metalurgia, os leitos podem ser empregados na ustulação de sulfetos de zinco e níquel, no tratamento térmico de metais. Nos últimos anos, no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP, foram realizados estudos de transferência de calor entre leitos fluidizados e peças imersas para tratamento térmico de aços.

A tabela 1 apresenta as principais aplicações dos leitos fluidizados em processos industriais.

Processos Industriais				
	Físicos		Químicos	
Mecanismo Predominante	Transferência de calor e massa partícula/partícula e partícula/superfícies	Transferência de calor leito/superfícies	Reações entre gases com catalisador sólido	Reações sólido/gás com transformação do sólido
Aplicações	- Revestimento plástico de superfícies - Análise granulométrica - Recobrimento de comprimidos farmacêuticos - Mistura de sólidos	- Tratamento térmico de fibras têxteis, borrachas, vidros, metais. - Banhos de temperatura constante	- Craqueamento, reforma. - Produção de acrilonitrila, polietileno, hidrocarbonetos	- Ustulação de sulfetos de zinco e níquel. - Produção de tetracloreto de titânio

Tabela 1: Classificação das aplicações dos leitos fluidizados em função dos mecanismos envolvidos no processo⁽²⁾

O presente trabalho tem como objetivos principais a construção de um leito fluidizado transparente e o levantamento de dados fluidodinâmicos de sólidos particulados. O equipamento poderá ser utilizado em aulas demonstrativas, bem como em estudos posteriores de transferência de calor, segundo a linha de pesquisa em curso no Departamento de Engenharia Metaúrgica da EPUSP.

2. DESCRIÇÃO DO FENÔMENO DE FLUIDIZAÇÃO

2.1. ETAPAS DO PROCESSO DE FLUIDIZAÇÃO

Aumentando-se a vazão do fluido que passa através de um leito inicialmente em repouso, observa-se uma sucessão de fenômenos como esquematizado na fig.2. Para uma pequena vazão G_1 (fig.2.a), verifica-se uma queda de pressão Δp_1 indicada no manômetro. Não há agitação das partículas e o leito é dito *leito fixo*. Aumentando gradativamente a vazão, Δp aumenta até ocorrer o equilíbrio entre o peso das partículas e a força de arraste do fluido ascendente. As partículas se reorganizam, minimizando a resistência à passagem do fluido, com uma ligeira expansão do leito (fig.2.b). O leito atingiu a condição de *leito fluidizado*. Um novo aumento da vazão provoca a expansão do leito, com um aumento da fração de vazios (ϵ). Esta expansão mantém a queda de pressão constante, apesar do aumento da vazão (fig.2.c). A agitação das partículas aumenta, num padrão semelhante à convecção, com ascensão na região central e movimento descendente junto às paredes.

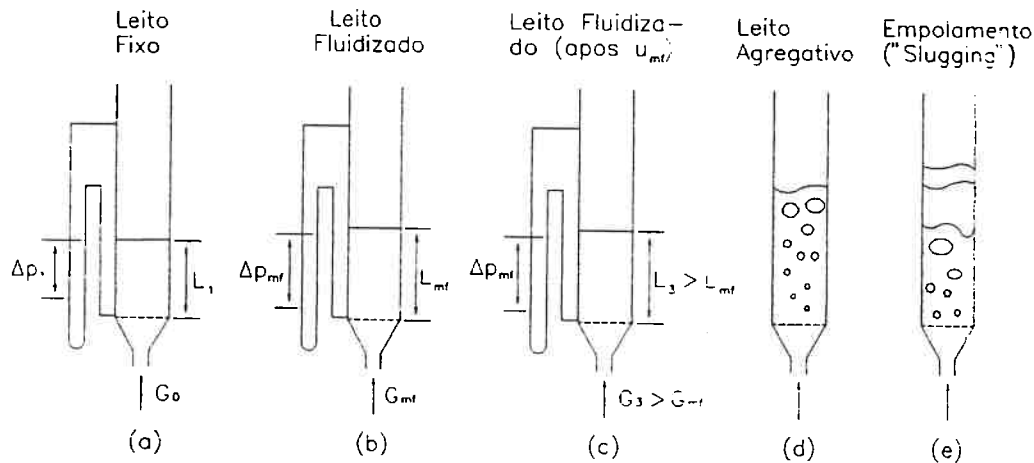


Figura 2: Etapas da operação de leitos fluidizados^(3,4)

Em leitos com fluidos gasosos, há a formação de bolhas após o início da fluidização, constituindo o chamado *leito agregativo* (fig. 2.c). Leitos fluidizados com líquidos normalmente não apresentam borbulhamento e o regime de fluidização é do tipo *particulado*.

Quando a vazão é alta, parte do fluido atravessa o leito na forma de bolhas que coalescem à medida que sobem, podendo ocupar todo o diâmetro do leito. Este fenômeno denomina-se *empolamento* ("slugging") e seus efeitos consistem em grande variação na altura do leito e instabilidade na queda de pressão (fig.2.d). Um outro fenômeno que afeta a qualidade de fluidização é a *canalização* ("channeling"), onde o fluido atravessa o leito através de canais formados no leito de partículas.

2.2. CURVAS DE QUEDA DE PRESSÃO EM LEITOS FLUIDIZADOS

O processo de fluidização pode ser resumido através de um diagrama típico de queda de pressão (Δp) em função da velocidade superficial do fluido (u_o) ou da vazão mássica (G_o), como mostra a fig.3.

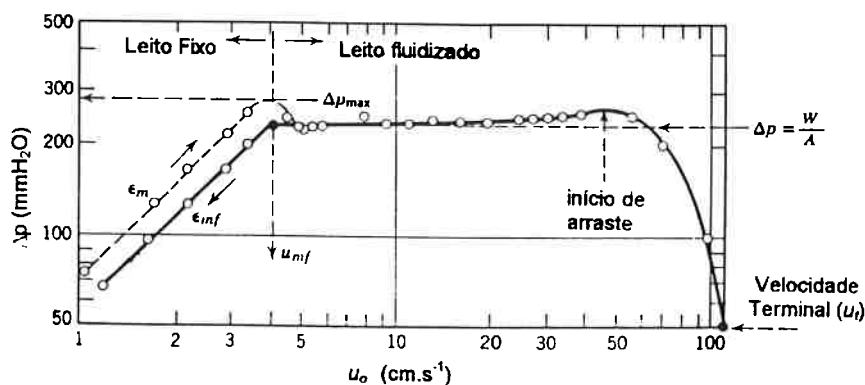


Figura 3: Variação de Δp com u_o para um leito de areia com granulometria uniforme⁽⁴⁾

No regime de leito fixo, Δp aumenta linearmente com a vazão. A partir da condição de mínima fluidização, mantém-se aproximadamente constante. Em vazões muito elevadas, há o arraste de partículas para fora do leito e Δp diminui.

A queda de pressão no leito fixo apresenta um comportamento de histerese para vazões crescentes e decrescentes do fluido. Embora a linearidade e o paralelismo da curva sejam iguais, Δp é menor para vazões decrescentes, pois, na ausência de vibração, a fração de vazios do leito mantém-se praticamente constante e igual ao valor de ε_{mf} , apesar do decréscimo da vazão^(3,4).

Em curvas experimentais de queda de pressão, a transição do leito fixo para o leito fluidizado não ocorre repentinamente (fig. 4.a,b), podendo apresentar um ressalto (fig.4.a) ou um arredondamento (fig.4.b).

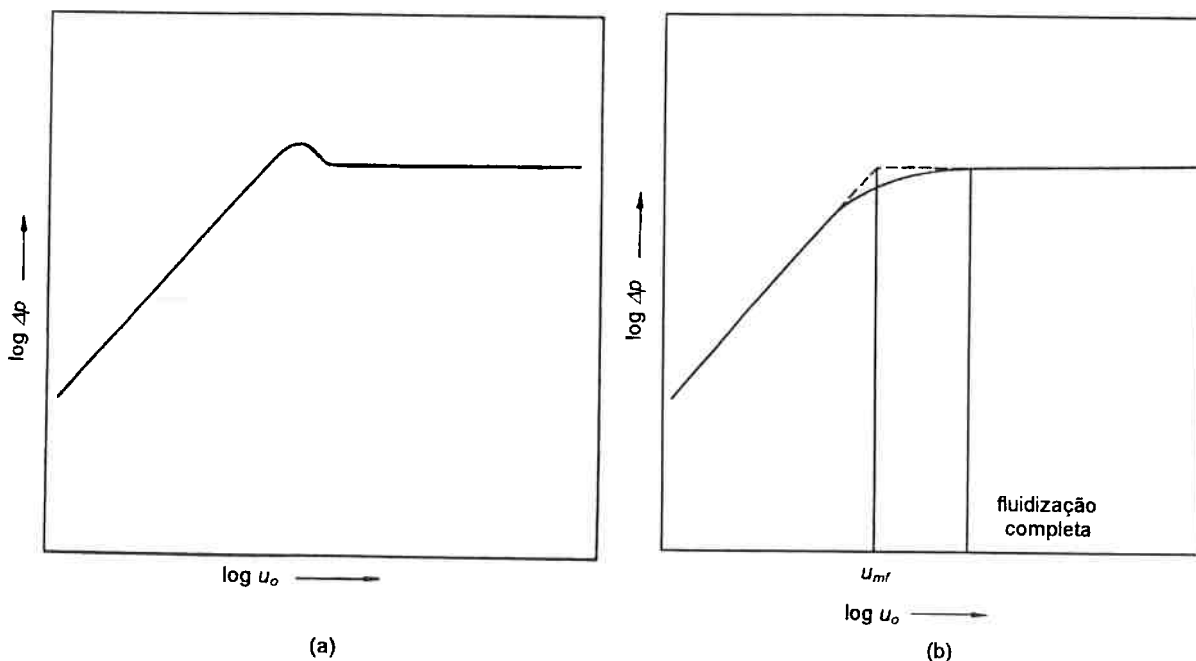


Figura 4: Desvios do comportamento ideal da curva $\Delta p \times u_o$ ⁽¹⁾

a: Efeito do atrito entre partículas

b: Efeito da presença de regiões não fluidizadas no leito

O comportamento da fig.4.a ocorre quando o atrito entre as partículas é elevado. Principalmente em leitos de pequeno diâmetro, o atrito entre as paredes e o leito é significativo, e as partículas são comprimidas umas às outras. Assim, a queda de pressão necessária para ocorrer fluidização é maior que o valor teórico, e a curva apresenta uma “corcova” na transição de leito fixo para fluidizado.

Quando os sólidos apresentam uma distribuição granulométrica larga, a transição do leito fixo para leito fluidizado tende ocorrer numa extensa faixa de vazões. Nesta situação, coexistem regiões fluidizadas e não fluidizadas, e a curva de queda de pressão apresenta um aspecto arredondado (fig.4.b).

3.FLUIDONÂMICA DE LEITOS FLUIDIZADOS

3.1. QUEDA DE PRESSÃO EM LEITO FIXO

A literatura apresenta várias expressões para a queda de pressão em leitos fixos, cada uma delas formuladas a partir de hipóteses diferenciadas^(5,6). Algumas delas são válidas apenas para vazões baixas, outras somente para vazões elevadas. O aspecto importante relativo à alta ou baixa vazão do fluido é o regime de escoamento, caracterizado pelo número adimensional de Reynolds. No estudo de leitos fluidizados, define-se o número de Reynolds de partícula (R_{ep}):

$$R_{ep} = \frac{\rho_g \cdot d_p \cdot u_o}{\mu_g} \dots\dots\dots (1)$$

Números de Reynolds baixos (<20) caracterizam regimes de *escoamento laminar* e R_{ep} elevados (>1000), *escoamento turbulento*. A faixa entre 20 e 1000 corresponde à transição entre os dois regimes^(2,4,7). Em regime laminar, a queda de pressão em leitos fixos deve-se principalmente às perdas viscosas. Estas perdas estão associadas ao atrito entre o fluido gasoso e a superfície das partículas. Em regime turbulento, predominam as perdas de energia cinética.

As limitações das expressões para Δp limitadas a certas faixas de R_{ep} está no fato de que a queda de pressão é causada simultaneamente pelas perdas viscosas e cinéticas, num efeito aditivo⁽⁵⁾. Esta consideração é importante na extensa faixa de R_{ep} onde há transição entre os regimes laminar e turbulento. Assim, a expressão mais aceita para prever a queda de pressão em leitos fixos é a equação de Ergun⁽⁵⁾, que considera o efeito das duas parcelas (perdas viscosas e cinéticas), sendo aplicável tanto regime laminar como em regime turbulento:

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \cdot \frac{(1-\epsilon)^2}{(\epsilon)^3} \cdot \frac{\mu_g \cdot u_o}{(\phi_s \bar{d}_p)^2} + 1,75 \cdot \frac{(1-\epsilon)}{(\epsilon)^3} \cdot \frac{\rho_g \cdot u_o^2}{\phi_s \bar{d}_p} \dots\dots\dots (2)$$

(perdas viscosas) (perdas cinéticas)

Na eq.2 aparece o produto $\phi_s \bar{d}_p$ que representa a dimensão característica da partícula. Nos cálculos de queda de pressão, a dimensão característica da partícula é definida em termos da superfície específica do sólido particulado (vide anexo 1). O diâmetro médio das partículas $\bar{d}_p$ é o diâmetro da esfera que possui a superfície específica do sólido particulado⁽⁴⁾. O cálculo de $\bar{d}_p$ para uma dada distribuição granulométrica encontra-se no item 4.3.1. A esfericidade ou fator de forma (ϕ_s) é a razão entre as áreas superficiais da esfera e da partícula, ambas com mesmo volume. O fator de forma é um número absoluto cujo valor varia entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 1, mais esférica é a partícula⁽⁵⁾. O produto $\phi_s \bar{d}_p$ é o parâmetro mais utilizado para caracterizar a dimensão de partículas em termos de seu tamanho e sua forma.

A tabela 2 apresenta alguns valores para o fator de forma para areia e sílica, obtidos por diferentes autores⁽⁴⁾:

Autor	Material	ϕ_s
Leva et al	areia	0.600, 0.861
Shirai	areia	0.534 - 0.628
	silica	0.554 - 0.628

Tabela 2: Fator de forma para areia e sílica⁽⁴⁾

A fração de vazios (ε) de uma mistura de sólidos com vários tamanhos de partícula não pode ser estimada precisamente. Vários fatores influem no valor de ε , como a forma e o tamanho de partícula, a distribuição granulométrica, o modo com que os sólidos são introduzidos no leito^(3,4).

A fig. 5 apresenta o efeito da forma das partículas em ε . Quanto mais esféricas as partículas, maior a compactação do leito e menor a fração de vazios.

Na fig.6, pode-se observar o efeito do tamanho de partícula em ε_{mf} . Quanto maior o diâmetro de partícula, para um mesmo fator de forma, menor ε_{mf} .

Se a distribuição granulométrica é larga, há tendência de concentração dos finos entre as partículas maiores, diminuindo a fração de vazios (fig. 7). Além disso, a fração de vazios depende de como o leito é carregado. Se os sólidos tocam as paredes durante o carregamento, mais denso será o leito, com menor ε ⁽³⁾.

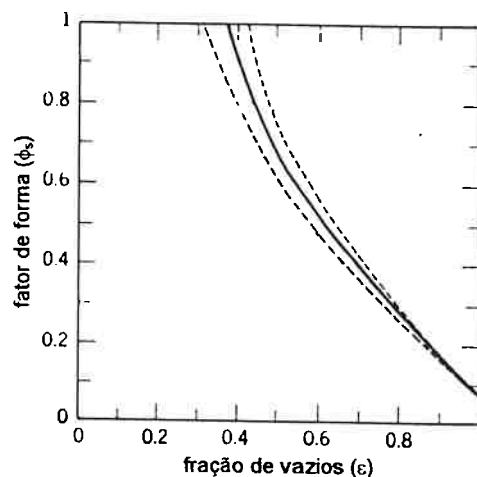


Figura 5: Efeito da forma das partículas na fração de vazios⁽⁷⁾
(partículas com tamanho uniforme, leito fixo)

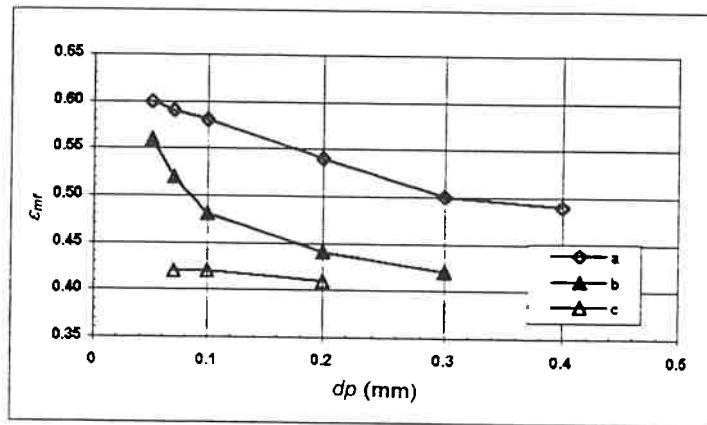


Figura 6: Efeito do tamanho de partícula em $\epsilon_{mf}^{(4)}$. (a): areia, $\phi_s = 0.67$; (b): areia, $\phi_s = 0.86$; (c): areia, $\phi_s = 0.86$. vários diâmetros

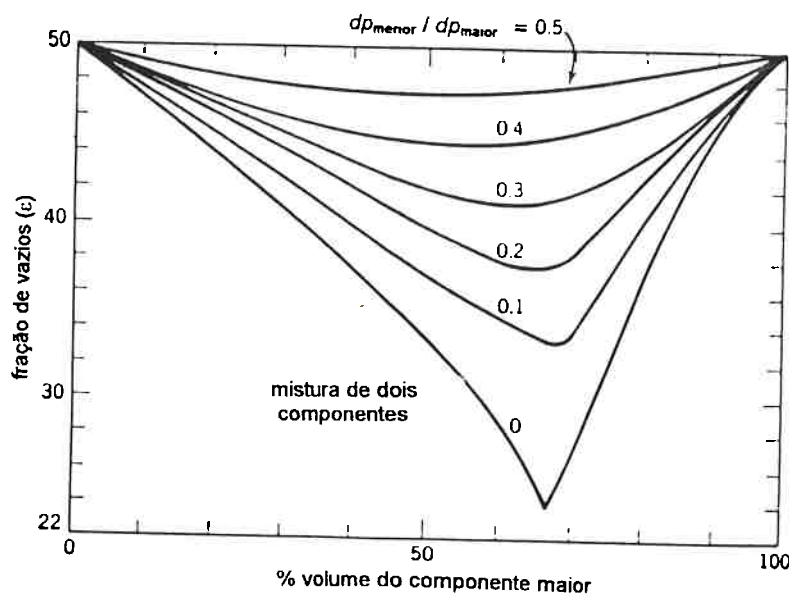


Figura 7: Efeito da distribuição granulométrica na fração de vazios em leito fixo⁽⁴⁾

3.2. VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO

O início da fluidização ocorre quando a força de arraste exercida pelo fluido iguala-se ao peso das partículas do leito:

$$\Delta p_{mf} \cdot A_t = W = (A_t \cdot L_{mf}) \cdot (1 - \epsilon_{mf}) \cdot [(\rho_s - \rho_g) \cdot g] \quad (3)$$

$$W = A_t \cdot L_{mf} \cdot (1 - \epsilon_{mf}) \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g \quad (4)$$

ou ainda:

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g).g \quad (5)$$

A fração de vazios na condição de mínima fluidização pode ser determinada experimentalmente através das eqs 4 ou 5.

Extrapolando-se a validade da equação de Ergun (eq.2) para a condição de mínima fluidização e igualando à eq. 5, obtém-se a expressão para a velocidade de mínima fluidização:

$$\frac{1,75}{\phi_s \cdot \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{\bar{d}_p \cdot u_{mf} \cdot \rho_g}{\mu_g} \right)^2 + \left(\frac{150 \cdot (1 - \varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 \cdot \varepsilon_{mf}^3} \right) \left(\frac{\bar{d}_p \cdot u_{mf} \cdot \rho_g}{\mu_g} \right) = \frac{\bar{d}_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g}{\mu_g^2} \quad (6)$$

Quando ϕ_s e ε_{mf} são desconhecidos, pode-se utilizar a equação simplificada proposta por Wen e Yu⁽⁸⁾:

$$\frac{\bar{d}_p \cdot u_{mf} \cdot \rho_g}{\mu_g} = \left[(33.7)^2 + 0,0408 \cdot \frac{\bar{d}_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g}{\mu_g^2} \right]^{1/2} - 33.7 \quad (7)$$

Esta equação baseia-se na constatação feita pelos autores em vários sistemas que:

$$\frac{1}{\phi_s \cdot \varepsilon_{mf}^3} \cong 14 \quad e \quad \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\phi_s^2 \cdot \varepsilon_{mf}^3} \cong 11 \quad (8)$$

Em trabalhos anteriores⁽⁴⁾ foram obtidos valores de u_{mf} para esta expressão, com desvio padrão de 34% para R_{ep} variando entre 0.001 a 4000.

3.3. QUALIDADE DE FLUIDIZAÇÃO

A qualidade de fluidização normalmente está associada à formação de bolhas no leito. Em geral, leitos fluidizados com líquidos apresentam comportamento particulado e leitos fluidizados com gases são do tipo agregativo. Wilhelm e Kwauk⁽⁹⁾ estabeleceram um critério para distinguir os regimes particulado e agregativo de leitos fluidizados. Os autores associaram a qualidade de fluidização através do número adimensional de Froude (Fr), definido como:

$$Fr = \frac{u_{mf}^2}{g \cdot d_p} \quad (9)$$

$Fr < 0.13$: leito particulado

$Fr > 1.1$: leito agregativo

As características de fluidização são consideravelmente influenciadas pelas propriedades do sólido particulado, como o tamanho de partícula e densidade. O diagrama de Geldart⁽²⁾ classifica os materiais particulados em grupos comportamentos característicos quanto à fluidização (fig.8). Estes grupos são classificados em ordem crescente de tamanho de partícula e densidade.

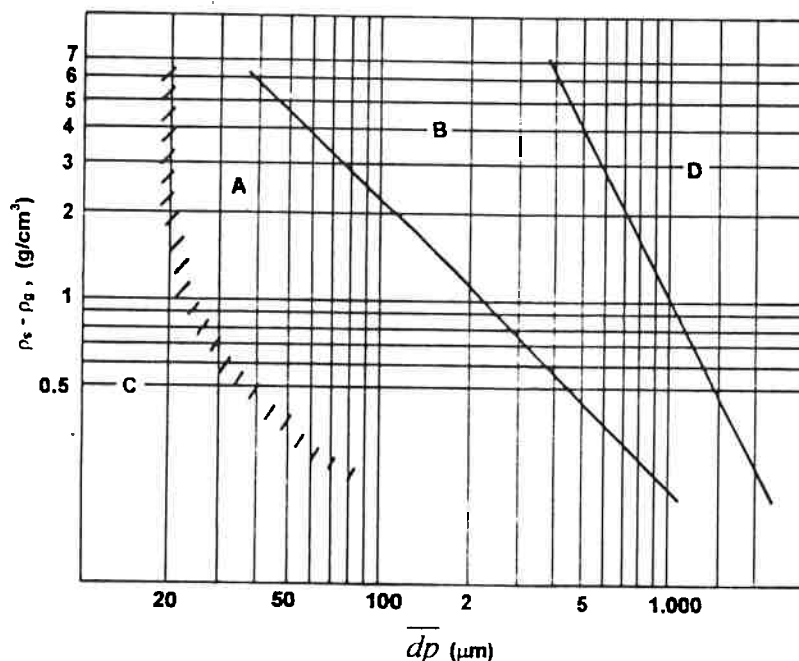


Figura 8: Diagrama simplificado para classificação de sólidos particulados quanto às suas características de fluidização (fluidização com ar, condições ambiente)

GRUPO C: Materiais com *elevada coesividade e fluidização difícil*, devido à *intensa canalização* ao longo de toda a altura do leito. As forças de coesão entre as partículas são maiores que as de arraste do gás, devido a fatores como tamanho de partícula, cargas eletrostáticas, formas irregulares, baixa densidade. A queda de pressão é menor que o valor teórico, podendo chegar a 50%. A *velocidade de mistura e de transferência de calor são baixas*. Exemplos destes materiais são farinha, cimento.

GRUPO A: Estes tipos de sólido são amplamente utilizados como catalisadores de craqueamento de petróleo. O *leito mantém-se particulado numa faixa de vazões restrita* após a condição de mínima fluidização. A *velocidade de mistura dos sólidos é alta*. As bolhas crescem e explodem frequentemente, havendo um limite máximo para o tamanho das mesmas.

GRUPO B: A areia é o material mais representativo desta classe. As forças entre partículas são desprezíveis e o *borbulhamento ocorre logo após u_{mf}* . O leito assenta rapidamente após a interrupção da vazão do gás. O tamanho de bolha aumenta para alturas do leito e velocidades crescentes, *não há um limite para o tamanho máximo de bolha*. A velocidade de mistura de sólidos é moderada.

GRUPO D : Fazem parte desta classe sólidos densos e/ou com granulometria grosseira. A velocidade de mistura dos sólidos é baixa. O regime de fluidização pode ser turbulento ($Fr > 1$).

A tabela 3 apresenta um resumo dos grupos de sólidos e suas principais características:

Grupo	C	A	B	D
Característica principal	Alta coesividade, fluidização difícil	Apresenta regime particulado numa faixa de vazões restrita	Há formação de bolhas logo após u_{mf}	Sólidos grosseiros
Sólidos típicos	Farinha, cimento	Catalisador de craqueamento de petróleo	Areia de construção	Calcáreo moído, grãos de café
Propriedades				
Expansão do leito	Baixa na presença de canalização	Alta	Moderada	Baixa
Velocidade de assentamento do leito após interrupção da vazão	Inicialmente alta, com decaimento exponencial	Baixa, linear	Alta	Alta
Formação de bolhas e características gerais	Não há (devido à canalização)	Existe um limite máximo para o tamanho de bolhas	Não há limite para o tamanho de bolhas	Não se conhece limite para o tamanho de bolhas
Mistura de sólidos	Muito baixa	Alta	Moderada	Baixa

Tabela 3: Resumo dos grupos de sólidos segundo a classificação de Geldart e suas propriedades⁽²⁾

O tipo de distribuidor tem grande influência na qualidade de fluidização de leitos agregativos⁽⁴⁾. Distribuidores com número reduzido de orifícios intensificam o empoamento, provocando grande variação da altura do leito (e da densidade), principalmente em altas vazões. Além disso, os orifícios facilitam a ocorrência de canalização do leito. Quanto maior o número de orifícios, mais uniforme a densidade do leito, menores são as bolhas e melhor o contato sólido-gás. Em geral, a queda de pressão no distribuidor deve ser suficiente para garantir uma vazão uniforme através dos orifícios. Agarwal et al^(2,4) sugere que a queda de pressão no distribuidor (Δp_d) deve ser em torno de 10% da queda de pressão no leito (Δp) ou 35 cm H₂O, o que for maior. Qureshi e Creasy⁽²⁾ sugerem a seguinte relação para $\Delta p_d / \Delta p$:

$$\frac{\Delta p_d}{\Delta p} = 0.01 + 0.2 \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-Dt}{2.L}\right) \right] \quad (10)$$

Como Δp é determinado pelo peso de sólidos por unidade de área do leito, a escolha de um valor apropriado para a relação $\Delta p_d / \Delta p$ fixa o valor de Δp_d necessário. Com Δp_d , pode-se calcular a velocidade do fluido através do orifício (u_{or}) através da eq.11, formulada a partir da equação de Bernoulli:

$$u_{or} = C_d \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta p_d}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (11)$$

Onde C_d é um coeficiente que depende da forma dos orifícios e pode ser obtido através da fig.9:

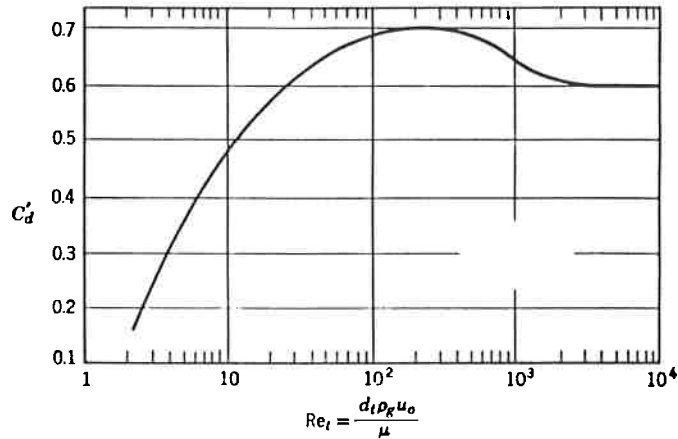


Figura 9: Coeficiente de orifício em função de Re_t ⁽⁴⁾

Finalmente, calcula-se o diâmetro de orifício do distribuidor pela eq.12:

$$\frac{u_o}{u_{or}} = A_{or} \cdot N_{or} = \frac{\pi \cdot d_{or}^2}{4} \cdot N_{or} \quad (12)$$

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. PROJETO E CONSTRUÇÃO DO LEITO FLUIDIZADO

4.1.1. CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO

Foi projetado e construído um leito vertical circular para fluidização a ar, com diâmetro útil (D_t) de 90 mm e 700 mm de altura (fig. 10.a). O equipamento consiste basicamente de um leito e um manômetro (coluna de água) para medição de queda de pressão. A figura 10.b apresenta o leito ligado em série com conjunto dos rotâmetros, cuja função é controlar a vazão no leito. O tubo do leito é feito de acrílico transparente, apresentando uma escala milimetrada com origem no nível do distribuidor. O prumo do tubo em relação ao solo pode ser ajustado através do deslocamento dos dois pontos de apoio, um deles situado na região do distribuidor e outro no topo. A posição do leito pode ser ajustada na direção vertical e em dois planos verticais perpendiculares entre si. A estrutura é basculante, para facilitar o carregamento, descarregamento e a fixação do distribuidor.

O tubo do leito é dividido em duas partes: uma superior ao distribuidor e outra inferior ao mesmo. O distribuidor é preso entre duas flanges de PVC comprimidas entre si através de uma conexão roscada. A vedação é feita com anéis *o'ring* de borracha. Os detalhes e as dimensões do leito podem ser vistos no desenho 1 do anexo 2.

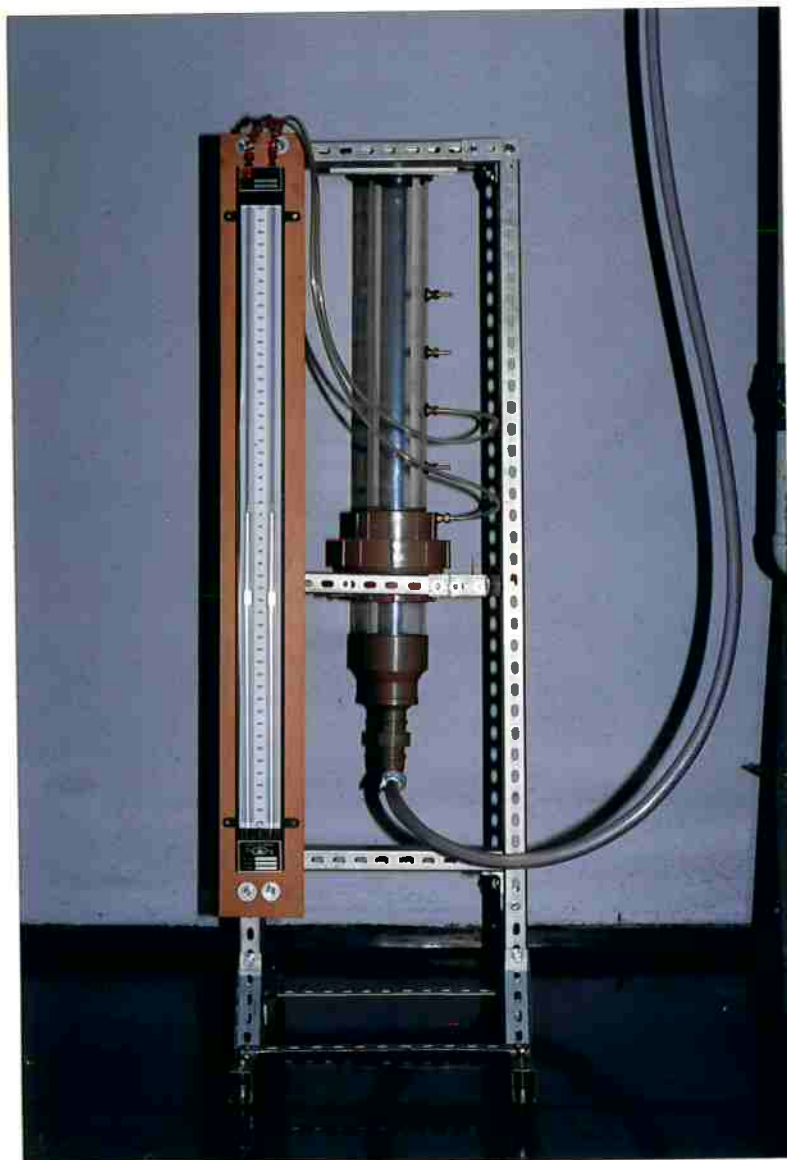


Figura 10 a: Detalhe do leito fluidizado

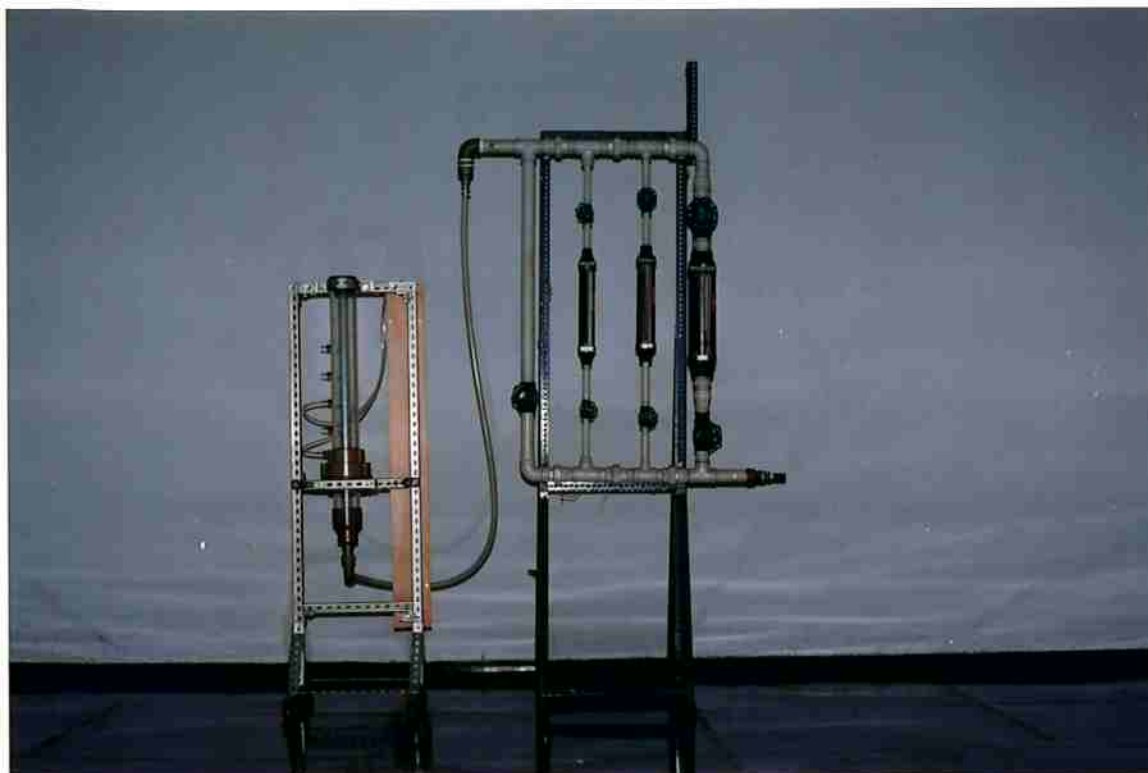


Figura 10.b: Detalhe do leito e da montagem dos rotômetros

4.1.2. MEMORIAL DE CÁLCULO

Um dos objetivos do trabalho consiste em levantar as curvas de queda de pressão no leito em função da vazão do fluido. Portanto, os rotômetros devem ser capazes de medir as vazões correspondentes à condição de mínima fluidização do leito. A estimativa da vazão necessária depende da escolha de um sólido particulado e do cálculo da velocidade de mínima fluidização (u_{mf}). O material adotado foi a areia, sólido do grupo B da classificação de Geldart, devido à maior disponibilidade de dados de literatura (vide ref. 4).

A tabela 4 apresenta dados de literatura da areia e os valores calculados de u_{mf} através da equação de Ergun (eq.6, item 3.2). Os dados do fluido (ar), como densidade, viscosidade encontram-se nos anexos 3 e 4. Verifica-se através da tabela 4 que os rotômetros devem medir pelo menos vazões da ordem de 20 l/min.

d_p (m)	ϕ_s	ε_{mf}	u_{mf} (m.s ⁻¹)	Q (l.min ⁻¹)
200×10^{-6}	0.67	0.54	0.059	22.5
200×10^{-6}	0.86	0.44	0.043	16.5

Tabela 4: Estimativa de u_{mf} para areia segundo dados de literatura (dados retirados da ref. 4)

A altura do manômetro (coluna de água) deve ser suficiente para medir a queda de pressão no leito na condição de mínima fluidização (Δp_{mf}). Esta queda de pressão foi estimada pela eq.5 (item 3.2), com a adoção de valores de L_{mf} de 0.2 e 0.3m, conforme tabela 5. A massa específica da água encontra-se disponível no anexo 3. Através dos valores obtidos, conclui-se que a altura da coluna de água deve ser de pelo menos 300mm.

L_{mf} (m)	ε_{mf}	Δp_{mf} (Pa)	Δp_{mf} (mmH ₂ O)
0.2	0.67	1715	176
0.3	0.67	2573	263
0.2	0.86	728	74
0.3	0.86	1091	111

Tabela 5: Estimativa de Δp_{mf} para areia segundo dados de literatura (dados retirados da ref. 4)

O distribuidor foi dimensionado conforme a teoria do item 3.3., para os seguintes dados:

$$Dt : 0.9m$$

$$\rho_s : 2650 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\rho_g, \mu_g : \text{vide anexos 3 e 4}$$

$$\Delta p_{mf} : 1500 \text{ Pa ou } 154 \text{ mmH}_2\text{O em média (Tabela 5, item 4.1.2)}$$

$$L_{mf} : 0.2 - 0.3m = 0.25 \text{ em média (Tabela 5, item 4.1.2)}$$

$$u_{mf} : 0.05 \text{ m.s}^{-1} \text{ em média (Tabela 4, item 4.1.2)}$$

Escolha de Δp_d :

$$\text{Agarwal: } \Delta p_d = 0.1 \times \Delta p = 150 \text{ Pa}$$

$$\text{Quresni e Creasy: } \Delta p_d / \Delta p = 0.1 + 0.2 \{ 1 - \exp[-0.9 / (2 \times 0.25)] \} = 0.177$$

$$\Delta p_d = 265 \text{ Pa}$$

$$Re_t = (0.9 \times 1018 \times 0.05) / 1.78 \times 10^{-5} = 2983$$

$$C_d = 0.6 \text{ (fig.9, item 3.3)}$$

$$u_{or} = 0.6 \times [(2 \times 265) / 1.18]^{1/2} = 12.72 \text{ m.s}^{-1} \text{ (eq.11, item 3.3)}$$

$$N_{or} = (4 \times u_o) / (\pi \times d_{or}^2 \times u_{or}) = 0.005 / d_{or}^2 \text{ (eq.12, item 3.3)}$$

$$\text{Para } d_{or} = 0.5 \text{ mm} = 0.0005 \text{ m, } N_{or} = 20000 \text{ orifícios.m}^{-2}$$

$$At = 6.36 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$N_{or} \cong 127$$

Foi decidido construir o distribuidor com dois discos de PVC de 150 mm de diâmetro e 5 mm de espessura, intercalados com uma folha de papel de filtro, para evitar a passagem de partículas através dos orifícios.

A quantidade de furos foi aumentada de 127 (valor projetado) para 220, visando compensar a diminuição de área livre em função da presença do papel de filtro. Os furos têm 0.5 mm de diâmetro e a disposição dos mesmos no distribuidor pode ser vista no desenho 2 do anexo 2. A figura 11 apresenta a curva de queda de pressão no distribuidor em função da vazão mássica de ar.

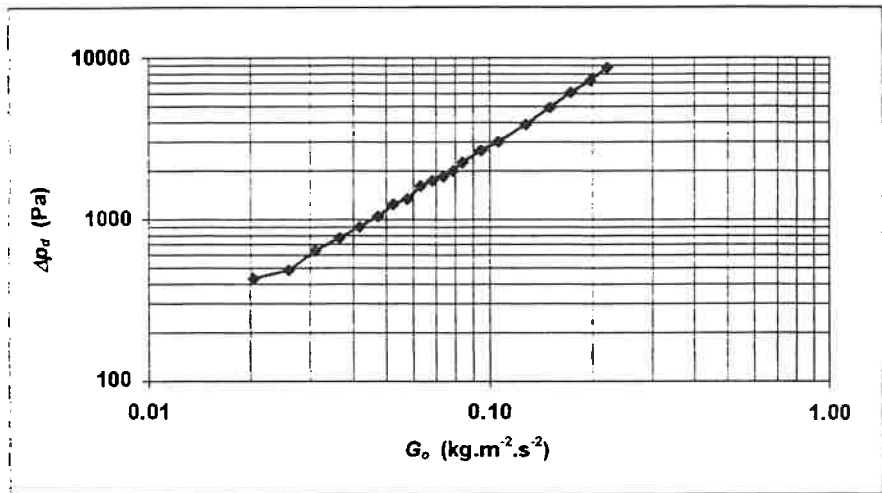


Figura 11: Queda de pressão no distribuidor em função da vazão mássica de ar

4.2. EQUIPAMENTOS

As características gerais do leito fluidizado encontram-se no item 4.1. e os detalhes construtivos no anexo 2.

O controle de vazão foi feito através da montagem de três rotâmetros em paralelo, como mostra a fig.10 b (vide item 4.1). Este conjunto foi o mesmo construído em trabalho anterior ⁽⁹⁾, sendo composto de três rotâmetros, cada um deles correspondendo a uma determinada faixa de vazões. A tabela 6 apresenta as especificações dos rotâmetros e os dados de aferição dos mesmos.

Rotâmetro R1		Rotâmetro R2		Rotâmetro R3	
600 - 6000 l.min ⁻¹		70 - 700 l.min ⁻¹		8 - 80 l.min ⁻¹	
(menor divisão = 100 l.min ⁻¹)		(menor divisão = 10 l.min ⁻¹)		(menor divisão = 1 l.min ⁻¹)	
Valor lido (l.min ⁻¹)	Valor real (kg.h ⁻¹)	Valor lido (l.min ⁻¹)	Valor real (kg.h ⁻¹)	Valor lido (l.min ⁻¹)	Valor real (kg.h ⁻¹)
600	44.99	70	4.13	16	0.95
1200	62.24	210	12.38	24	1.44
1800	99.07	350	21.76	32	1.98
2400	136.1	490	28.92	40	2.42
3000	175.0	630	37.64	48	2.86
		700	41.48	56	3.4
				64	3.97
				72	4.52
				80	5.03

Tabela 6: Tabela de aferição de rotâmetros ⁽⁹⁾
(pressão de trabalho: 2 bar, 25°C)

No presente trabalho foram utilizados os rotâmetros R2 e R3. A tabela 7 apresenta as curvas de aferição dos rotâmetros. As curvas foram obtidas através de aproximação por um polinômio de 3º grau.

Rotâmetro	Vazão mássica real : $Gr = A_0 + A_1.GI + A_2.GI^2 + A_3.GI^3$ (kg.h ⁻¹)			
	A_0	A_1	A_2	A_3
R1	-0.03405	0.06359	-0.00011	1.43×10^{-6}
R2	-0.47064	0.06523	-0.000012	-6.47×10^{-9}

Tabela 7: Curva de aferição de rotâmetros

A alimentação do sistema leito + rotâmetros foi feita através de um compressor de marca Atlas Copco de pistão, modelo NT7, motor de 11kw.

A queda de pressão no leito foi medida por meio de um manômetro tipo coluna em "U" de marca Salvi Casagrande, com altura de 1000 mm e escala 500-0-500 mm.

4.3. MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental deste trabalho consiste das seguintes atividades:

- Caracterização do sólido particulado:
 - Determinação do diâmetro médio de partícula ($\overline{d_p}$) a partir da distribuição granulométrica;
 - Determinação da massa específica real (ρ_s);
- Levantamento das curvas de fluidização ($\Delta p \times u_o$) para um dado leito de partículas;

De posse dos dados de u_{mf} , ρ_s , $\overline{d_p}$ será estimado o valor do fator de forma de partícula (ϕ_s) através da equação de Ergun (eq. 6, item 3.2). O sólido adotado foi a areia, material do grupo B da classificação de Geldart.

4.3.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica do material foi realizada segundo a norma ASTM B 214 - 76⁽¹¹⁾. As amostras de areia foram coletadas da caixa de armazenamento introduzindo-se um tubo de PVC perfurado em várias alturas e com uma das extremidades vedada. Este procedimento teve como objetivo coletar amostras com distribuição granulométrica homogênea, visto que sólidos particulados tendem sofrer segregação em recipientes de estocagem.

Há várias definições para o diâmetro médio de partículas de uma distribuição granulométrica. Nos cálculos de queda de pressão em leitos, entretanto, a definição mais adequada é aquela calculada a partir da superfície específica do sólido particulado⁽⁴⁾, onde o diâmetro médio é o diâmetro da esfera com a mesma superfície específica da partícula. Segundo esta definição, o diâmetro médio ($\overline{d_p}$) de uma distribuição pode ser calculado pela equação 13:

$$\overline{d_p} = \frac{1}{\sum_i (x_i d_{pi})} \quad (13)$$

Onde x_i é a fração retida (em massa) no intervalo de granulometria cujo diâmetro médio é d_{pi} . A eq. 13 não é aconselhável se o material apresenta uma distribuição extremamente larga ou com picos secundários (bimodal, trimodal). Estes materiais não se comportam de maneira homogênea e não podem ser caracterizados por um único número⁽²⁾.

4.3.2. DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA REAL

A massa específica real do sólido (ρ_s) foi determinada através de picnometria. Este método consiste basicamente no uso de um recipiente de vidro (picnômetro) para medir o volume de líquido deslocado (água, por exemplo) por uma massa conhecida do sólido particulado. Conhecendo-se então a massa de sólidos e o volume correspondente, calcula-se a massa específica real do mesmo. O procedimento experimental seguiu as orientações da norma ABNT NBR 6221⁽¹²⁾. As pesagens nos ensaios de picnometria foram realizadas em balança semi-analítica (duas casas decimais). Utilizou-se um picnômetro de 50 ml.

4.3.3. LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE FLUIDIZAÇÃO

Na preparação do leito para os ensaios, foi necessário verificar a presença de vazamentos. A instalação correta do distribuidor é importante, pois neste local há o risco de má vedação, apesar dos anéis de vedação (*o'ring*). O distribuidor e seus anéis de vedação devem ser colocados entre as flanges com o leito na posição vertical e fazendo-se o aperto manual da conexão roscada para uma primeira fixação. A seguir, o leito deve ser deslocado até a posição horizontal para o aperto com a chave que acompanha o equipamento. O aperto definitivo deve ser feito com o leito na horizontal para maior segurança do equipamento e do operador. Após a fixação do distribuidor, o leito deve retornar à posição vertical, quando então deve ser feito o ajuste de prumo da coluna em relação ao solo. Antes do carregamento do leito com os sólidos, é aconselhável verificar se há vazamento, fazendo-se passar vazões crescentes no leito em vazio e aplicando-se uma solução de água com sabão nas conexões.

A pressão nos rotâmetros era mantida em 2 atm (pressão de trabalho dos rotâmetros), através de um manômetro analógico localizado na entrada do conjunto de rotâmetros. A vazão medida nos rotâmetros era controlada através das válvulas localizadas na entrada e na saída de cada um dos rotâmetros (fig.10 b, item 4.1.1). A válvula de entrada (inferior ao rotâmetro) deve ser mantida sempre aberta e a de saída (superior ao rotâmetro), inicialmente fechada. O ajuste da vazão é feito abrindo-se gradativamente a válvula de saída até o marcador do rotâmetro atingir o nível desejado.

No início dos ensaios, o leito foi carregado com massas conhecidas de areia, fazendo-se passar uma vazão de ar durante alguns segundos. Esta vazão, suficiente para promover o borbulhamento do leito, era então gradativamente diminuída até a interrupção total, fazendo-se a seguir a medição da altura inicial do leito na escala fixada no mesmo. A partir de então, vazões crescentes eram introduzidas no leito e em cada uma delas fazia-se o registro da vazão, da queda de pressão (na coluna de água) e a altura do leito. Em vazões elevadas, observou-se a oscilação da altura e da queda de pressão e da altura do leito. Nestes casos, fez-se o registro dos valores máximo e mínimo e o cálculo do valor médio e o respectivo desvio. Ao atingir a vazão máxima, limitada pela capacidade do rotâmetro, repetia-se o mesmo procedimento descrito anteriormente, agora para vazões decrescentes.

A conexão das mangueiras às tomadas de pressão do leito foi feita do seguinte modo:

- Uma das mangueiras foi conectada sempre na 3ª tomada de pressão (vide desenho 1 do anexo 2), isto é, no fundo do leito.
- A outra mangueira foi conectada ao leito de duas maneiras diferentes, como mostra a fig. 12 a,b.
 - Em (a), o nível do leito encobre a tomada de pressão superior;
 - Em (b), o nível do leito é mantido abaixo da tomada de pressão (aproximadamente 20 cm abaixo).

Foram levantadas curvas através destes dois procedimentos, e os resultados serão discutidos no item seguinte.

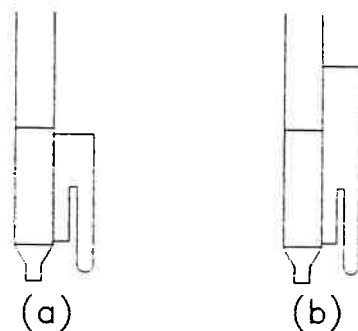


Figura 12: Posição das tomadas de pressão no levantamento das curvas $\Delta p \times G_o$.

5.RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 8 apresenta os resultados da análise granulométrica da areia e o diâmetro médio $\bar{d}_p$. A figura 12 apresenta o perfil da distribuição granulométrica da areia.

Peneira (μm)	Massa acumulada (gr)	Faixa de granulometria (μm)	Diâmetro médio, d_{pi} (μm)	Fração retida por faixa (x)	x/d_p
1000	-				
840	0.37	840 a 1000	920	0.0037	0.000004
590	1.83	590 a 840	715	0.0145	0.000020
500	4.83	500 a 590	545	0.0297	0.000055
420	10.57	420 a 500	460	0.0569	0.000124
300	39.39	300 a 420	360	0.2857	0.000794
250	61.69	250 a 300	275	0.2211	0.000804
210	68.59	210 a 250	230	0.0684	0.000297
150	96.05	150 a 210	180	0.2722	0.001512
106	99.93	106 a 150	128	0.0385	0.000301
75	100.46	75 a 106	90.5	0.0053	0.000058
62	100.87	62 a 75	68.5	0.0041	0.000059
45	-				
				$\Sigma =$	0.004028
				$d_p = \Sigma[(x_i/d_{pi})^{-1}]$	248 μm

Tabela 8: Curva de distribuição granulométrica da areia e diâmetro médio de partícula (d_p)

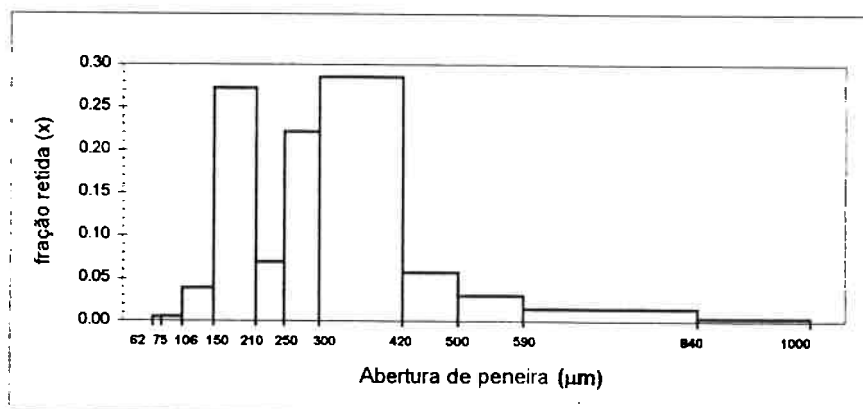


Figura 13: Curva de distribuição granulométrica - areia

A distribuição granulométrica é larga, apresentando 88% da massa dos sólidos com granulometria variando entre 150 e 500 μm . Além disso, verifica-se a presença de dois picos na curva de distribuição granulométrica, sendo um deles entre 150 e 210 μm e outro entre 300 e 420 μm . Esta característica do sólido causou imprecisão na determinação do diâmetro da partícula.

Como o diâmetro ($\bar{d}_p$) é calculado em função da superfície específica do material, a presença de um pico secundário entre 150 e 200 μm deslocou $\bar{d}_p$ para valores menores, em relação a uma distribuição normal, isto é, sem o pico secundário (vide tabela 8).

Foram realizadas seis medidas de densidade da areia, cujo valor médio e desvio padrão encontram-se na tabela 9:

Material	Densidade Real, ρ_s (kg.m^{-3})
areia	2660 ± 10

Tabela 9: Densidade real da areia determinada em ensaio de picnometria

As curvas de fluidização foram levantadas experimentalmente com massas de sólido de 1.6 e 2.6 kg. As figuras 14, 15 e 16 são curvas para massa de sólidos de 1.6 kg e as figuras 17 a 20 são curvas para massa de 2.6 kg. As tabelas correspondentes a estes gráficos encontram-se no anexo 5.

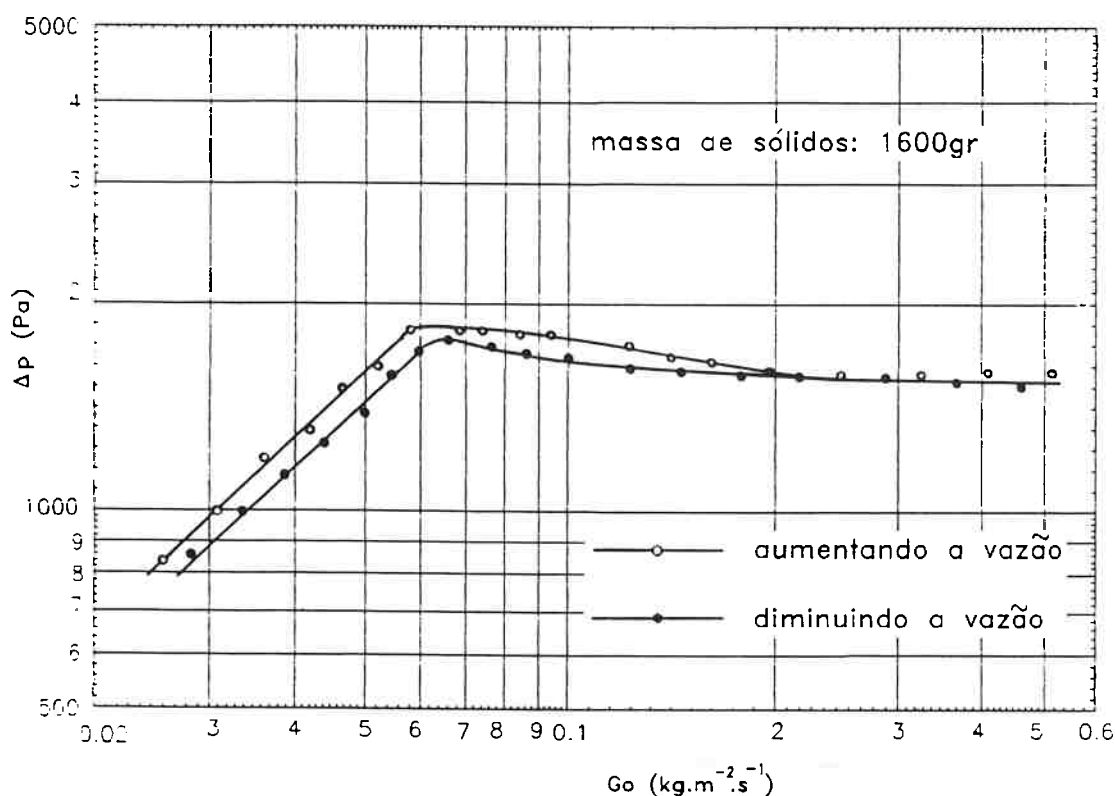


Figura 14: Variação da queda de pressão no leito com a vazão mássica de ar, para um leito de areia de 1.6 kg. (Ensaio 1). Tomada de pressão no topo do leito encoberta pelo nível de sólidos. No regime de leito fixo, vale a expressão $\Delta p = 13.5783 + 29433 \cdot G_o$ (Pa), com coef. de correlação de 0.9993

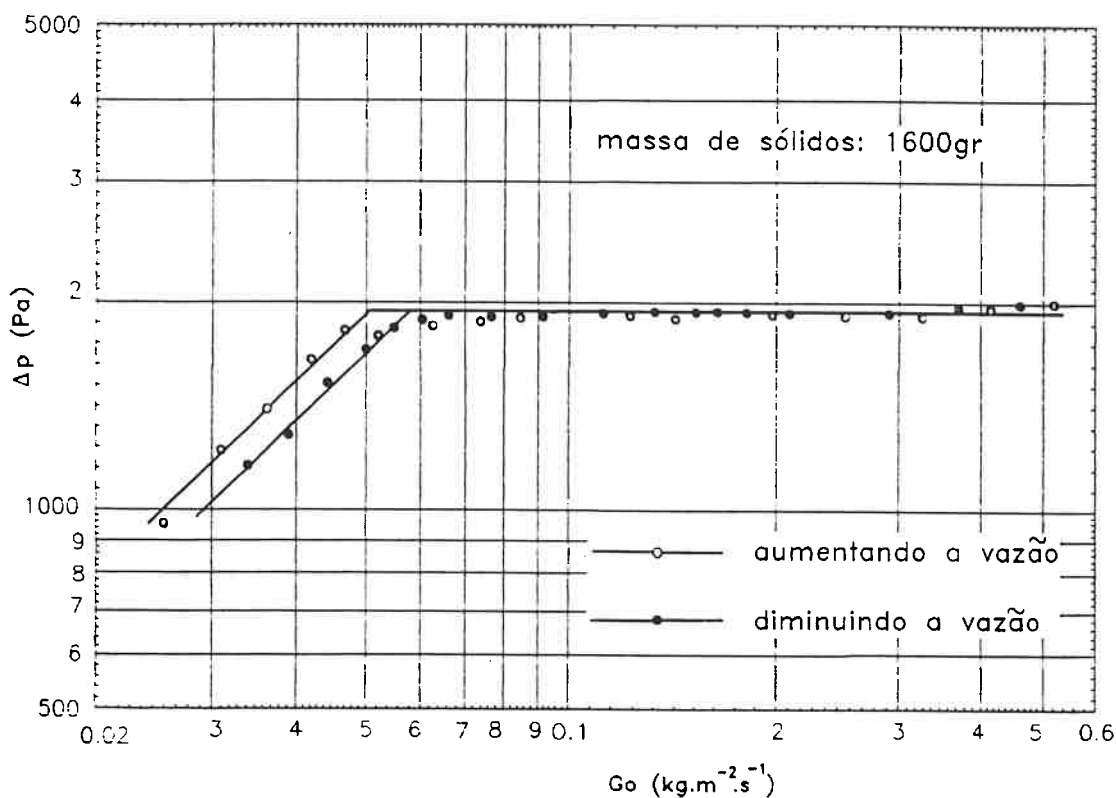


Figura 15: Variação da queda de pressão no leito com a vazão mássica de ar, para um leito de areia de 1.6 kg. (Ensaio 2). Tomada de pressão no topo do leito acima do nível de sólidos. No regime de leito fixo, vale a expressão $\Delta p = 92.9584 + 33233.G_o$ (Pa), com coef. de correlação de 0.9921

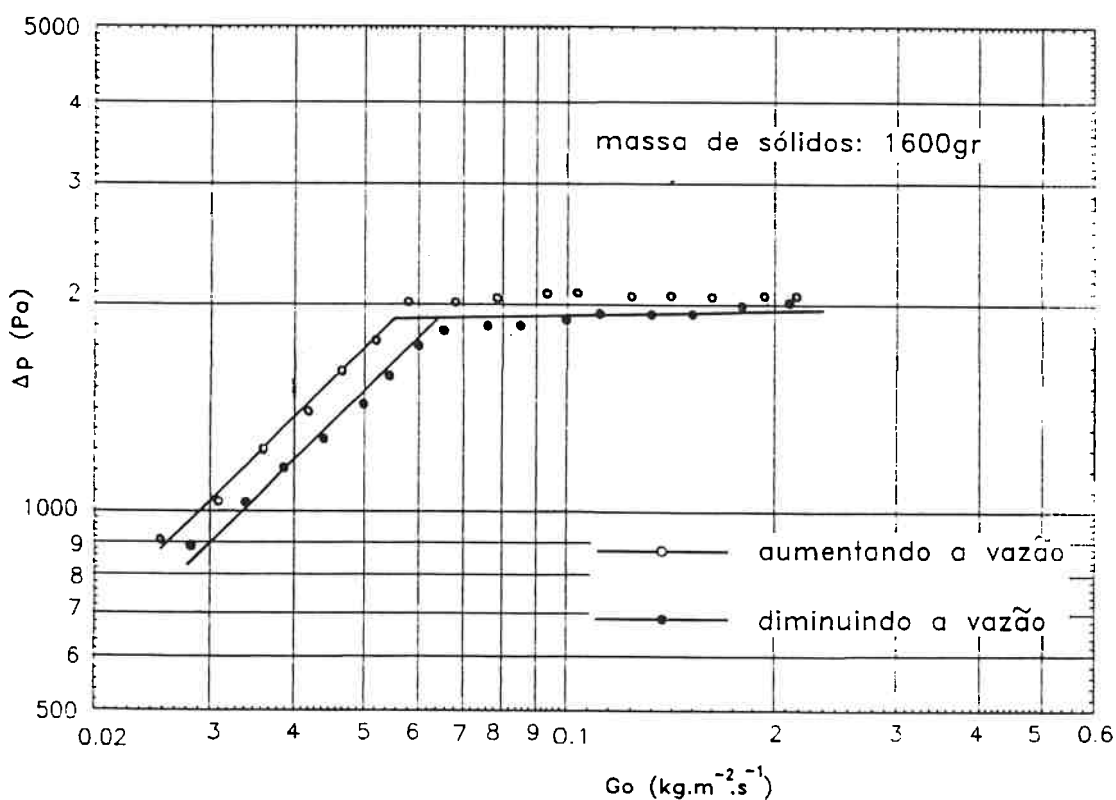


Figura 16: Variação da queda de pressão no leito com a vazão mássica de ar, para um leito de areia de 1.6 kg. (Ensaio 3). Tomada de pressão no topo do leito acima do nível de sólidos. No regime de leito fixo, vale a expressão $\Delta p = 96.5596 + 28242.G_o$ (Pa), com coef. de correlação de 0.9996

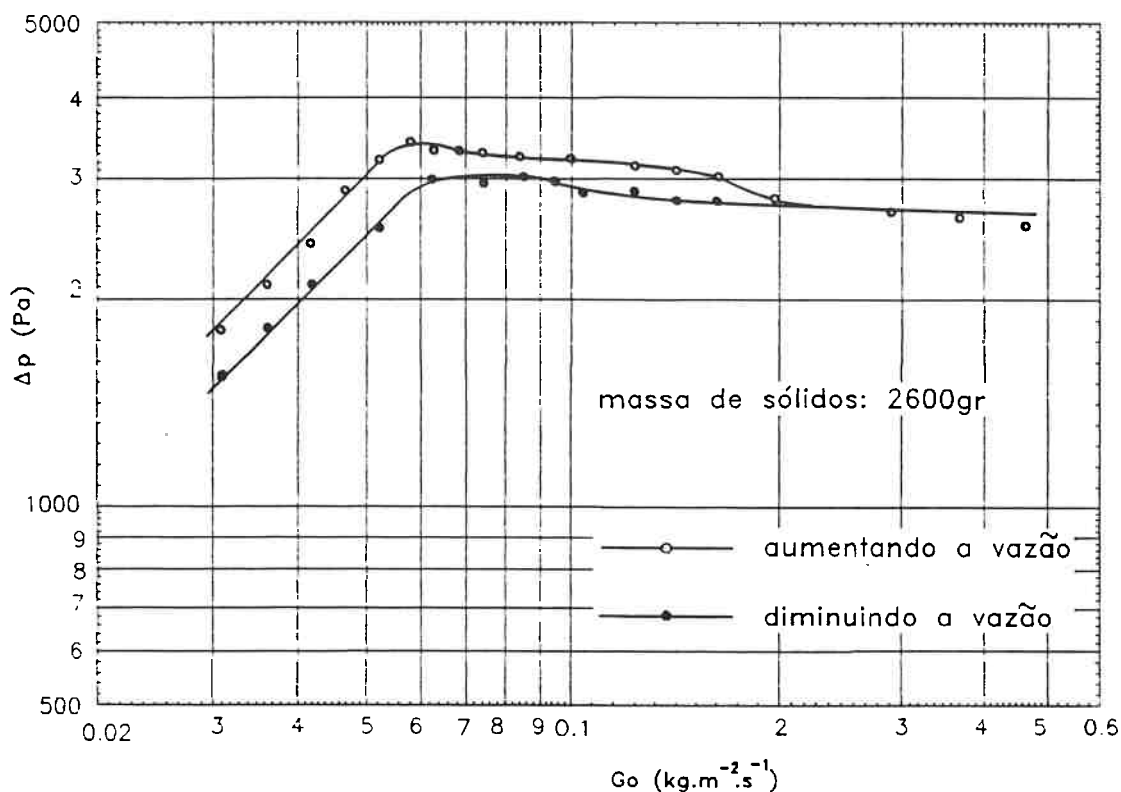


Figura 17: Variação da queda de pressão no leito com a vazão mássica de ar, para um leito de areia de 2.6 kg. (Ensaio 4). Tomada de pressão no topo do leito encoberta pelo nível de sólidos. No regime de leito fixo, vale a expressão $\Delta p = 240.57 + 44249.G_o$ (Pa), com coef. de correlação de 0.9989

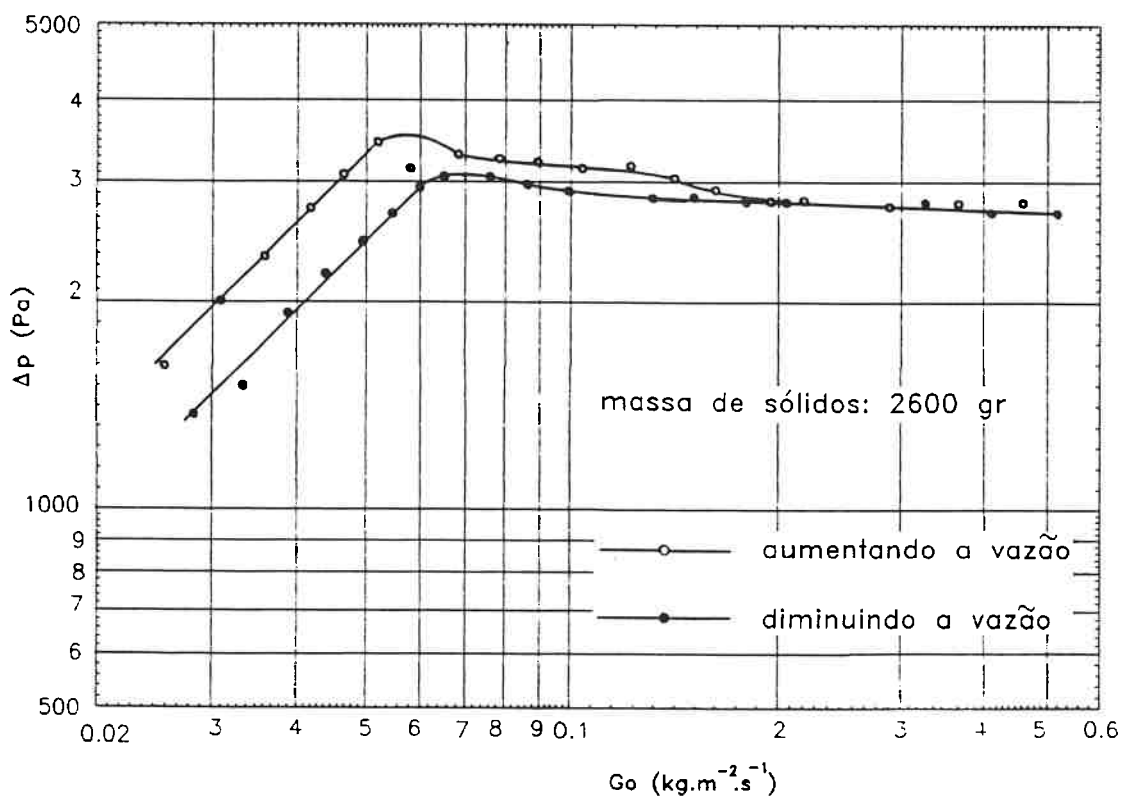


Figura 18: Variação da queda de pressão no leito com a vazão mássica de ar, para um leito de areia de 2.6 kg. (Ensaio 5). Tomada de pressão no topo do leito encoberta pelo nível de sólidos. No regime de leito fixo, vale a expressão $\Delta p = 45.48 + 48388.G_o$ (Pa), com coef. de correlação de 0.9971

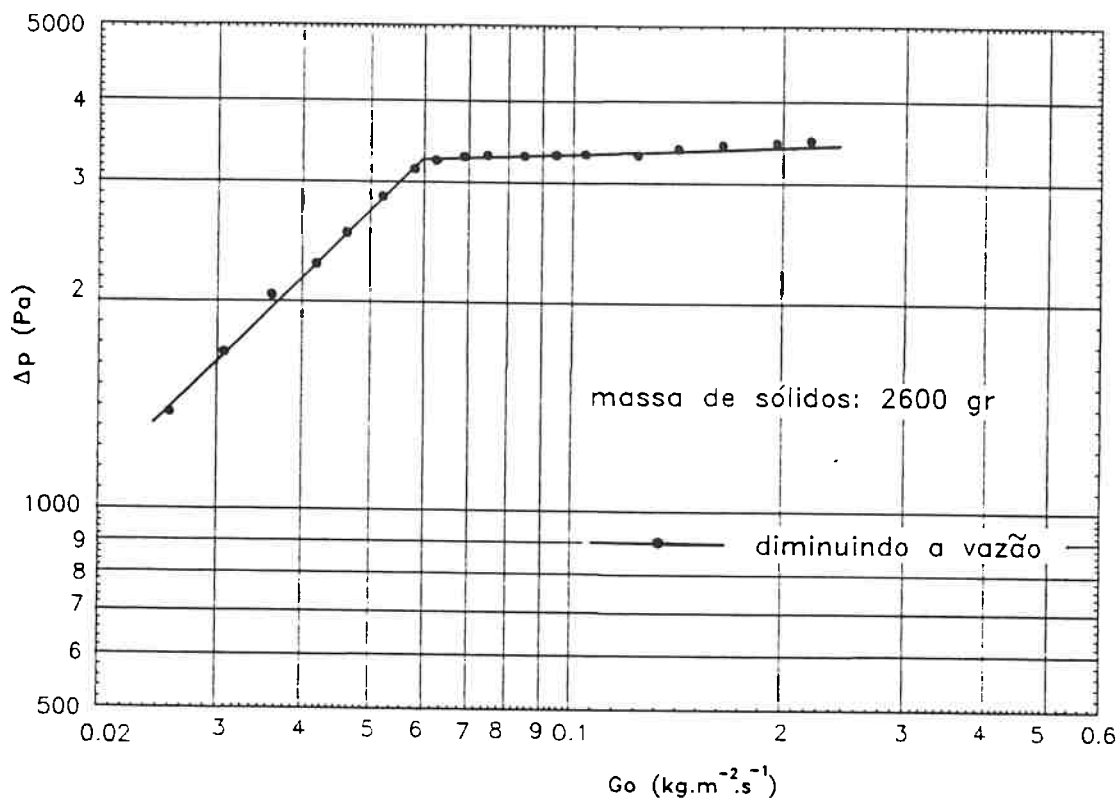


Figura 19: Variação da queda de pressão no leito com a vazão mássica de ar, para um leito de areia de 2.6 kg. (Ensaio 6). Tomada de pressão no topo do leito acima do nível de sólidos. No regime de leito fixo, vale a expressão $\Delta p = 124.97 + 52210.G_o$ (Pa), com coef. de correlação de 0.9995

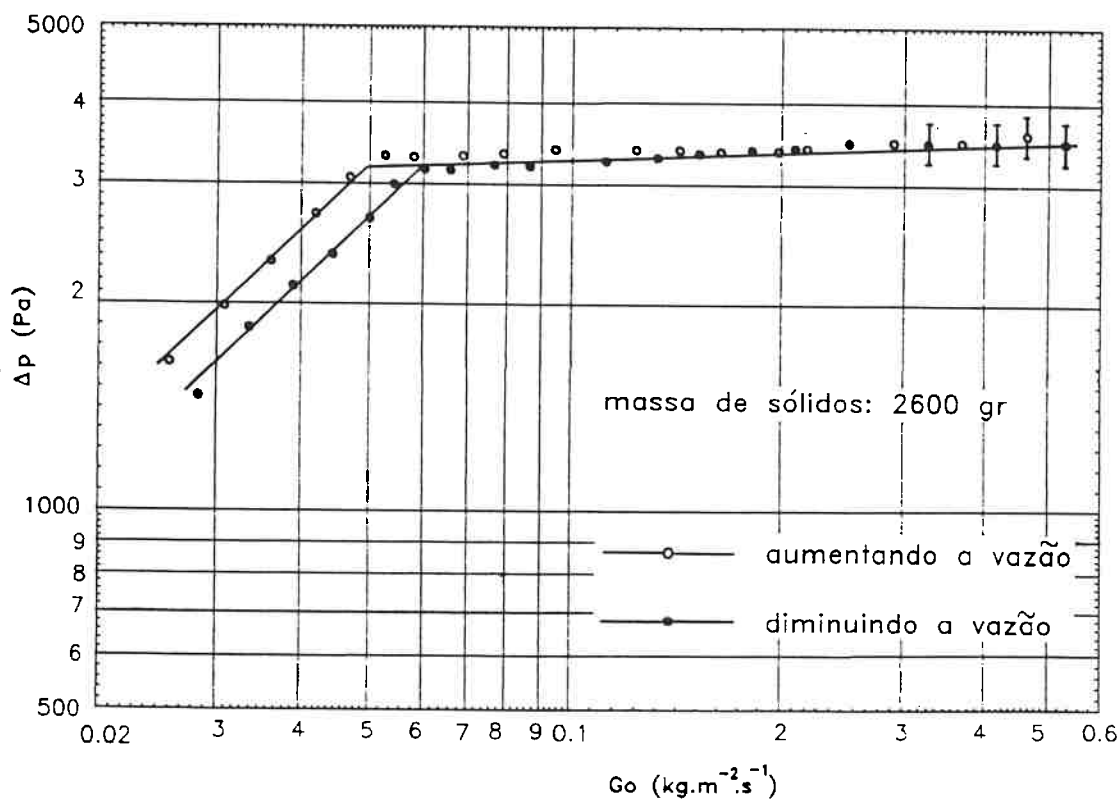


Figura 20: Variação da queda de pressão no leito com a vazão mássica de ar, para um leito de areia de 2.6 kg. (Ensaio 7). Tomada de pressão no topo do leito acima do nível de sólidos. No regime de leito fixo, vale a expressão $\Delta p = 76.72 + 52788.G_o$ (Pa), com coef. de correlação de 0.9995

Como visto no item 4.3.3., foram levantadas curvas através de dois procedimentos distintos. Nas curvas das figuras 14, 17, 18, a tomada de pressão no topo do leito era encoberta pelo nível de sólidos. Estas curvas apresentam um pico na condição de mínima fluidização, com uma tendência posterior decrescente e não linear. Este comportamento incomum pode ser explicado pela expansão do leito após u_{mf} . À medida que o leito expande, a massa de sólidos entre as tomadas de pressão diminui, e também a queda de pressão. Neste tipo de curva, torna-se difícil definir o ponto de transição de leito fixo para leito fluidizado e por isso este procedimento foi abandonado. Nas demais curvas (figuras 15, 16, 19, 20), onde tomada de pressão do topo do leito foi mantida acima do nível de sólidos, a queda de pressão apresenta um comportamento típico, com uma tendência crescente e linear após u_{mf} .

De acordo com as considerações do item 2.2 ("Descrição do Fenômeno de Fluidização"), observou-se o comportamento de histerese das curvas para vazões crescentes e decrescentes. (figuras 14, 15, 16, 17, 18, 20).

A tabela 10 apresenta os dados experimentais (Δp_{mf} , G_{mf}) obtidos das curvas de fluidização (figuras 15, 16, 19, 20).

Ensaio	Massa de sólidos (kg)	L_{mf} (m)	Δp_{mf} (Pa)		$\Delta p_1 / \Delta p_2$	$G_{mf} = Gr / At$ ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
			Observado Δp_1	Calculado Δp_2		
2	1.6	0.156	1950	2467	0.79	0.058
3	1.6	0.159	1920	2467	0.78	0.064
6	2.6	0.254	3200	4009	0.80	0.060
7	2.6	0.258	3300	4009	0.82	0.060

Tabela 10: Valores de Δp_{mf} , G_{mf} obtidos graficamente para leitos com 1.6 e 2.6 kg de sólidos

Na tabela 10, a repetição de cada ensaio teve como objetivo avaliar a reprodutividade das medidas experimentais, principalmente com relação à determinação gráfica de G_{mf} . De um modo geral, os ensaios são reprodutíveis, com um desvio padrão máximo de 5.8%.

Verifica-se ainda que Δp_{mf} observado é sempre menor que Δp_{mf} calculado, sendo este último calculado dividindo-se o peso de sólidos pela área da secção transversal do leito. Isto significa que a fluidização do leito não foi completa, isto é, parte do leito manteve-se na condição de leito fixo mesmo após u_{mf} . A eficiência de fluidização, definida pela relação $\Delta p_{mf(\text{observado})} / \Delta p_{mf(\text{calculado})}$, que manteve-se em 80%. O fenômeno de canalização, decorrente do tipo de distribuidor utilizado, contribuiu para essa defasagem. Durante os ensaios, foi possível observar visualmente a passagem do gás através de canais no leito, principalmente junto às paredes.

A tabela 11 apresenta os valores de ε_{mf} , u_{mf} e do fator de forma ϕ_s . A fração de vazios foi determinada a partir da eq. 4 (item 3.2) e não pela eq. 5, devido à defasagem da queda de pressão obtida experimentalmente. O fator de forma (ϕ_s) foi estimado através da equação de Ergun para a condição de mínima fluidização (eq. 6, item 3.2). A tabela inclui ainda os valores de Rep e Fr para a condição de mínima fluidização. A tabela 12 apresenta as propriedades do ar e da água nas temperaturas de cada um dos ensaios, utilizadas no cálculo do fator de forma pela equação de Ergun. Estas propriedades foram estimadas segundo as considerações dos anexos 3 e 4.

Ensaio	Massa de sólidos (kg)	$u_{mf} = G_{mf}/\rho_a$ (m.s ⁻¹)	ε_{mf}	ϕ_s	$Rep_{(mf)}$	$Fr_{(mf)}$
2	1.6	0.049	0.39	0.92	0.82	0.99
3	1.6	0.054	0.41	0.88	0.89	1.20
6	2.6	0.050	0.40	0.89	0.84	1.03
7	2.6	0.051	0.40	0.90	0.83	1.07

Tabela 11: Valores de u_{mf} , ε_{mf} , ϕ_s , Rep e Fr para fluidização de areia, $\overline{dp}=248\mu\text{m}$

Ensaio	Temperatura (°C)	ρ_a (kg.m ⁻³)	μ_a (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)	$\rho_{\text{água}}$ (kg.m ⁻³)
2	23.0	1.191	1.77×10^{-5}	997
3	25.5	1.181	1.78×10^{-5}	996
6	22.0	1.195	1.77×10^{-5}	997
7	27.5	1.173	1.78×10^{-5}	995

Tabela 12: Propriedades do ar e da água na temperatura dos ensaios

A tabela 13 resume propriedades de fluidização obtidos para a areia utilizada em termos dos valores médios:

u_{mf} (m.s ⁻¹)	ε_{mf}	ϕ_s	$Rep_{(mf)}$	$Fr_{(mf)}$
0.051 ± 0.002	0.40 ± 0.01	0.90 ± 0.02	0.85 ± 0.03	1.1 ± 0.1

Tabela 13: Valores médios das propriedades de fluidização da areia, $\overline{dp}=248\mu\text{m}$

A figura 21 apresenta a foto das partículas de areia. Ela permite visualizar a forma das partículas, associá-la com o valor do fator de forma obtido experimentalmente. O aspecto geral das partículas é arredondado, de modo que o valor do fator de forma obtido é coerente, numa análise qualitativa. Mas dados de literatura apresentam valores de ϕ_s variando entre 0.53 e 0.86 (vide tabela 2). A imprecisão na determinação do diâmetro de partícula contribuiu para esta diferença, pois o pico secundário da distribuição granulométrica induziu a um diâmetro de partícula menor que o esperado se a distribuição fosse normal.

O número de Reynolds de partícula é menor que 20, e portanto nas condições de mínima fluidização a queda de pressão deve-se principalmente às perdas viscosas (perdas por atrito), correspondendo à segunda parcela do primeiro membro da eq. de Ergun (eq.6).

O número de Froude obtido (1.1) obtido é característico de leitos agregativos, apresentando formação de bolhas logo após u_{mf} . (vide item 3.3). Este critério é coerente com as observações visuais do leito, quando foi possível constatar a formação de bolhas logo ao se atingir a condição de mínima fluidização. Além disso, plotando-se os dados do sólido no diagrama de Geldart (fig.8) também caracteriza o sólido como sendo característico de leitos agregativos.

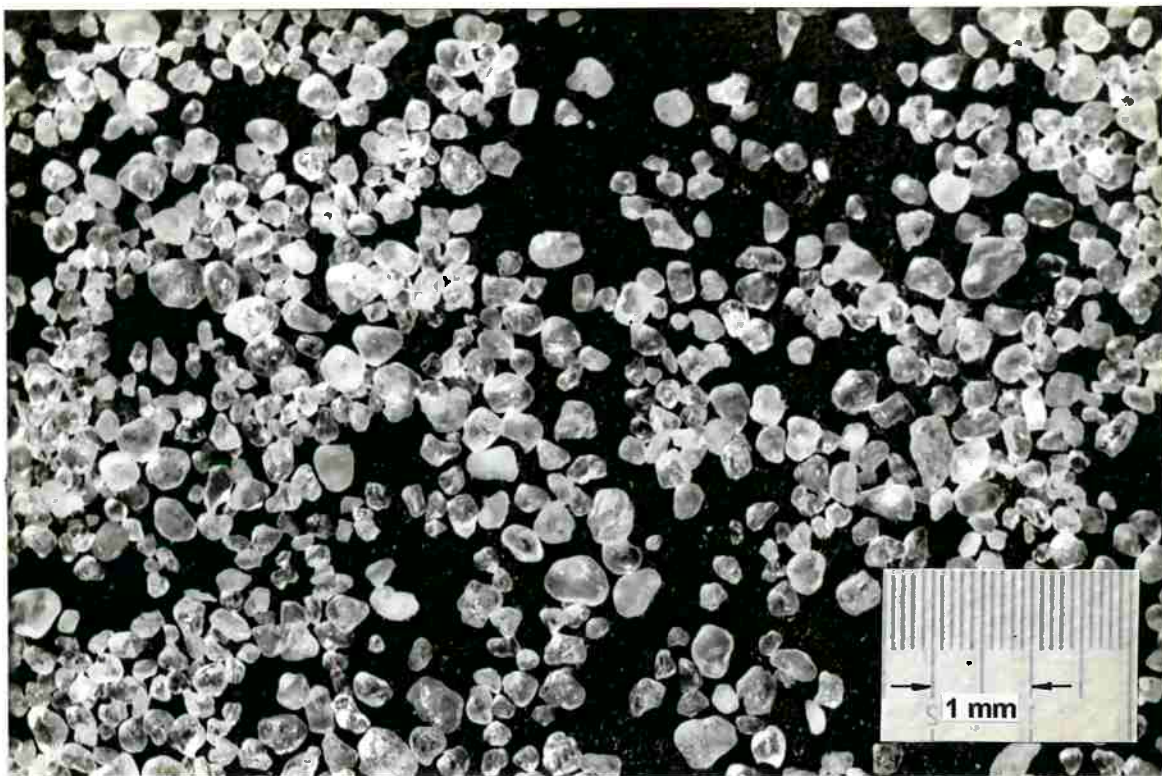


Figura 21: Material particulado (areia), $\overline{dp}=248 \mu\text{m}$. Escala em $\text{mm} \times 10^{-1}$

6. CONCLUSÕES

Dos resultados experimentais obtidos, conclui-se:

1. O distribuidor utilizado (área de orifícios de 0.68% da área do leito, 220 furos de 0.5 mm de diâmetro,) não foi adequado ao leito em estudo. No regime de leito fixo houve canalização, principalmente junto às paredes. Em vazões elevadas ($0.15 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}$) verificou-se intenso empolamento, com grande oscilação da altura do leito (20 a 80 mm). A canalização dificultou a fluidização dos sólidos, pois na condição de mínima fluidização, a queda de pressão no leito correspondeu a 80% da queda de pressão teórica, indicando que o leito estava parcialmente fluidizado.

2. A larga distribuição granulométrica da areia, que apresentou 88% da massa dos sólidos com diâmetro de partícula variando entre 150 e 500 μm , foi um outro fator que dificultou a fluidização do leito. A curva de fluidização apresentou uma transição gradual do leito fixo para o leito fluidizado, com a queda de pressão no leito aumentando progressivamente mesmo para vazões superiores à condição de mínima fluidização, indicando que massas adicionais de sólidos estavam passando ao estado fluidizado.

3. Com os dados de fluidização da areia (diâmetro médio de partícula de 248 μm , velocidade de mínima fluidização de 0.051 m.s^{-1} , fração de vazios na condição de mínima fluidização de 0.40) calculou-se o fator de forma (ϕ_s) através da equação de Ergun, obtendo-se o valor de 0.9. Este valor foi superior aos dados de literatura⁽⁴⁾, que apresenta valores de ϕ_s variando entre 0.53 e 0.86. A diferença deve-se à imprecisão do diâmetro médio de partícula, decorrente do pico secundário da curva de distribuição granulométrica.

4. Na condição de mínima fluidização, o fluido apresentou regime laminar de escoamento, com o número de Reynolds de partícula de 0.85. Com relação à qualidade de fluidização dos sólidos, o leito apresentou um comportamento agregativo, com número de Froude de 1.1.

7. SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

O uso de um distribuidor do tipo placa perfurada não foi satisfatória no leito fluidizado em estudo, devido à presença de canalização em baixas vazões (em leito fixo) e ao intenso empolamento em vazões elevadas (vazões acima da condição de mínima fluidização). Com o objetivo de melhorar a uniformidade da vazão através do distribuidor, minimizando os problemas de canalização e empolamento, sugere-se o uso de um distribuidor do tipo placa sinterizada. Este distribuidor consiste de um disco de bronze sinterizado com diâmetro de 150 mm e 5 mm de espessura, conhecido comercialmente como disco de bronze. Além das especificações dimensionais, há a porosidade do sinterizado, que pode variar de 5 a 10%. Este filtro de bronze é produzido sob encomenda.

A distribuição granulométrica da areia utilizada neste trabalho apresentou um comportamento particular, com dois picos não adjacentes. Esta característica dificultou a determinação do diâmetro médio de partícula, cuja definição de cálculo baseia-se em distribuições granulométricas normais. Além disso, a larga distribuição granulométrica dificulta a fluidização total do leito, estendendo-se numa larga faixa de vazões. Deste modo, sugere-se a modificação da distribuição granulométrica através de peneiramento do material. Com este procedimento, pode-se eliminar o pico secundário da distribuição granulométrica, aumentar ou diminuir a largura da distribuição, deslocar o pico da distribuição para granulometrias maiores ou menores, avaliando-se o comportamento de fluidização caso a caso.

ANEXO 1

FATOR DE FORMA DE PARTÍCULAS

Nos cálculos de queda de pressão em leitos, utiliza-se o produto $\phi_s \cdot \overline{dp}$ para representar a dimensão característica da partícula. Este produto é definido a partir do conceito de superfície específica (S_v):

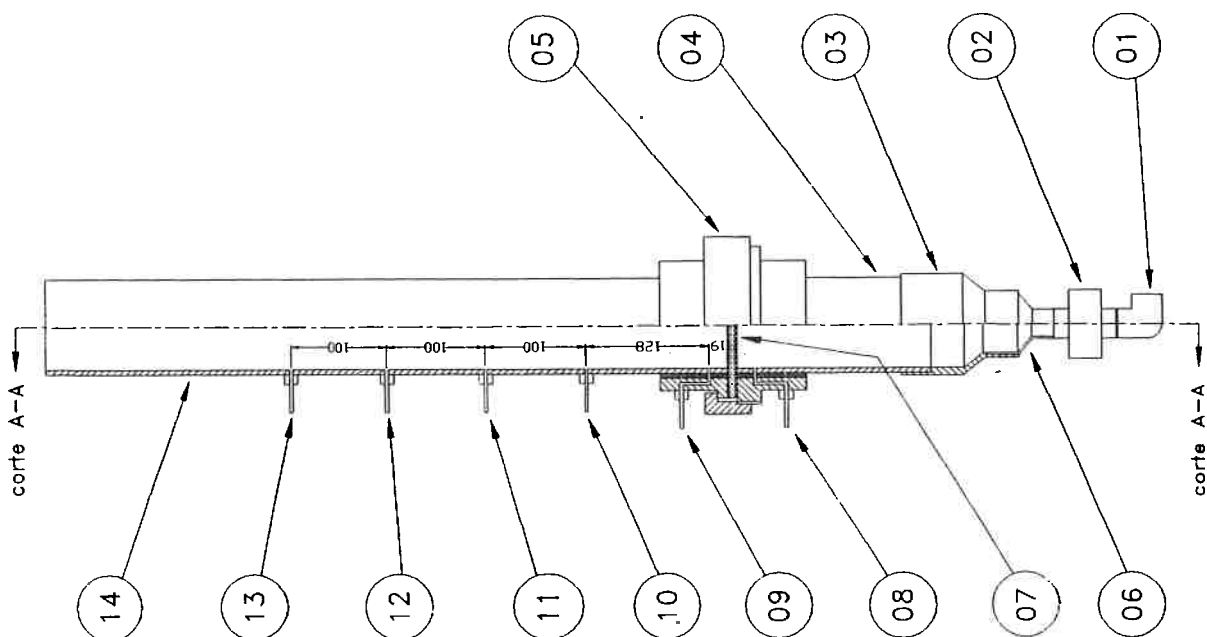
$$S_v = \frac{\text{área da partícula}}{\text{volume da partícula}} = \frac{\pi \cdot (\overline{dp})^2 / \phi_s}{\pi \cdot (\overline{dp})^3 / 6} = \frac{6}{\phi_s \cdot \overline{dp}}$$

Ou então:

$$\phi_s \cdot \overline{dp} = \frac{6}{S_v}$$

Deste modo, conclui-se que o fator de forma pode ser determinado a partir dos dados de superfície específica do material e do diâmetro médio de uma distribuição granulométrica de partículas.

ANEXO 2



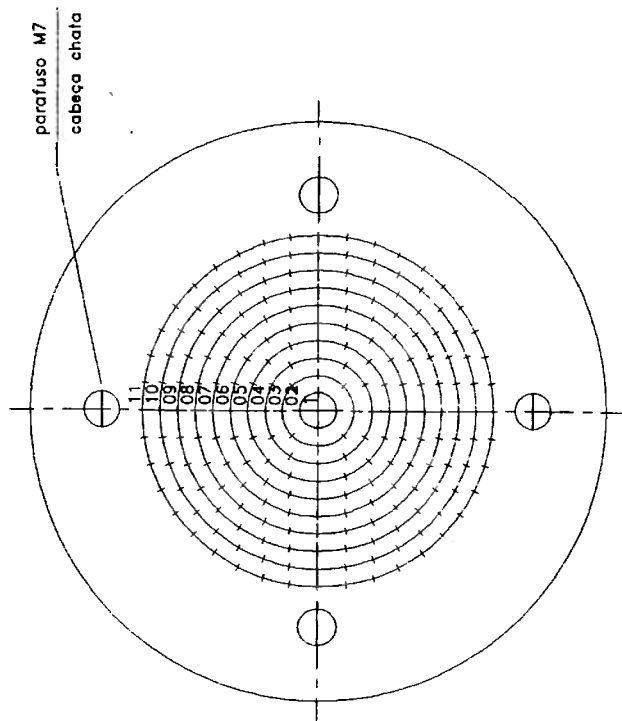
14	tubo de acrílico	700mm compr.	100 mm ϕ_{EXT} , 5 mm espessura
13	tomada de pressão nº 6	01	bico de mangueira giratório, 3/16x1/2" e niple 1/2"
12	tomada de pressão nº 5	01	bico de mangueira giratório, 3/16x1/2" e niple 1/2"
11	tomada de pressão nº 4	01	bico de mangueira giratório, 3/16x1/2" e niple 1/2"
10	tomada de pressão nº 3	01	bico de mangueira giratório, 3/16x1/2" e niple 1/2"
09	tomada de pressão nº 2	01	bico de mangueira giratório, 3/16x1/2" e niple 1/2"
08	tomada de pressão nº 1	01	bico de mangueira giratório, 3/16x1/2" e niple 1/2"
07	distribuidor	01	vide desenho 2
06	luva de redução soldável	01	PVC, 60x32 mm
05	união soldável	01	PVC, 110 mm
04	tubo de acrílico	200mm compr.	100 mm ϕ_{EXT} , 5 mm espessura
03	luva de redução soldável	01	110x60 mm
02	união soldável	01	PVC, 32 mm
01	cotovelo 90° Soldável e com rosca	01	PVC, 32 mmx1"
Nº	Denominação	Quant.	Especificação

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - EPUSP

Disciplina : PMT 598 - Estágio Supervisionado Título: LEITO FLUIDIZADO DESENHO Nº 1

Orientador : Prof. Dr. Jose Deodoro Trani Capocchi Data : 04 / 02 / 96

Aluno : Edson Mitsunobu Cintho Escala : 1:8



DADOS DO DISTRIBUIDOR

diâmetro externo: 150mm

material : 2 discos de PVC, 5mm espessura

numero de orificios : 221

camadas de orificios : 11

distância entre camadas : 4,545mm

quantidade de orificios por camada :

camada 01 : 01 orificio

camada 02 : 04 orificios

camada 03 : 08 orificios

camada 04 : 12 orificios

camada 05 : 16 orificios

camada 06 : 20 orificios

camada 07 : 24 orificios

camada 08 : 28 orificios

camada 09 : 32 orificios

camada 10 : 36 orificios

camada 11 : 40 orificios

diâmetro de orificio : 0,5 mm

escala : 1:2

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - EPUSP

Disciplina : PMT 598 - Estágio Supervisionado

Título: DISTRIBUIDOR

DESENHO
Nº 2

Data : 04 / 02 / 96

Orientador : Prof. Dr. Jose Deodoro Trani Capocchi

Aluno : Edson Mitsunobu Cintho

ANEXO 3

1.MASSA ESPECÍFICA DO AR

$$P.V = n.R.T, \quad n = \frac{m}{M}$$

$$P.V = \frac{m}{M}.R.T \Rightarrow P = \frac{m}{V} \cdot \frac{R.T}{M} \Rightarrow \rho = \frac{P.M}{R.T}$$

Onde:

$$R = 8.3145 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$M_{ar} = 28.97\text{g (vide ref. 13)}$$

$$P = 101325 \text{ Pa (1 atm)}$$

T : temperatura absoluta (K)

Portanto,

$$\rho_{ar} = \frac{0.02897 \times 101325}{8.3145 \times T} \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$$

2.MASSA ESPECÍFICA DA ÁGUA

Fonte dos dados: vide ref 14

Volume de 1g de água		Massa Específica (kg.m ⁻³)	
Temperatura (°C)	Volume (cm ³)	experimental	interpolação
10	1.0013	998.7	998.7
12	1.0015	998.5	998.5
14	1.0017	998.3	998.3
16	1.0021	997.9	998.0
18	1.0023	997.7	997.6
20	1.0027	997.3	997.2
22	1.0033	996.7	996.7
24	1.0037	996.3	996.3
26	1.0044	995.6	995.7
28	1.0047	995.3	995.2
30	1.0053	994.7	994.7

Interpolação polinomial por um polinômio do 3º grau

$$\rho_{\text{água}} \text{ (kg.m}^{-3}\text{)} = 997.721445 + 0.261 \times T - 0.0189 \times T^2 + 2.28 \times T^3$$

ANEXO 4

VISCOSIDADE DO AR

A viscosidade do ar foi calculada através da equação de Chapman-Enskog⁽¹³⁾, válida para gases não polares em baixas pressões:

$$\mu = 2.67 \times 10^{-5} \cdot \sqrt{\frac{M \cdot T}{\sigma^2 \cdot \Omega_\eta}}$$

Onde:

μ : viscosidade do gás ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

M : massa molar do gás

Parâmetros de Lennard-Jones:

σ : diâmetro de colisão (ângstrons), $\sigma_{ar} = 3.617$

ε / K_B : K, $(\varepsilon / K_B)_{ar} = 97.0$

Ω_η : secção de choque para viscosidade (adimensional)

T : temperatura (K)

$(K_B \cdot T / \varepsilon)$	Ω_η	$(K_B \cdot T / \varepsilon)$	Ω_η
0.3	2.7850	6.0	0.8963
0.4	2.4920	8.0	0.8538
0.5	2.2570	10.0	0.8242
0.6	2.0650	20.0	0.7432
0.7	1.9080	40.0	0.6718
0.8	1.7800	60.0	0.6335
0.9	1.6750	80.0	0.6076
1.0	1.5870	100.0	0.5882
2.0	1.1750	200.0	0.5320
4.0	0.9700	400.0	0.4811

Com a temperatura, calcula-se $(K_B \cdot T / \varepsilon)$ e através da tabela determina-se Ω_η . A seguir, através da equação de Chapman-Enskog, calcula-se a viscosidade do ar (μ_{ar}).

ANEXO 5

TABELAS DAS CURVAS DE FLUIDIZAÇÃO

ENSAIO 1 - FIGURA 14

material: areia
 massa de sólidos : 1600 g
 pressão média no leito (Pa): 101325 Pa, supondo = 1 atm
 temperatura do leito: 22.5 °C
 densidade do ar: 1.193 kg/m³
 densidade da água: 996.6 kg/m³

Aumentando a Vazão				
Vazão		Queda de pressão		Altura do leito
Ql (lida)	Qr (real)			
(l/min)	(kg/m ² .s)	(mmH ₂ O)	(Pa)	(mm)
8	2.05E-02	68 ±	665 ±	156 ±
10	2.59E-02	86 ±	841 ±	156 ±
12	3.13E-02	102 ±	997 ±	156 ±
14	3.66E-02	128 ±	1251 ±	156 ±
16	4.20E-02	142 ±	1388 ±	156 ±
18	4.73E-02	164 ±	1603 ±	156 ±
20	5.26E-02	174 ±	1701 ±	156 ±
22	5.80E-02	192 ±	1877 ±	157 ±
24	6.33E-02	191 ± 1	1867 ± 10	159 ± 1
26	6.86E-02	192 ± 2	1877 ± 20	161 ± 1
28	7.39E-02	192 ± 2	1877 ± 20	162 ± 2
30	7.92E-02	190 ± 2	1858 ± 20	163 ± 2
32	8.45E-02	190 ± 2	1858 ± 20	165 ± 3
34	8.98E-02	190 ± 4	1858 ± 39	167 ± 3
36	9.52E-02	190 ± 4	1858 ± 39	168 ± 4
40	1.06E-01	186 ± 4	1818 ± 39	173 ± 8
48	1.28E-01	184 ± 4	1799 ± 39	178 ± 8
56	1.50E-01	178 ± 4	1740 ± 39	185 ± 10
64	1.73E-01	176 ± 4	1721 ± 39	188 ± 13
72	1.97E-01	172 ± 4	1682 ± 39	195 ± 15
90	2.55E-01	170 ± 6	1662 ± 59	200 ± 20
110	3.29E-01	170 ± 8	1662 ± 78	210 ± 20
130	4.16E-01	170 ± 8	1662 ± 78	215 ± 30
150	5.18E-01	170 ± 8	1662 ± 78	220 ± 30
170	6.39E-01	166 ± 10	1623 ± 98	210 ± 30

Diminuindo a Vazão				
Vazão		Queda de pressão		Altura do leito
Ql (lida)	Qr (real)			
(l/min)	(kg/m ² .s)	(mmH ₂ O)	(Pa)	(mm)
9	2.32E-02	62 ±	606 ±	155 ±
11	2.86E-02	88 ±	860 ±	155 ±
13	3.39E-02	102 ±	997 ±	155 ±
15	3.93E-02	120 ±	1173 ±	155 ±
17	4.46E-02	136 ±	1330 ±	155 ±
19	5.00E-02	152 ±	1486 ±	155 ±
21	5.53E-02	170 ±	1662 ±	155 ±
23	6.06E-02	182 ±	1779 ±	156 ±
25	6.59E-02	186 ± 1	1818 ± 10	158 ± 2
27	7.12E-02	185 ± 1	1809 ± 10	160 ± 3
29	7.65E-02	183 ± 1	1789 ± 10	162 ± 3
31	8.19E-02	182 ± 1	1779 ± 10	162 ± 3
33	8.72E-02	181 ± 1	1770 ± 10	165 ± 5
36	9.52E-02	180 ± 1	1760 ± 10	170 ± 5
38	1.01E-01	178 ± 2	1740 ± 20	170 ± 5
42	1.11E-01	176 ± 2	1721 ± 20	173 ± 8
50	1.33E-01	174 ± 2	1701 ± 20	180 ± 10
58	1.56E-01	172 ± 2	1682 ± 20	188 ± 13
68	1.85E-01	170 ± 4	1662 ± 39	195 ± 15
75	2.06E-01	170 ± 4	1662 ± 39	195 ± 15
80	2.22E-01	170 ± 6	1662 ± 59	200 ± 20
100	2.91E-01	170 ± 4	1662 ± 39	195 ± 20
120	3.71E-01	166 ± 2	1623 ± 20	210 ± 20
140	4.65E-01	164 ± 6	1603 ± 59	220 ± 20
160	5.76E-01	166 ± 6	1623 ± 59	230 ± 30

ENSAIO 2 - FIGURA 15

material: areia
 massa de sólidos : 1600 g
 pressão média no leito (Pa): 101325 Pa, supondo = 1 atm
 temperatura do leito: 23 °C
 densidade do ar: 1.191 kg/m³
 densidade da água: 996.5 kg/m³

Aumentando a Vazão					Diminuindo a Vazão				
Vazão		Queda de Pressão		Altura do Leito	Vazão		Queda de Pressão		Altura do Leito
Ql (lida)	Qr (real)				Ql (lida)	Qr (real)			
(l/min)	(kg/m ² .s)	(mmH ₂ O)	(Pa)	(mm)	(l/min)	(kg/m ² .s)	(mmH ₂ O)	(Pa)	(mm)
10	2.59E-02	98 ±	958 ±	153 ±	11	2.86E-02	76 ±	743 ±	154 ±
12	3.13E-02	132 ±	1290 ±	150 ±	13	3.39E-02	124 ±	1212 ±	154 ±
14	3.66E-02	152 ±	1486 ±	150 ±	15	3.93E-02	140 ±	1369 ±	154 ±
16	4.20E-02	176 ±	1721 ±	150 ±	17	4.46E-02	166 ±	1623 ±	154 ±
18	4.73E-02	192 ±	1877 ±	152 ±	19	5.00E-02	182 ±	1779 ±	154 ±
20	5.26E-02	188 ±	1838 ±	155 ±	21	5.53E-02	194 ±	1896 ±	156 ± 1
22	5.80E-02	192 ±	1877 ±	156 ± 1	23	6.06E-02	198 ±	1936 ±	156 ± 2
24	6.33E-02	194 ±	1896 ±	157 ± 2	25	6.59E-02	199 ± 1	1945 ± 10	159 ± 2
26	6.86E-02	196 ±	1916 ±	158 ± 2	27	7.12E-02	199 ± 1	1945 ± 10	160 ± 2
28	7.39E-02	196 ±	1916 ±	160 ± 3	29	7.65E-02	199 ± 1	1945 ± 10	162 ± 3
30	7.92E-02	198 ±	1936 ±	162 ± 3	31	8.19E-02	199 ± 1	1945 ± 10	163 ± 4
32	8.45E-02	198 ±	1936 ±	163 ± 3	33	8.72E-02	199 ± 1	1945 ± 10	163 ± 4
34	8.98E-02	198 ±	1936 ±	166 ± 4	35	9.25E-02	199 ± 1	1945 ± 10	165 ± 5
36	9.52E-02	199 ± 2	1945 ± 20	167 ± 4	38	1.01E-01	199 ± 1	1945 ± 10	170 ± 8
40	1.06E-01	199 ± 2	1945 ± 20	170 ± 5	44	1.17E-01	200 ± 2	1955 ± 20	175 ± 8
48	1.28E-01	200 ± 2	1955 ± 20	175 ± 8	52	1.39E-01	202 ± 2	1975 ± 20	180 ± 10
56	1.50E-01	200 ± 2	1955 ± 20	180 ± 10	60	1.61E-01	202 ± 2	1975 ± 20	183 ± 10
64	1.73E-01	202 ± 2	1975 ± 20	195 ± 20	68	1.85E-01	202 ± 2	1975 ± 20	190 ± 10
72	1.97E-01	202 ± 4	1975 ± 39	195 ± 20	76	2.09E-01	202 ± 2	1975 ± 20	195 ± 20
90	2.55E-01	202 ± 4	1975 ± 39	205 ± 20	80	2.22E-01	202 ± 4	1975 ± 39	195 ± 20
110	3.29E-01	202 ± 4	1975 ± 39	210 ± 20	100	2.91E-01	202 ± 4	1975 ± 39	210 ± 20
130	4.16E-01	204 ± 4	1994 ± 39	220 ± 20	120	3.71E-01	204 ± 4	1994 ± 39	215 ± 30
150	5.18E-01	206 ± 6	2014 ± 59	230 ± 30	140	4.65E-01	206 ± 4	2014 ± 39	220 ± 30
170	6.39E-01	206 ± 6	2014 ± 59	±	160	5.76E-01	206 ± 4	2014 ± 39	230 ± 30

ENSAIO 3 - FIGURA 16

material: areia
 massa de sólidos : 1600 g
 pressão média no leito (Pa): 101325 Pa, supondo = 1 atm
 temperatura do leito: 25.5 °C
 densidade do ar: 1.181 kg/m³
 densidade da água: 995.9 kg/m³

Aumentando a Vazão				
Vazão		Queda de Pressão		Altura do Leito
Ql (lida)	Qr (real)			
(l/min)	(kg/m ² .s)	(mmH ₂ O)	(Pa)	(mm)
10	2.59E-02	94 ±	918 ± 0	158 ±
12	3.13E-02	108 ±	1055 ±	158 ±
14	3.66E-02	134 ±	1309 ±	158 ±
16	4.20E-02	152 ±	1485 ±	158 ±
18	4.73E-02	172 ±	1680 ±	158 ±
20	5.26E-02	188 ±	1837 ±	158 ±
22	5.80E-02	206 ±	2013 ±	158 ±
24	6.33E-02	200 ±	1954 ±	159 ± 1
26	6.86E-02	207 ±	2022 ±	160 ± 5
28	7.39E-02	207 ± 1	2022 ± 10	163 ± 3
30	7.92E-02	208 ± 1	2032 ± 10	164 ± 3
32	8.45E-02	212 ± 2	2071 ± 20	±
34	8.98E-02	212 ± 2	2071 ± 20	170 ± 5
36	9.52E-02	214 ± 3	2091 ± 29	170 ± 5
40	1.06E-01	214 ± 4	2091 ± 39	173 ± 7
48	1.28E-01	212 ± 4	2071 ± 39	178 ± 7
56	1.50E-01	212 ± 4	2071 ± 39	180 ± 10
64	1.73E-01	210 ± 4	2052 ± 39	185 ± 15
72	1.97E-01	210 ± 4	2052 ± 39	190 ± 20
80	2.22E-01	208 ± 4	2032 ± 39	200 ± 20

Diminuindo a Vazão				
Vazão		Queda de Pressão		Altura do Leito
Ql (lida)	Qr (real)			
(l/min)	(kg/m ² .s)	(mmH ₂ O)	(Pa)	(mm)
9	2.32E-02	78 ±	762 ±	157 ±
11	2.86E-02	92 ±	899 ±	157 ±
13	3.39E-02	108 ±	1055 ±	157 ±
15	3.93E-02	124 ±	1211 ±	157 ±
17	4.46E-02	138 ±	1348 ±	157 ±
19	5.00E-02	156 ±	1524 ±	157 ±
21	5.53E-02	170 ±	1661 ±	158 ±
23	6.06E-02	184 ±	1798 ±	158 ±
25	6.59E-02	192 ±	1876 ±	159 ± 1
27	7.12E-02	196 ±	1915 ±	160 ± 2
29	7.65E-02	196 ±	1915 ±	163 ± 3
31	8.19E-02	196 ±	1915 ±	163 ± 3
33	8.72E-02	196 ±	1915 ±	165 ± 5
35	9.25E-02	197 ± 1	1925 ± 10	167 ± 4
38	1.01E-01	198 ± 2	1934 ± 20	168 ± 5
44	1.17E-01	200 ± 2	1954 ± 20	175 ± 7
52	1.39E-01	200 ± 2	1954 ± 20	180 ± 10
60	1.61E-01	202 ± 2	1973 ± 20	180 ± 15
68	1.85E-01	204 ± 3	1993 ± 29	190 ± 15
74	2.03E-01	206 ± 3	2013 ± 29	195 ± 15
78	2.16E-01	206 ± 4	2013 ± 39	195 ± 20

ENSAIO 4 - FIGURA 17

material: areia
 massa de sólidos : 2600 g
 pressão média no leito (Pa): 101325 Pa, supondo = 1 atm
 temperatura do leito: 26 °C
 densidade do ar: 1.179 kg/m³
 densidade da água: 995.7 kg/m³

Aumentando a Vazão				
Vazão		Queda de Pressão		Altura do Leito
Ql (lida)	Qr (real)			
(l/min)	(kg/m ³ .s)	(mmH ₂ O)	(Pa)	(mm)
12	3.13E-02	190 ±	1856 ±	250 ±
14	3.66E-02	218 ±	2129 ±	250 ±
16	4.20E-02	254 ±	2481 ±	250 ±
18	4.73E-02	298 ±	2911 ±	250 ±
20	5.26E-02	332 ±	3243 ±	250 ±
22	5.80E-02	356 ±	3477 ±	251 ±
24	6.33E-02	346 ± 2	3380 ± 20	256 ± 2
26	6.86E-02	346 ± 2	3380 ± 20	259 ± 4
28	7.39E-02	346 ± 2	3380 ± 20	262 ± 4
30	7.92E-02	340 ± 4	3321 ± 39	265 ± 5
32	8.45E-02	338 ± 4	3302 ± 39	265 ± 5
34	8.98E-02	338 ± 6	3302 ± 59	268 ± 5
40	1.06E-01	334 ± 10	3263 ± 98	273 ± 8
48	1.28E-01	326 ± 10	3184 ± 98	285 ± 10
56	1.50E-01	320 ± 10	3126 ± 98	300 ± 20
64	1.73E-01	310 ± 10	3028 ± 98	310 ± 20
72	1.97E-01	290 ± 10	2833 ± 98	310 ± 20
80	2.22E-01	286 ± 16	2794 ± 156	330 ± 30
100	2.91E-01	280 ± 10	2735 ± 98	350 ± 30
120	3.71E-01	276 ± 16	2696 ± 156	385 ± 45
140	4.65E-01	270 ± 10	2637 ± 98	385 ± 60
160	5.76E-01	270 ± 20	2637 ± 195	

Diminuindo a Vazão				
Vazão		Queda de Pressão		Altura do Leito
Ql (lida)	Qr (real)			
(l/min)	(kg/m ³ .s)	(mmH ₂ O)	(Pa)	(mm)
10	2.59E-02	138 ±	1348 ±	250
12	3.13E-02	168 ±	1641 ±	250
14	3.66E-02	192 ±	1875 ±	250
16	4.20E-02	216 ±	2110 ±	250
20	5.26E-02	266 ±	2598 ±	251 ± 1
24	6.33E-02	308 ± 2	3009 ± 20	258 ± 3
28	7.39E-02	304 ± 2	2970 ± 20	263 ± 3
32	8.45E-02	310 ± 4	3028 ± 39	265 ± 5
36	9.52E-02	306 ± 6	2989 ± 59	273 ± 8
40	1.06E-01	296 ± 6	2891 ± 59	280 ± 10
48	1.28E-01	298 ± 8	2911 ± 78	290 ± 10
56	1.50E-01	290 ± 10	2833 ± 98	300 ± 20
64	1.73E-01	290 ± 10	2833 ± 98	310 ± 20
72	1.97E-01	290 ± 10	2833 ± 98	320 ± 20

ENSAIO 5 - FIGURA 18

material: areia
 massa de sólidos : 2600 g
 pressão média no leito (Pa): 101325 Pa, supondo = 1 atm
 temperatura do leito: 22 °C
 densidade do ar: 1.195 kg/m³
 densidade da água: 996.7 kg/m³

Aumentando a Vazão				
Vazão		Queda de Pressão		Altura do Leito
Ql (lida)	Qr (real)			
(l/min)	(kg/m ² .s)	(mmH ₂ O)	(Pa)	(mm)
10	2.59E-02	174 ±	1701 ±	250 ±
12	3.13E-02	206 ±	2014 ±	250 ±
14	3.66E-02	244 ±	2386 ±	250 ±
16	4.20E-02	284 ±	2777 ±	250 ±
18	4.73E-02	316 ±	3090 ±	251 ±
20	5.26E-02	356 ±	3481 ±	251 ± 1
22	5.80E-02	322 ± 1	3149 ± 10	258 ± 1
24	6.33E-02	340 ± 2	3325 ± 20	259 ± 2
26	6.86E-02	340 ± 2	3325 ± 20	263 ± 3
28	7.39E-02	340 ± 4	3325 ± 39	267 ± 4
30	7.92E-02	336 ± 4	3285 ± 39	268 ± 4
32	8.45E-02	336 ± 4	3285 ± 39	268 ± 4
34	8.98E-02	334 ± 4	3266 ± 39	270 ± 5
36	9.52E-02	330 ± 4	3227 ± 39	275 ± 5
40	1.06E-01	326 ± 6	3188 ± 59	278 ± 8
48	1.28E-01	326 ± 8	3188 ± 78	280 ± 10
56	1.50E-01	310 ± 10	3031 ± 98	295 ± 15
64	1.73E-01	300 ± 10	2933 ± 98	305 ± 15
72	1.97E-01	290 ± 10	2836 ± 98	320 ± 20
80	2.22E-01	290 ± 14	2836 ± 137	320 ± 20
100	2.91E-01	286 ± 14	2797 ± 137	340 ± 30
120	3.71E-01	290 ± 16	2836 ± 156	365 ± 40
140	4.65E-01	290 ± 20	2836 ± 196	390 ± 40
160	5.76E-01	280 ± 80	2738 ± 782	400 ± 40

Diminuindo a Vazão				
Vazão		Queda de Pressão		Altura do Leito
Ql (lida)	Qr (real)			
(l/min)	(kg/m ² .s)	(mmH ₂ O)	(Pa)	(mm)
11	2.86E-02	150 ±	1467 ± 0	254 ±
13	3.39E-02	164 ±	1604 ±	254 ±
15	3.93E-02	200 ±	1956 ±	255 ±
17	4.46E-02	228 ±	2229 ±	255 ±
19	5.00E-02	256 ±	2503 ±	255 ±
21	5.53E-02	278 ±	2718 ±	256 ± 2
23	6.06E-02	302 ± 1	2953 ± 10	257 ± 3
25	6.59E-02	312 ± 1	3051 ± 10	260 ± 3
27	7.12E-02	310 ± 2	3031 ± 20	263 ± 4
29	7.65E-02	310 ± 2	3031 ± 20	265 ± 5
31	8.19E-02	308 ± 2	3012 ± 20	265 ± 5
33	8.72E-02	306 ± 4	2992 ± 39	270 ± 5
35	9.25E-02	304 ± 4	2973 ± 39	270 ± 8
38	1.01E-01	300 ± 4	2933 ± 39	275 ± 8
44	1.17E-01	296 ± 6	2894 ± 59	285 ± 8
52	1.39E-01	294 ± 8	2875 ± 78	290 ± 10
60	1.61E-01	294 ± 8	2875 ± 78	300 ± 15
68	1.85E-01	290 ± 10	2836 ± 98	320 ± 20
76	2.09E-01	290 ± 12	2836 ± 117	320 ± 20
90	2.55E-01	290 ± 20	2836 ± 196	330 ± 20
110	3.29E-01	290 ± 20	2836 ± 196	340 ± 30
130	4.16E-01	280 ± 30	2738 ± 293	380 ± 30
150	5.18E-01	280 ± 40	2738 ± 391	400 ± 30

ENSAIO 6 - FIGURA 19

material: areia
 massa de sólidos : 2600 g
 pressão média no leito (Pa): 101325 Pa, supondo = 1 atm
 temperatura do leito: 27.5 °C
 densidade do ar: 1.173 kg/m³
 densidade da água: 995.3 kg/m³

Diminuindo a Vazão				
Vazão		Queda de Pressão		Altura do Leito
Ql (lida)	Qr (real)			
(l/min)	(kg/m ² .s)	(mmH ₂ O)	(Pa)	(mm)
10	2.59E-02	152 ±	1484 ± 0	254 ±
12	3.13E-02	180 ±	1758 ±	254 ±
14	3.66E-02	210 ±	2051 ±	254 ±
16	4.20E-02	236 ±	2304 ±	254 ±
18	4.73E-02	262 ±	2558 ±	254 ±
20	5.26E-02	296 ±	2890 ±	255 ±
22	5.80E-02	324 ±	3164 ±	257 ± 1
24	6.33E-02	336 ±	3281 ±	259 ± 1
26	6.86E-02	339 ± 1	3310 ± 10	260 ± 3
28	7.39E-02	340 ± 1	3320 ± 10	263 ± 3
30	7.92E-02	340 ± 2	3320 ± 20	265 ± 4
32	8.45E-02	340 ± 2	3320 ± 20	267 ± 4
34	8.98E-02	340 ± 2	3320 ± 20	267 ± 5
36	9.52E-02	342 ± 2	3339 ± 20	270 ± 5
40	1.06E-01	344 ± 2	3359 ± 20	275 ± 8
48	1.28E-01	348 ± 3	3398 ± 29	285 ± 10
56	1.50E-01	352 ± 4	3437 ± 39	290 ± 10
64	1.73E-01	358 ± 6	3496 ± 59	305 ± 15
72	1.97E-01	362 ± 8	3535 ± 78	320 ± 20
80	2.22E-01	364 ± 8	3554 ± 78	325 ± 30

ENSAIO 7 - FIGURA 20

material: areia
 massa de sólidos : 2600 g
 pressão média no leito (Pa): 101325 Pa, supondo = 1 atm
 temperatura do leito: 22 °C
 densidade do ar: 1.195 kg/m³
 densidade da água: 996.7 kg/m³

Aumentando a Vazão					Diminuindo a Vazão				
Vazão		Queda de Pressão		Altura do Leito	Vazão		Queda de Pressão		Altura do Leito
Ql (lida)	Qr (real)				Ql (lida)	Qr (real)			
(l/min)	(kg/m ² .s)	(mmH ₂ O)	(Pa)	(mm)	(l/min)	(kg/m ² .s)	(mmH ₂ O)	(Pa)	(mm)
10	2.59E-02	176 ±	1721 ± 0	250 ±	11	2.86E-02	160 ±	1564 ±	250 ±
12	3.13E-02	204 ±	1995 ±	250 ±	13	3.39E-02	194 ±	1897 ±	251 ±
14	3.66E-02	242 ±	2366 ±	250 ±	15	3.93E-02	220 ±	2151 ±	251 ±
16	4.20E-02	282 ±	2757 ±	250 ±	17	4.46E-02	248 ±	2425 ±	251 ±
18	4.73E-02	316 ±	3090 ±	250 ±	19	5.00E-02	278 ±	2718 ±	252 ± 1
20	5.26E-02	344 ±	3364 ±	250 ±	21	5.53E-02	306 ±	2992 ±	252 ± 2
22	5.80E-02	340 ± 2	3325 ± 20	255 ± 1	23	6.06E-02	326 ± 1	3188 ± 10	255 ± 3
24	6.33E-02	342 ± 2	3344 ± 20	258 ± 2	25	6.59E-02	327 ± 1	3197 ± 10	258 ± 4
26	6.86E-02	346 ± 2	3383 ± 20	260 ± 3	27	7.12E-02	329 ± 1	3217 ± 10	260 ± 4
28	7.39E-02	348 ± 4	3403 ± 39	263 ± 4	29	7.65E-02	330 ± 1	3227 ± 10	263 ± 5
30	7.92E-02	348 ± 4	3403 ± 39	265 ± 5	31	8.19E-02	331 ± 1	3237 ± 10	265 ± 5
32	8.45E-02	350 ± 4	3422 ± 39	267 ± 5	33	8.72E-02	330 ± 2	3227 ± 20	268 ± 5
36	9.52E-02	352 ± 4	3442 ± 39	±	36	9.52E-02	332 ± 4	3246 ± 39	270 ± 8
40	1.06E-01	352 ± 6	3442 ± 59	277 ± 8	44	1.17E-01	336 ± 4	3285 ± 39	280 ± 10
48	1.28E-01	352 ± 6	3442 ± 59	285 ± 10	52	1.39E-01	340 ± 6	3325 ± 59	290 ± 10
56	1.50E-01	352 ± 8	3442 ± 78	295 ± 15	60	1.61E-01	348 ± 8	3403 ± 78	305 ± 15
64	1.73E-01	350 ± 10	3422 ± 98	310 ± 20	68	1.85E-01	350 ± 8	3422 ± 78	320 ± 20
72	1.97E-01	352 ± 10	3442 ± 98	320 ± 20	76	2.09E-01	354 ± 10	3461 ± 98	330 ± 20
80	2.22E-01	354 ± 10	3461 ± 98	325 ± 25	90	2.55E-01	370 ± 16	3618 ± 156	330 ± 20
100	2.91E-01	360 ± 10	3520 ± 98	330 ± 30	110	3.29E-01	370 ± 30	3618 ± 293	355 ± 25
120	3.71E-01	360 ± 10	3520 ± 98	365 ± 30	130	4.16E-01	370 ± 30	3618 ± 293	375 ± 30
140	4.65E-01	370 ± 30	3618 ± 293	385 ± 35	150	5.18E-01	370 ± 30	3618 ± 293	410 ± 40
160	5.76E-01	380 ± 40	3716 ± 391	425 ± 50					

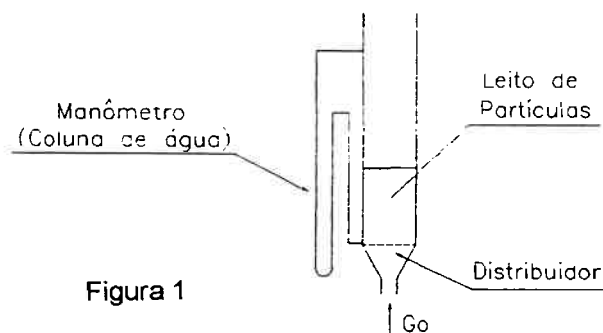
ANEXO 6

PROPOSTA PARA AULAS DE LABORATÓRIO

1. INTRODUÇÃO

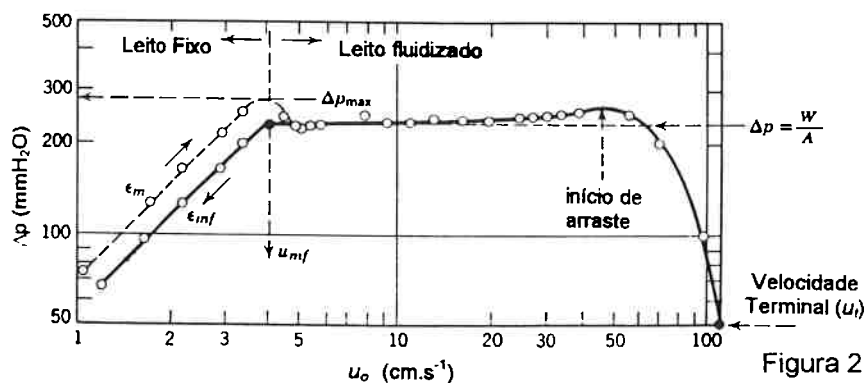
Os leitos fluidizados são sistemas sólido-gás ou sólido-líquido que apresentam comportamento líquido. Isto pode ser feito através da passagem contínua de um fluido líquido ou gasoso através de um leito de partículas sólidas.

Os leitos fluidizados são bons trocadores de calor e de massa e por isso são empregados tanto como trocadores de calor como em reatores químicos, onde grandes quantidades de calor devem ser retiradas ou fornecidas ao sistema e onde o controle de temperatura é importante.



A figura 1 apresenta um esquema básico de um leito fluidizado experimental. O fluido (neste estudo, ar comprimido) é introduzido no leito de partículas através do distribuidor. Para uma dada vazão G_0 , corresponde uma queda de pressão no leito, medido pela coluna de água.

Medindo-se a queda de pressão no leito (Δp) para vazões crescentes do fluido, obtém-se a curva $\Delta p \times G_0$ ou $\Delta p \times u_0$ (onde u_0 é a velocidade do fluido) como mostra a figura 2. Inicialmente, há pouca ou nenhuma agitação dos sólidos, e Δp é linear e crescente com u_0 e o leito é dito leito fixo. A partir de uma determinada vazão do fluido, o peso de sólidos equilibra-se com a força de arraste do gás. Esta é a condição de mínima fluidização. A partir de então, Δp mantém-se constante apesar do aumento da vazão pois o leito sofre expansão.



A intersecção das curvas correspondentes às regiões de leito fixo e leito fluidizado permitem a determinação da vazão ou velocidade do fluido na condição de mínima fluidização.

O início da fluidização ocorre quando a força de arraste exercida pelo fluido iguala-se ao peso da partículas do leito⁽¹⁾:

$$\Delta p . A_t = W = (A_t . L_{mf}) . (1 - \varepsilon_{mf}) . [(\rho_s - \rho_g) . g] \dots\dots\dots (1)$$

$$W = A_t . L_{mf} . (1 - \varepsilon_{mf}) . (\rho_s - \rho_g) . g \dots\dots\dots (2)$$

ou

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) . (\rho_s - \rho_g) . g \dots\dots\dots (3)$$

Onde: Δp : queda de pressão no leito (Pa)

A_t : área da secção transversal do leito (m²)

W : peso de partículas do leito (N)

L_{mf} : altura do leito na condição de mínima fluidização (m)

ε_{mf} : fração de vazios do leito na condição de mínima fluidização.

ρ_s, ρ_g : massas específicas do sólido e do gás, respec/te. (kg.m⁻³)

g : aceleração da gravidade (m.s⁻²)

A equação de Ergun⁽¹⁾ é a expressão mais aceita para a velocidade de mínima fluidização:

$$\frac{1,75}{\phi_s . \varepsilon_{mf}^3} \cdot \left(\frac{\overline{d_p} . u_{mf} . \rho_g}{\mu_g} \right)^2 + \left(\frac{150 . (1 - \varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 . \varepsilon_{mf}^3} \right) \left(\frac{\overline{d_p} . u_{mf} . \rho_g}{\mu_g} \right) = \frac{\overline{d_p}^3 . \rho_g . (\rho_s - \rho_g) . g}{\mu_g^2} \dots\dots\dots (4)$$

Onde: $\overline{d_p}$: diâmetro médio de partícula (m)

ϕ_s : fator de forma das partículas (adim)

μ_g : viscosidade do fluido (kg.m⁻¹.s⁻¹)

Esta equação é útil para fazer previsões das vazões necessárias para fluidização de um determinado sólido. Entretanto, o uso desta equação exige o conhecimento prévio de algumas propriedades do sólido ($\overline{d_p}, \phi_s, \varepsilon_{mf}, \rho_s$).

O objetivo do trabalho experimental consiste em determinar as características de fluidização do sólido ($\overline{d_p}, \varepsilon_{mf}, \rho_s, u_{mf}$), estimar o fator de forma ϕ_s da partícula e discutir a qualidade de fluidização através da curva $\Delta p \times G_o$.

2.PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Diâmetro médio de partícula

- determinar a distribuição granulométrica de uma amostra de areia, segundo a norma ASTM B 214-76 (*Annual Book of ASTM Standards*)
- calcular o diâmetro médio de partícula (vide referência 1).
- anotar os dados na tabela em anexo.

2.2. Massa específica do sólido

- a massa específica do sólido particulado é determinado através de ensaio de picnometria, segundo a norma ABNT.NBR 6221 - Dez.1980. A referência 2 apresenta um resumo do procedimento para o ensaio picnométrico, bem como o aparato experimental necessário.
- realizar pelo menos três medidas, anotando os resultados na tabela em anexo.

2.3. Levantamento das curvas de fluidização e determinação de u_{mf}

O leito desta experiência foi objeto de estudo da referência 3, estando disponível no Hall Tecnológico do Dep^{to} de Eng. Metalúrgica e de Materiais.

2.3.1. Instalação do distribuidor

- colocar a placa do distribuidor entre as flanges na base do leito, juntamente com os anéis de vedação de borracha. Rosquear a conexão que fixa as duas flanges. O aperto da conexão deve ser feito com o leito na posição horizontal, com o auxílio da chave que acompanha o equipamento. Após a fixação do distribuidor, retornar o leito à posição vertical. Ajustar o prumo do leito, soltando as porcas borboleta e alterando sua inclinação de modo que fique na vertical.

2.3.2. Controle de vazão

- conectar a mangueira de entrada do leito na saída do conjunto de rotâmetros.
- a pressão nos rotâmetros deve ser mantida em 2 kg.cm^{-2} , através do manômetro analógico localizado na entrada do conjunto de rotâmetros.
- a vazão medida nos rotâmetros é controlada através das válvulas localizadas na entrada e na saída de cada um dos rotâmetros. A válvula de entrada (inferior ao rotâmetro) deve ser mantida sempre aberta e a de saída (superior ao rotâmetro), inicialmente fechada. O ajuste da vazão deve ser feito abrindo-se gradativamente a válvula de saída até o marcador do rotâmetro atingir a vazão desejada na escala.

2.3.3. Levantamento das curvas

- carregar o leito com uma massa conhecida de sólidos (1.5 a 2.5 kg). O distribuidor já deve estar instalado. Senão, retornar ao item 2.3.3.
- conectar uma das mangueiras do manômetro na 5ª tomada de pressão, contando de cima para baixo no leito. A outra mangueira deve ser conectada numa tomada situada acima do nível de sólidos afastada pelo menos 10cm. As demais tomadas de pressão devem ser vedadas com pinos existentes nas tomadas de pressão.
- abrir a válvula da linha de ar comprimido situada na entrada do conjunto de rotâmetros. Regular a pressão nos rotâmetros em 2 kg.cm^{-2} . Abrir a válvula inferior do rotâmetro de $8-80 \text{ l.min}^{-1}$, mantendo a válvula superior fechada.
- abrir gradativamente a válvula superior até o início de borbulhamento do leito, mantendo nesta vazão por aproximadamente 20 segundos. Diminuir a vazão até fechar a válvula.
- anotar a altura inicial do leito.
- abrir a válvula até a menor leitura do rotâmetro. Manter durante alguns segundos, anotando a vazão lida, a queda de pressão e a altura. Repetir o procedimento para vazões crescentes. O intervalo entre vazões consecutivas deve ser pequeno até o início da fluidização, por exemplo, de duas em duas unidades da escala. O início da fluidização pode ser visualizada através da formação de bolhas no leito. Após o início da fluidização, os intervalos podem ser maiores. Em vazões altas, pode ocorrer oscilação da altura do leito e da queda de pressão. Neste caso, anotar os valores máximo e mínimo, calcular a média e o desvio. Repetir todo o procedimento anterior para vazões decrescentes.
- no decorrer dos ensaios, anotar a temperatura do leito.
- anotar os dados na tabela em anexo.

3. Tratamento dos dados e discussão

- calcular o diâmetro médio de partícula com os dados da distribuição granulométrica na tabela em anexo.
- calcular a média da massa específica dos três ensaios de picnometria na tabela em anexo.

3.1. Curvas de fluidização

- corrigir a vazão lida no rotâmetro (Q_l , l.min^{-1}) através da curva de aferição do rotâmetro. Esta correção é feita através de um polinômio (vide ref.3, p.16), obtendo-se a vazão real (Q_r), em kg.h^{-1} . Dividir a vazão real (Q_r) pela área da secção transversal do leito, obtendo-se a vazão mássica por unidade de área do leito (G_o , $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Transformar as unidades para o sistema internacional, anotando os valores na tabela em anexo.

- converter a queda de pressão, lida em mmH₂O, para a unidade do sistema SI ($\Delta p = h \times \rho_{H_2O} \times g$, Pa), anotando os valores na tabela em anexo. A massa específica da água é função da temperatura, e seu cálculo pode ser feito com o auxílio do anexo 3 da referência 3.
- levantar a curva $\Delta p \times G_o$, em papel di-log para vazões crescentes e decrescentes. Determinar a intersecção das retas correspondentes ao leito fixo e fluidizado, determinando G_{mf} (vazão de mínima fluidização). G_{mf} deve ser determinado para a curva com vazões decrescentes. A velocidade de mínima fluidização (u_{mf}) é obtida dividindo-se G_{mf} pela massa específica do ar. Traçar no mesmo gráfico uma reta horizontal com o valor da ordenada igual ao peso de sólidos dividido pela área do leito. Esta reta horizontal corresponde à queda de pressão esperada quando todo o sólido encontra-se fluidizado. A curva experimental coincide com esta reta? Discuta.
- calcular a fração de vazios do leito, através da eq. 2.
- através da eq. de Ergun (eq. 4), calcular o fator de forma ϕ_s . A massa específica e a viscosidade do ar pode ser obtida com o auxílio dos anexos 3 e 4 da referência 3. Qual o significado de ϕ_s ? Observar as partículas ao microscópio ou com uma lupa e comparar com o valor de ϕ_s obtido. A referência 1 (p.73) apresenta uma simplificação para equação de Ergun, em função do número de Reynolds de partícula (Rep)
- calcular o número de Froude [$Fr = u_{mf}^2 / (g \cdot dp)$]. Qual o seu significado? O valor obtido é coerente com as observações visuais do leito?

4. Referências

1. KUNII, D; e LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. Florida, Robert E. Krieger Publishing Company Inc, 1987 (reedição, 1969). p.64-107.
2. Nascimento Jr, R.C.N. **Estudo Experimental da Pelotização de Finos de Minérios de Manganês**. Dissertação de mestrado, 1983
3. Cintho, E.M. **Projeto e Construção de um Leito Fluidizado para Aulas Demonstrativas**. Trabalho de Formatura, 1996

Tabela para determinação da massa específica real do sólido						
ensaio	temperatura	$\rho_{(H_2O)}$	massa de sólidos	massa picnôm. cheio de água	massa picn. c/ água+sólidos	massa específica do sólido
1						
2						
3						

[illegible]

Tabela para levantamento das curvas de fluidização				
material:		massa específica do ar:		
massa de sólidos:		massa específica da água:		
temperatura do leito:				
Aumentando a vazão				
Vazão		Queda de pressão		Altura do leito
Ql (lida)	Go (real)	mmH ₂ O	Pa	mm
l.min ⁻¹	kg.m ⁻² .s ⁻¹			
10		±	±	±
12		±	±	±
14		±	±	±
16		±	±	±
18		±	±	±
20		±	±	±
22		±	±	±
24		±	±	±
26		±	±	±
28		±	±	±
30		±	±	±
32		±	±	±
36		±	±	±
40		±	±	±
48		±	±	±
56		±	±	±
64		±	±	±
72		±	±	±
80		±	±	±

Tabela para levantamento das curvas de fluidização				
material:		massa específica do ar:		
massa de sólidos:		massa específica da água:		
temperatura do leito:		Diminuindo a vazão		
Vazão		Queda de pressão		Altura do leito
Ql (lida)	Go (real)			
l.min^{-1}	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	mmH_2O	Pa	mm
11		±	±	±
13		±	±	±
15		±	±	±
17		±	±	±
19		±	±	±
21		±	±	±
23		±	±	±
25		±	±	±
27		±	±	±
29		±	±	±
31		±	±	±
33		±	±	±
36		±	±	±
44		±	±	±
52		±	±	±
60		±	±	±
68		±	±	±
76		±	±	±
80		±	±	±

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DAVIDSON, J.F. e HARRISON, D. **Fluidization**. Academic Press (Londres), 1971, p.27-63.
2. GELDART, D. **Gas Fluidization Technology**. John Wiley & Sons, 1986 p.1-73
3. LEVA, M, et al. **Introduction to Fluidization**. Chem. Eng. Progress, V.44, N.7, julho 1948, p.511-520.
4. KUNII, D; e LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. Florida, Robert E. Krieger Publishing Company Inc, 1987 (reedição,1969). p.64-107.
5. ERGUN, S. **Fluid Flow Through Packed Columns**. Chem. Eng. Progress, V.48, N.2, fev.1952, p.91-94.
6. LEVA, M. **Pressure Drop Through Packed Tubes - Part 1. A General Correlation**. Chem. Eng. Progress - Trans. Section, V.43, N.10, out.1947, p.549-554.
7. CHEREMINISINOFF, N.P. e CHEREMINISINOFF, P.N. **Hydrodynamics of Gas-solids Fluidization**. Houston, Gulf Publishing Company, 1984. p. 137-158
8. WEN, C.Y. e Yu, Y.H. **A Generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity**. A.I.Ch.E. Journal, maio 1966, V.12, N.3, p.610-612.
9. WILHELM, R.H. e KWAUK, M. **Fluidization of Solids Particles**. Chem. Eng. Progress, V.44, N.3, março 1948, p.201-218.
10. IMAMURA, G. M. **Estudo Experimental da Temperatura em Leito Fluidizado**. Dissertação de Mestrado, EPUSP, 1985.
11. ASTM. B 214 - 76. **Annual Book of ASTM Standards**. Part 9, 1982.
12. ABNT. NBR 6221 - Dez./1980. **Material Refratário - Determinação da Massa Específica Real (Método do Picnômetro)**.
13. GEIGER e POIRIER. **Transport Phenomena in Metallurgy**. Addison-Wesley, 1973, p.3-35.
14. VOGUEL . **Análise Química Quantitativa**. Guanabara , 5ª edição, 1992, p.74