

30/10

BR8105009

INIS-nd--6669

LEOPOLDINO DOS SANTOS FERREIRA

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS CONVENCIONAIS E RÁDIOISOTÓPICAS
NO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM SÓLIDO PARTICULADO.**

**TESE DE LIVRE DOCÊNCIA APRE-
SENTADA À UFPa., PARA OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE LIVRE-DOCÊNCIA.**

1976

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS CONVENCIONAIS E RADIOISOTÓPICAS NO

COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM SÓLIDO PARTICULADO.

Leopoldino dos Santos Ferreira.

R E S U M O

O comportamento de sólidos particulados foi estudado neste trabalho, com o objetivo de determinar experimentalmente a queda de pressão através de orifícios na base de um Hopper e se fazer uma estimativa da porosidade na região de descarga com o uso de radioelementos. Foi também introduzido um método para a verificação da independência da vazão em relação à profundidade do leito.

As experiências foram realizadas no INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR DO RIO DE JANEIRO (IEN - NUCLEBRAS) com material e equipamento deste Instituto.

Os resultados obtidos com o uso de técnicas radioisotópicas concordam com as técnicas convencionais empregadas por outros autores.

so sólidos PEL

A B S T R A C T

The behavior of solids in particle phase was studied with the purpose of determining the drop pressure through orificius of a Hopper, with conventional techniques as well as a new technique with radioisotopes to measure the porosity near the orifice of the Hopper. The rate of discharge was also studied.

The experiments were made at INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR (IEN - NUCLEBRAS), in Rio de Janeiro.

The use of radioisotopes presented similar results as those (studied) elsewhere by conventional techniques.



I N D I C E

CAPÍTULOS: *****	PÁGINAS *****
I. INTRODUÇÃO:	01
1.1 - Generalidades	01
1.2 - Objetivo do Estudo	01
1.3 - Organização do Trabalho	02
II. REVISÃO DA LITERATURA	03
2.1 - Descarga através de Orifícios	03
2.2 - Queda de Pressão no Orifício de um Hopper ...	10
III. TRABALHO EXPERIMENTAL	12
3.1 - Equipamento Utilizado	12
3.2 - Determinação da Queda de Pressão no Orifício de um Hopper	12
3.3 - Resultados	14
3.4 - Verificação da Independência da Vazão de Sólidos particulados (Alumina) em relação à profundidade do leito	14
3.5 - Resultados	16
3.6 - Estimativa da Porosidade em Torno do orifício da base de um Hopper, utilizando radioisótopos	16
3.7 - Resultados	23
IV - DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

- INTRODUÇÃO
.....

1.1 Generalidades:

Até agora não existe uma base sólida teórica em que se possa estruturar uma dinâmica de partículas materiais que se apresentam na forma granular, tal como já existe para uma mistura de um fluido com sólidos particulados. Pode-se dizer que uma substância na forma granular não se comporta nem como um fluido, nem como um sólido. Como exemplo, uma substância que tenha a textura de um pó fino, apresenta uma superfície que pode estar em qualquer ângulo de inclinação menor ou igual ao ângulo de repouso, o que não ocorre com um líquido, se ambos estão no mesmo campo gravitacional.

Muitas substâncias em pó apresentam pouca resistência a tensão, podendo haver expansão pelo menos em regiões localizadas, mudando assim de forma.

O movimento de uma substância granular através de um orifício feito na base de um recipiente é bem diferente daquele que se observa com um líquido. Pode-se dizer que um sólido particulado se comporta como se fosse um sólido plástico. A principal diferença é que a tensão produzida em uma massa granular é função da pressão que atua normalmente sobre sua superfície.

1.2 Objetivo do estudo:

Este trabalho visa fazer o estudo experimental da queda de pressão através de orifícios na base de um Hopper devido a vazão de sólidos particulados e fazer uma estimativa da porosidade em torno de cada orifício, usando radioisótopos.

O uso de radioisótopos surgiu da necessidade de se comparar os resultados obtidos com aqueles obtidos por outros autores através de modelos e técnicas convencionais.

1.3 Organização do trabalho:

No capítulo II se faz uma revisão da literatura, apresentando-se modelos para descarga de sólidos particulados através de orifícios.

No capítulo III se faz a apresentação do equipamento e material utilizado, as experiências de laboratório e os resultados obtidos.

A discussão dos resultados e as conclusões são apresentados no capítulo IV.

- R E V I S Ã O D A L I T E R A T U R A

2.1 Descarga através de aberturas

Quando um fluxo de material granular através de um orifício está plenamente desenvolvido, o movimento das partículas é representado conforme o modelo da figura (2.1) [1].

As partículas se movem ao longo da parte superior da região A; esta região se move como um todo sobre a região B; a região B desliza mais vagarosamente sobre a região E, que fica estacionária

Ocasionalmente as regiões A e B se fundem e algumas vezes aparece uma outra região entre eles, porém, de um modo geral o modelo da figura (2.1) é representativo deste fenômeno. Os ângulos de inclinação que são tangentes à curvatura superior da região A, como também as fronteiras entre as regiões A e B e entre as regiões B e E permanecem essencialmente constantes, desde que a descarga através do orifício não sofra solução de continuidade e em todos os casos os ângulos de inclinação excedam o ângulo estacionário de repouso. A região C é composta de partículas provenientes das regiões A e B que se movem para dentro e para baixo com uma velocidade crescente. Na região D as partículas se movem muito mais rapidamente, porém com uma velocidade da ordem de 1/4 da velocidade em queda livre.

A região D se expande e se contrai continuamente, podendo ocasionalmente se estender à superfície livre da região A. Durante o processo inicial da vazão, pode haver uma tendência para uma forma assimétrica de descarga, o que foi observado neste trabalho. Com a continuação do processo, as regiões A e B se uniformizam, alimentando a região C, que por sua vez alimenta a região D.

Para pequenos intervalos de tempo, a taxa de descarga de partículas livres no orifício é aparentemente cons-

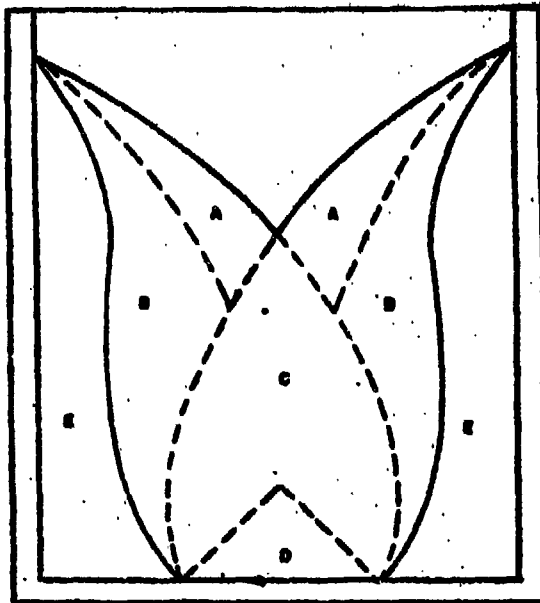


FIGURA 2.1 - Modelo de fluxo de material. 372
nular através de um orifício.

tante. Entretanto, filmes de alta velocidade tiradas do vértice da região D, revelam a existência de um vazio flutuante criado por ondas que passam continuamente através do material granular. Provavelmente, cada onda resulta de uma compressão periódica das partículas em forma de pacote, quando as partículas se movem de cima para dentro, sendo que a compressão é desfeita quando as partículas são soltas na parte inferior, próxima ao orifício.

Apresentamos um resumo dos resultados experimentais e as conclusões obtidas por diversos autores citados nas REFERÊNCIAS deste trabalho:

- (a) De modo geral, a taxa de fluxo de materiais granulares varia aproximadamente com o cubo do diâmetro do orifício e independe da altura do leito do material considerado;
- (b) A taxa de descarga independe do diâmetro do recipiente e da altura do material, desde que o diâmetro do recipiente seja maior ou aproximadamente igual a 1,3 vezes o diâmetro do orifício e a altura do leito maior que duas vezes este diâmetro;
- (c) No nível do orifício existe um "anel" através do qual não há vazão de partículas, apresentando uma largura aproximadamente igual a $0,6 d$, onde d é o diâmetro médio das partículas. Este anel independe da forma do orifício, porém depende das propriedades das partículas.
- (d) O fluxo de partículas através do orifício, quando observado em pequenos intervalos de tempo não é uniforme, mas espasmódico. Os grãos que formam o material, ao se moverem para baixo e para dentro do leito formam provavelmente uma abóboda sobre o orifício, durante um intervalo de tempo da ordem de milisegundos. Logo após sua formação, a abóboda se rompe liberando material, começando em seguida a formação de outra abóboda.
- (e) Com partículas grossas, o fluxo se torna irregular quando $D = 6d$, onde D é o diâmetro médio do orifício e d o diâmetro médio das partículas. Quando $D \leq 4d$ pode haver bloqueio no fluxo. Como o anel que se forma em torno do orifício tem a espessura igual a $0,6 d$, é provável que não seja a forma-

ção do anel mas a ocorrência da abóboda que determina o menor orifício através do qual há vazão de material [2].

- (f) O número de partículas que passa por unidade de tempo através de um elemento de área dA é função da distância x entre esta área e a borda da abertura, sendo denotado por $n(x)dA$. Foi verificado experimentalmente que $n(x)$ é proporcional a \sqrt{x} e a \sqrt{g} , onde g é a aceleração normal da gravidade. A proporcionalidade a \sqrt{g} foi deduzida a partir da análise dimensional [3], enquanto que a proporcionalidade a \sqrt{x} foi verificada por Brown e Richards [1, 4]. O número $n(x)$ também não depende da forma do orifício.
- (g) Foi verificado experimentalmente que a taxa de descarga independe da densidade inicial e do material usado [4].

O material granular apresenta as seguintes características:

- (i) Massa específica ρ ;
- (ii) Diâmetro médio d das partículas, definido como a média aritmética relativa a um sistema de crivos;
- (iii) Ângulo estático de repouso α , ou o fator de atrito $f = \tan \alpha$.

Os itens (c) e (d) indicam que o movimento real da partícula é provavelmente complexo. O fluxo apresenta um caráter pulsante, isto é, as partículas caem de uma superfície instável, sendo quase certo que as partículas adquirem uma velocidade inicial quando a superfície entra em colapso. As partículas evitam o anel vazio cuja espessura depende da natureza da partícula. Durante a queda é provável a ocorrência de interação entre as partículas.

O movimento complexo das partículas exige um tratamento simples com algumas simplificações. Pode-se imaginar em princípio, que o movimento das partículas é caracterizado por um fluxo contínuo a partir de um cone hipotético sobre o orifício (figura 2.2), com velocidade inicial nula e sem interação entre as partículas.

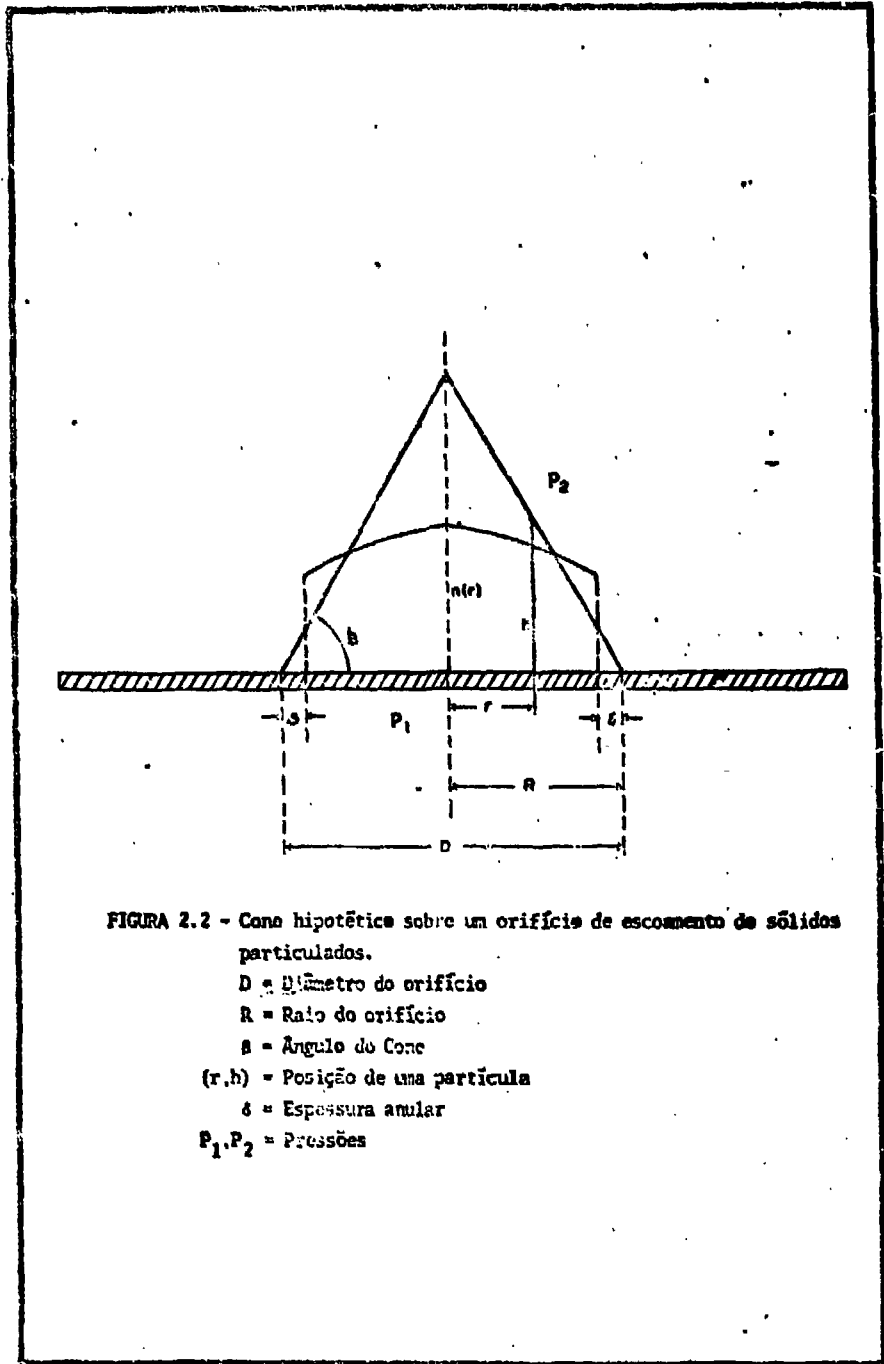


FIGURA 2.2 - Cone hipotético sobre um orifício de escoamento de sólidos particulados.

- D = Diâmetro do orifício
- R = Raio do orifício
- θ = Ângulo do Cone
- (r, h) = Posição de uma partícula
- δ = Espessura anular
- P_1, P_2 = Pressões

Este cone hipotético substitue a abóboda e se apoia nas bordas do orifício (região D da figura 2.1). A contribuição do fluxo devido ao anel vazio é desprezada, pois é provável que as partículas evitam o anel da descarga. O número de partículas por unidade de volume ao nível do orifício é suposto constante e inversamente proporcional ao volume médio V da partícula. Esta hipótese é razoável pois quanto maior o volume das partículas, mais difícil é o escoamento.

A partir da figura (2.2) obtém-se uma fórmula que dá a taxa de escoamento do material granular através de um orifício circular situado na base de um cilindro de seção reta, em função da diferença de pressão $\Delta p = p_2 - p_1$, onde p_2 é a pressão em torno do cone e p_1 é a pressão na base ao nível do orifício [5]. Uma partícula que está a uma altura h acima do nível do orifício inicia seu movimento descrito pela equação (2.1)

$$m v \frac{dv}{dz} = mg + \frac{dp}{dz} \Delta z A_p g_s + F_D g_s + F_p g_s \quad (2.1)$$

onde:

- g_s = constante gravitacional
- g = aceleração local da gravidade
- F_D = força de arrasto
- F_p = força exercida sobre a partícula pelas partículas vizinhas
- Δz = diâmetro médio das partículas. Para partículas esféricas $\Delta z = dp$
- A_p = área de projeção da partícula

De um modo geral, a equação (2.1) apresenta as seguintes dependências em relação às suas grandezas físicas:

- (i) A força F_p apresenta algum valor diferente de zero, se o meio não for fluidizado. Neste trabalho usamos um fluido (ar) através da massa granular, sem dar as características de fluidização do leito, pois há escoamento dos grãos através de um orifício. Entretanto esta força não deve ser de grande intensidade, pois de algum modo as partículas se encontram relativamente afastadas. Desprezamos esta força, pois não se conhece a sua dependência e é provável que seja rela

tivamente fraca.

(ii) A força F_D pode ser desprezada pois neste trabalho utilizamos um fluido com velocidade baixa. Entretanto, sabe-se que esta força depende de $(v-u)$, isto é, $F_D = f(v-u)$, onde u é a velocidade do fluido na direção z e v é a velocidade da partícula que depende de z . Quando assumimos que $F_D \approx 0$, estamos supondo que $v = u$.

Considerando que as partículas são esféricas com diâmetro médio d e integrando a equação (2.1), tem-se:

$$v = \left\{ 2h \left(g + \frac{\Delta p A_p g_s}{m} \right) \right\}^{1/2} \quad (2.2)$$

onde:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{dp}{dz} d = \text{queda de pressão no orifício.}$$

A figura (2.2) fornece a relação

$$h = (R - r) \operatorname{tg} \beta \quad (2.3)$$

Substituindo-se esta relação na equação (2.2), obtém-se o perfil de velocidade ao longo do raio do orifício.

$$v = \left\{ 2 (R-r) \operatorname{tg} \beta \left(g + \frac{\Delta p A_p g_s}{m} \right) \right\}^{1/2} \quad (2.4)$$

Assumimos inicialmente que o número de partículas, por unidade de volume, com velocidade v ao nível do orifício é constante e inversamente proporcional a V . Portanto

$$n(r) = \frac{C}{V} \left\{ 2(R-r) \operatorname{tg} \beta \left(g + \frac{\Delta p A_p g_s}{m} \right) \right\}^{1/2} \quad (2.5)$$

O número de partículas por unidade de tempo N é obtido a partir da equação (2.5), integrando-se sobre a área efetiva do orifício, ou seja:

$$N = \int_0^{R-\delta} 2 \pi r n(r) dr \quad (2.6)$$

donde:

$$N = \frac{4 C_1 A_s \sqrt{D}}{15 v} \left(g + \frac{\Delta p A_p g_s}{m} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{5}{2} \left(\frac{\delta}{R} \right)^{1.5} + \frac{3}{2} \left(\frac{\delta}{R} \right)^{2.5} \right) \quad (2.7)$$

onde:

$$C_1 = 2c \sqrt{t g \beta} = \text{constante característica do material}$$

$$A_s = \pi R^2 = \text{área do orifício}$$

Como $\delta/R = 0.1$, pode-se desprezar $\frac{3}{2} \left(\frac{\delta}{R} \right)^{2.5}$ em relação a $\frac{5}{2} \left(\frac{\delta}{R} \right)^{1.5}$. Multiplicando a equação (2.7) pela massa média m da partícula e sendo $\rho = m/v^*$ (massa específica média), obtém-se a taxa de fluxo W das partículas através do orifício.

$$W = A (g + B \Delta p)^{1/2} \quad (2.8)$$

onde:

$$A = \rho A_s C_2 \left\{ 1 - 5\sqrt{2} \left(\frac{\delta}{D} \right)^{1.5} \right\} \sqrt{D}$$

$$C_2 = 4 C_1 / 15$$

$$B = A_p g_s / m$$

A equação (2.8) mostra que W é função de Δp . Na ausência de um fluido considera-se $\Delta p = 0$ [2], isto é, as pressões acima do cone e no nível do orifício são iguais e as partículas atravessam o orifício somente sob a ação da gravidade, apresentando um escoamento relativamente livre.

2.2 Queda de pressão no orifício de um Hopper:

A geometria da figura (2.1) mostra que é difícil se calcular a queda de pressão no orifício. Neste caso, faz-se uma determinação indireta introduzindo-se outros parâmetros, isto é, se P_3 é a pressão acima de um leito granular com-

pacto, $p_3 - p_2$ da a diferença de pressão para o gás através do leito. Somando $p_3 - p_2$ a $p_2 - p_1$ obtêm-se a diferença $\Delta p = p_3 - p_1$ que pode ser determinada com um manômetro. A partir da equação (3.1) de Carmen Kozeny [6] para o caso de fluxo laminar, pode-se inferir uma equação para a descarga de material granular através do orifício de um Hopper, quando um fluido atravessa o leito.

$$p_3 - p_2 = H v_0 \quad (2.9)$$

onde:

v_0 é a velocidade do fluido em um cilindro livre de partículas e H é a altura do leito.

Se v_0 é constante, a queda de pressão é proporcional a altura do leito acima do orifício. A partir de dados experimentais tem-se verificado que W independe de H para um determinado fluxo de gás, isto é, $p_2 - p_1$ é constante.

Sendo $p_3 - p_1 = (p_3 - p_2) + p_2 - p_1$, tem-se:

$$p_3 - p_1 = KH + p_2 - p_1, \text{ isto é:}$$

$$\Delta p = KH + \Delta p \quad (2.10)$$

onde:

K é a constante de proporcionalidade da equação (2.9).

A equação (2.10) mostra que pode se determinar $p_2 - p_1 = \Delta p$, pois $p_3 - p_1$ é conhecido.

TRABALHO EXPERIMENTAL

Procedemos agora a parte experimental com os objetivos seguintes:

- (a) - Verificação dos resultados experimentais obtidos por outros autores seguindo técnicas convencionais;
- (b) - Introdução de uma técnica empregando material radioativo visando a determinação de porosidade em torno do orifício de um Hopper.

3.1 - Equipamento e Material Utilizado:

Este trabalho foi feito com a colaboração do Instituto de Energia Nuclear do Rio de Janeiro, que colocou em disponibilidade os materiais e equipamentos seguintes:

1. Manômetro;
2. Rotâmetro;
3. Compressor;
4. Balança de Precisão;
5. Cronômetro;
6. Fonte Radioativa: ^{170}Tm (84 keV) e ^{90}Sr (540 keV);
7. Detetores de Cintilação NaI (TI) marca Harshaw e Saphymo - Srat SPP - 3;
8. "Scaler" marca Hewlett - Packard;
9. Registrador Gráfico marca Hewlett - Packard;
10. "Rateometer" marca Saphymo - Srat SPP - 3;
11. Sólido Particulado: Alumina (Al_2O_3) com $d_m = 80 \mu$, onde d_m é o diâmetro das partículas obtido experimentalmente com um sistema de crivos;
12. Hopper.

3.2 - Determinação Experimental da Queda de Pressão no Orifício de um Hopper

O Hopper utilizado neste trabalho consiste

de um tubo cilíndrico de acrílico de base reta, com um orifício circular no centro da base. A este orifício podem-se adaptar outros orifícios com diâmetros diferentes. A área do orifício de ordem $n + 1$ é o dobro da área do orifício de ordem n , ou seja:

$$D_{n+1} = \sqrt{2} D_n \quad ; \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

onde D é o diâmetro de cada orifício.

A extremidade superior do Hopper tem uma tampa com rosca com um orifício central para passagem de ar comprimido controlado por um rotâmetro. Lateralmente e próximo a extremidade superior há um orifício ao qual se adapta um tubo borraça com uma das extremidades ligada a um manômetro. O Hopper tem diâmetro e altura iguais a 8,2 cm e 100 cm respectivamente. Os diâmetros dos orifícios utilizados neste trabalho tem os seguintes valores de acordo com a relação dada:

$$\begin{aligned} D_1 &= 0,5 \text{ cm} \\ D_2 &= 0,71 \text{ cm} \\ D_3 &= 1,00 \text{ cm} \\ D_4 &= 1,41 \text{ cm} \\ D_5 &= 1,99 \text{ cm} \end{aligned}$$

A verificação experimental da equação (2.10) consiste na determinação da queda de pressão $\Delta p = p_2 - p_1$ para um determinado orifício do Hopper, medindo-se a diferença de pressão $\Delta p = p_3 - p_1$ com um manômetro em função da altura do leito.

As medidas foram feitas, introduzindo Alumina no interior do Hopper. Com o auxílio de compressor e rotâmetro se fez a injeção de ar comprimido, abrindo-se simultaneamente o orifício da base do Hopper e observando-se a queda de pressão através do leito com o manômetro. O manômetro foi calibrado em $\text{cm H}_2\text{O}$ e posteriormente em cm CCl_4 . Os volumes observados da queda de pressão foram registrados simultaneamente para cada valor da altura do leito.

3.3 - Resultados

Os gráficos da figura (3.1) mostram os resultados experimentais obtidos da queda de pressão através de toda a coluna do material granular em função da altura do leito, com um orifício de 0,5 cm de diâmetro na base do Hopper. Os pontos experimentais se ajustam a retas, cada uma correspondendo a um determinado fluxo de ar através do sistema particulado. A extrapolação destas retas para a altura zero do leito dão os valores de $\Delta p = p_2 - p_1$, isto é, a queda de pressão no orifício do Hopper. Estes valores estão na tabela (3.1).

FLUXO DE AR ml/min	500	1000	525	775	1000	1625
Δp	?	9,6 cm H ₂ O	0,2 cm CCl ₄	1,0 cm CCl ₄	4,1 cm CCl ₄	8,6 cm CCl ₄

TABELA 3.1 - Valores da queda de pressão no orifício de um Hopper, cada um correspondendo a um determinado fluxo de ar através de um leito de Al₂O₃ (Alumina).

Os dois primeiros valores foram obtidos com o manômetro calibrado em cm H₂O. Os outros valores foram obtidos com o manômetro calibrado em cm CCl₄. Esta mudança foi necessária, devido a instabilidade observada na leitura do manômetro calibrado em cm H₂O, pois a densidade do CCl₄ é maior que a densidade da água. Isto é observado para o fluxo de 500 ml/min e que corresponde a curva (1) da figura (3.1)

3.4 - Verificação Experimental da Independência da Vazão de Sólidos Particulados em Relação à Profundidade do Leito.

Inicialmente usamos o procedimento experimental feito por Resnick [5], isto é, fixado um intervalo de tempo procedia-se a coleta do material (Alumina), pesando-se o mesmo no final de cada intervalo de tempo e registrando-se a altura correspondente do leito. Um obturador na saída do orifício permitia a interrupção da saída do material. Entretanto, os resul-

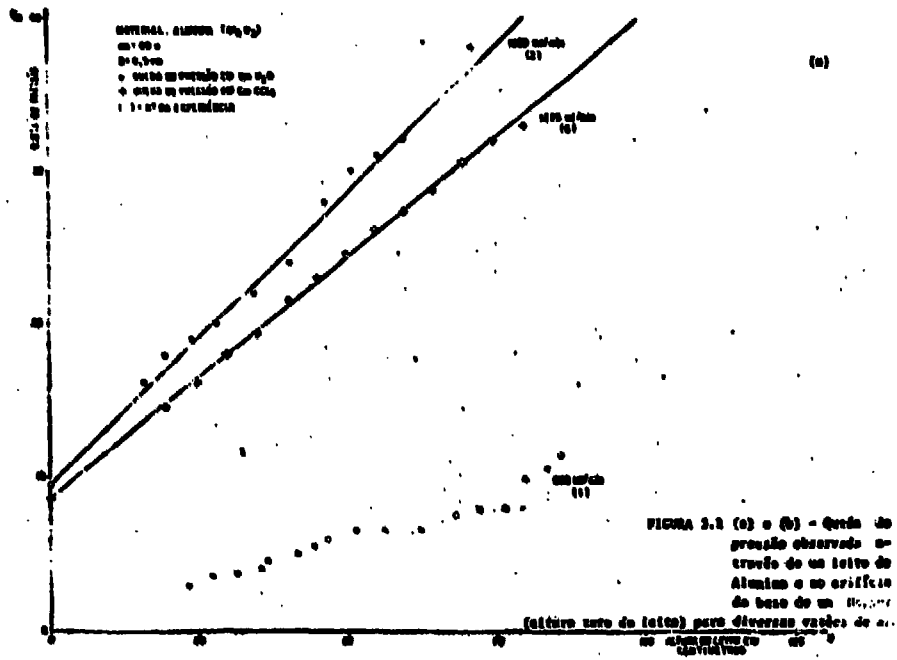
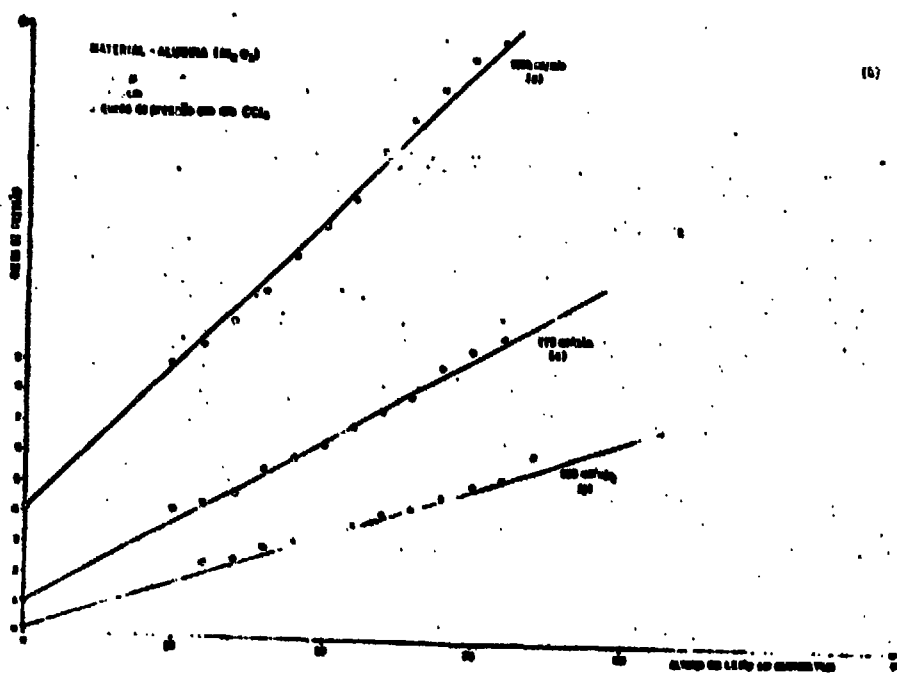


FIGURA 3.3 (a) e (b) - Queda de pressão observada durante a cura de um lote de Alumina e no crivo de base de um recipiente (altura zero do lote) para diversas razões de ...



tados obtidos não foram satisfatórios quando se aumentava o diâmetro do orifício. Introduzimos um novo método e que consiste em plotar a altura do leito em função do tempo. A partir da curva obtida se determina sua inclinação a qual dá uma medida da velocidade de escoamento do material e portanto da vazão para um laço do orifício.

3.5 - Resultados

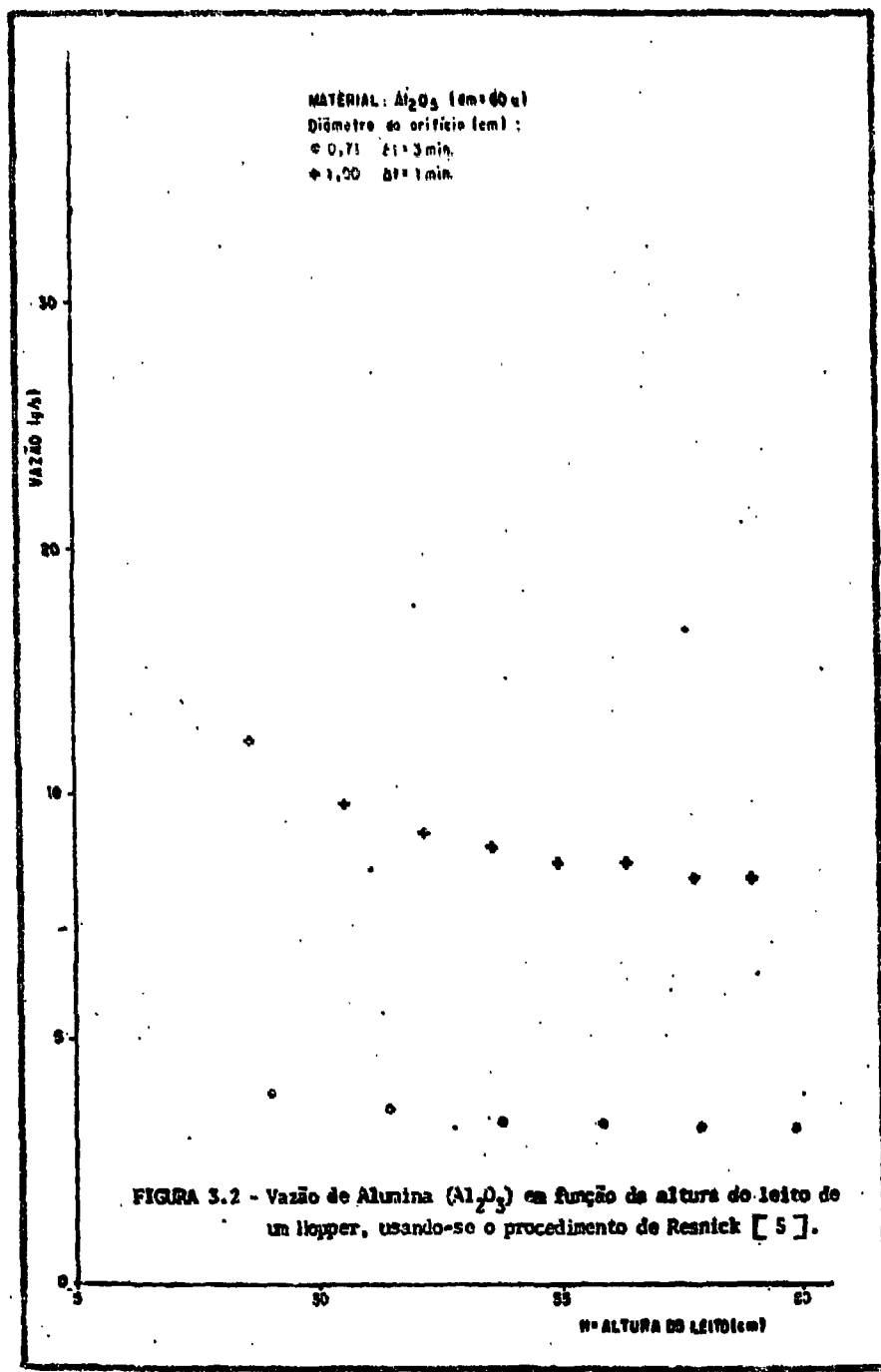
A figura (3.2) mostra os resultados obtidos com o procedimento de Resnick [5]. Os gráficos mostram que a vazão permanece aproximadamente constante até a altura de 40 cm, abaixo da qual a quantidade de material que atravessa o orifício por unidade de tempo aumenta sensivelmente.

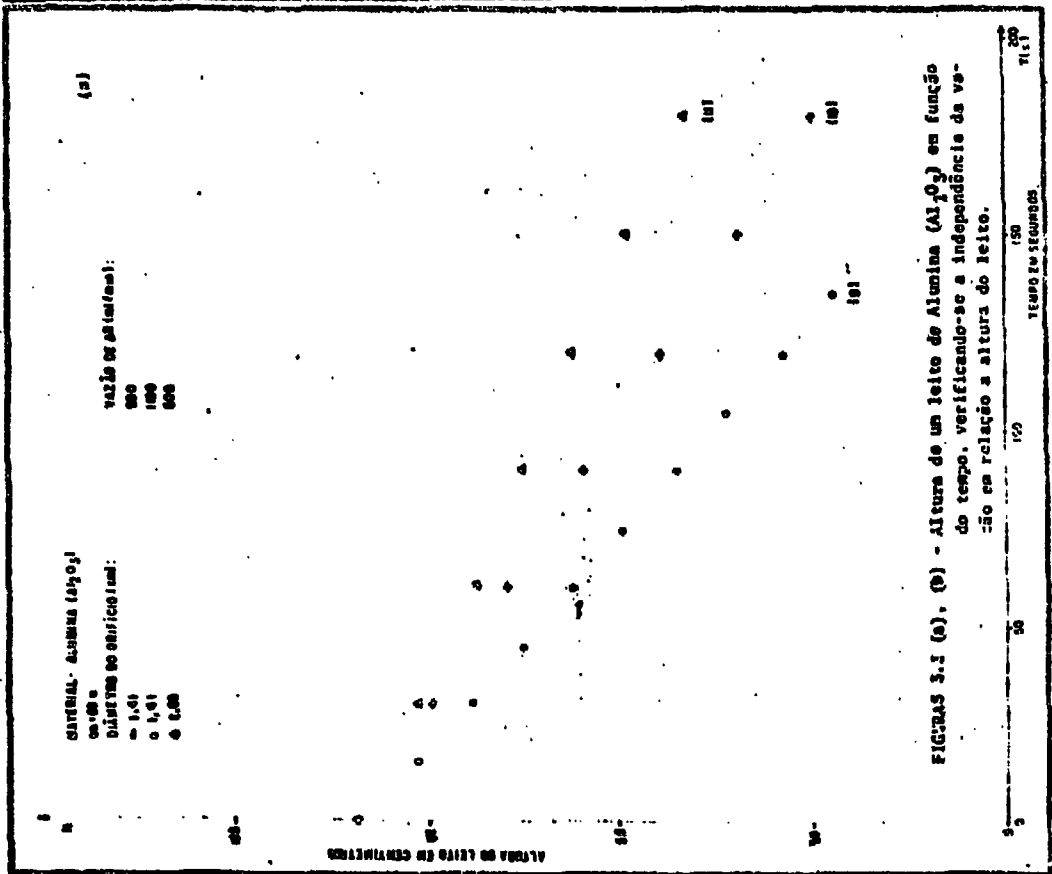
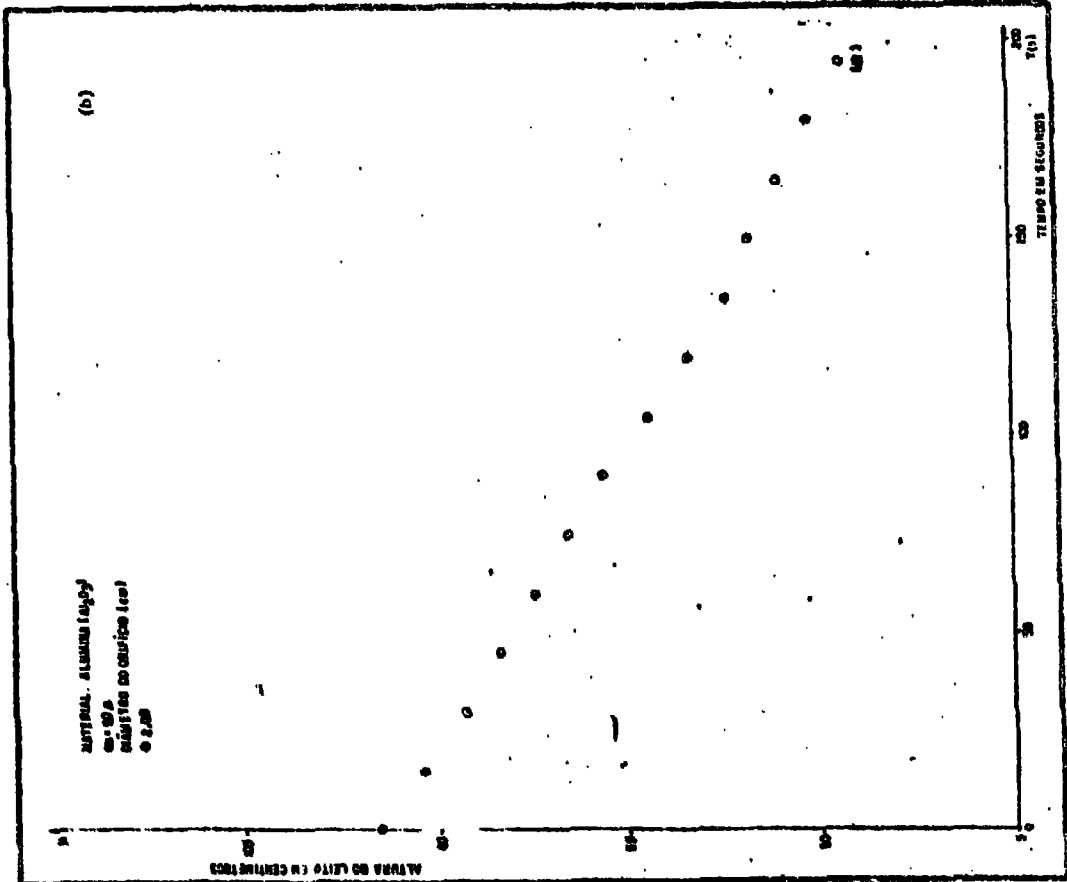
A figura (3.3) mostra os resultados obtidos plotando-se a altura do leito em função do tempo. Os pontos experimentais se distribuem sobre retas com inclinações diferentes, correspondendo cada uma a um determinado fluxo de ar para um dado orifício. Estes resultados mostram que a velocidade e portanto a vazão, independem da altura do leito para um determinado orifício.

3.6 - Estimativa da Porosidade em Torno do Orifício de um Hopper de Base Reta Utilizando Radioisótopos.

O grau de vazio ou porosidade está relacionado a um sistema de dois componentes, isto é, particulais e um fluido. Em um Hopper é provável a ocorrência de uma depressão cônica durante o escoamento do material, resultante de ondas que atravessam o leito. Como consequência, a descarga através do orifício é espasmódica. Assumimos, portanto, que para um determinado instante existe em torno do orifício do Hopper uma mistura de ar com Alumina, que é o material utilizado neste trabalho.

O uso de radioisótopo neste trabalho visa a determinação da porosidade em torno do orifício de um Hopper de base reta. Com um radioisótopo apropriado, a radiação emitida por este é atenuada ao atravessar o leito do Hopper. Deduzimos a partir da lei exponencial de atenuação e da figura (3.4) uma e-





FIGURAS 3.1 (a), (b) - Altura de um leito de Alumina (Al₂O₃) em função do tempo, verificando-se a independência da velocidade em relação a altura do leito.

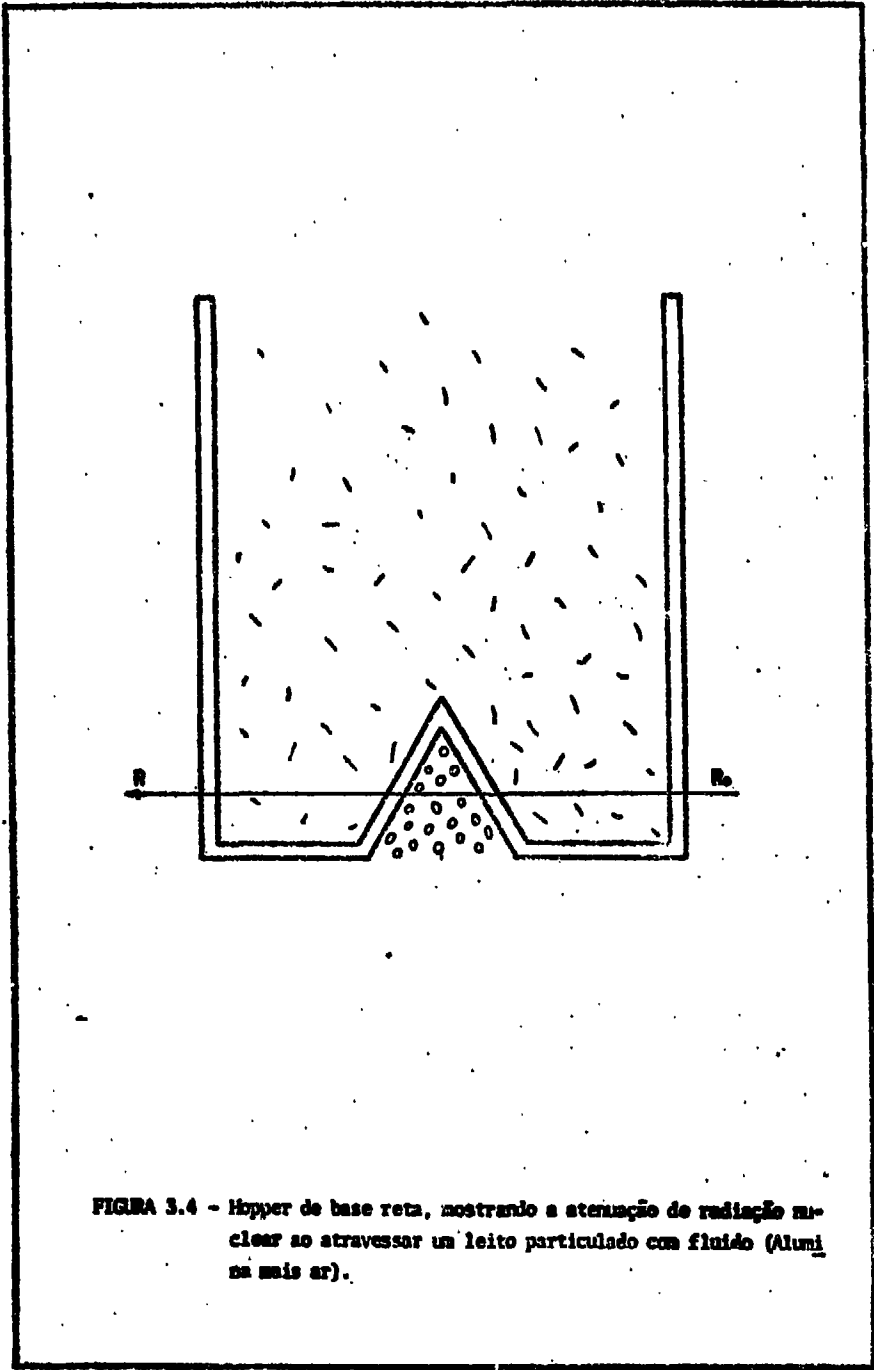


FIGURA 3.4 - Hopper de base reta, mostrando a atenuação de radiação nuclear ao atravessar um leito particulado com fluido (Alumina mais ar).

quação que permita calcular a porosidade em torno do orifício.

A partir da figura (3.4) obtemos:

$$\begin{aligned}
 R_h &= R_o e^{-\nu_h \rho_h x_h} \\
 R_{Al} &= R_h e^{-\nu_{Al} \rho_{Al} x_{Al}} \\
 R_f &= R_{Al} e^{-\nu_f (1-\epsilon) \rho_f x_f} \\
 R'_{Al} &= R_f e^{\nu_{Al} \rho_{Al} x_{Al}} \\
 R &= R'_{Al} e^{-\nu_h \rho_h x_h}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

onde:

- R_o = feixe de radiação incidente na base do Hopper
- R_h = atenuação devido ao material da parede do Hopper
- ν_h = coeficiente de atenuação mássico (c.a.m.) do material da parede do Hopper
- x_h = espessura da parede do Hopper
- R_{Al} = atenuação devido a Alumina
- ν_{Al} = c.a.m. da Alumina
- ρ_{Al} = massa específica da Alumina
- x_{Al} = espessura de Alumina
- R_f = atenuação devido ao "fluido"
- ν_f = coeficiente de atenuação linear do "fluido"
- ϵ = porosidade
- ρ_f = massa específica do "fluido"
- x_f = espessura média do "fluido"
- R'_{Al} = atenuação devido a Alumina após a passagem de radiação pelo orifício
- R = feixe de radiação emergente do leito

O termo "fluido" nesta terminologia corresponde à mistura de ar com Alumina. O fator $(1-\epsilon) \rho_f x_f$ é a espessura

sura equivalente em g/cm². A combinação do sistema de equações (3.1) dá o valor de R, isto é:

$$R = R_0 e^{-v_f (1-\alpha) \rho_f x_f - v_{Al} \rho_{Al} T_{Al} - v_h \rho_h T_h} \quad (3.2)$$

Onde T_{Al} e T_h são a espessura total da Alumina e do material do Hopper, respectivamente. Logaritmando a equação (3.2), obtemos o valor de α, isto é:

$$\alpha = \frac{\ln(R/R_0) + v_f \rho_f x_f + v_{Al} \rho_{Al} T_{Al} + v_h \rho_h T_h}{v_f \rho_f x_f} \quad (3.3)$$

Quando α = 1, R = R_{Ar}, onde R_{Ar} é a taxa de contagem observada com ausência de partículas no orifício, isto é:

$$\ln \frac{R_0}{R_{Ar}} = v_{Al} \rho_{Al} T_{Al} + v_h \rho_h T_h \quad (3.4)$$

Quando α = 0, R = R_{Al} é a taxa de contagem observada com partículas no orifício, isto é:

$$\ln \frac{R_0}{R_{Al}} = v_f \rho_f x_f + v_{Al} \rho_{Al} T_{Al} + v_h \rho_h T_h \quad (3.5)$$

Combinando as equações (3.4) e (3.5) e substituindo na equação (3.3) o valor v_f ρ_f x_f, temos:

$$\alpha = \frac{\ln(R/R_{Al})}{\ln(R_{Ar}/R_{Al})} \quad (3.6)$$

O cálculo da porosidade α em torno do orifício do Hopper dada pela equação (3.6) foi feito com o sistema da figura (3.5). Com um determinado fluxo de ar observou-se as taxas de contagens R durante o escoamento de Alumina. Os outros termos da equação (3.6) são:

R_{Al} = taxa de contagem observada com Alumina estacio-

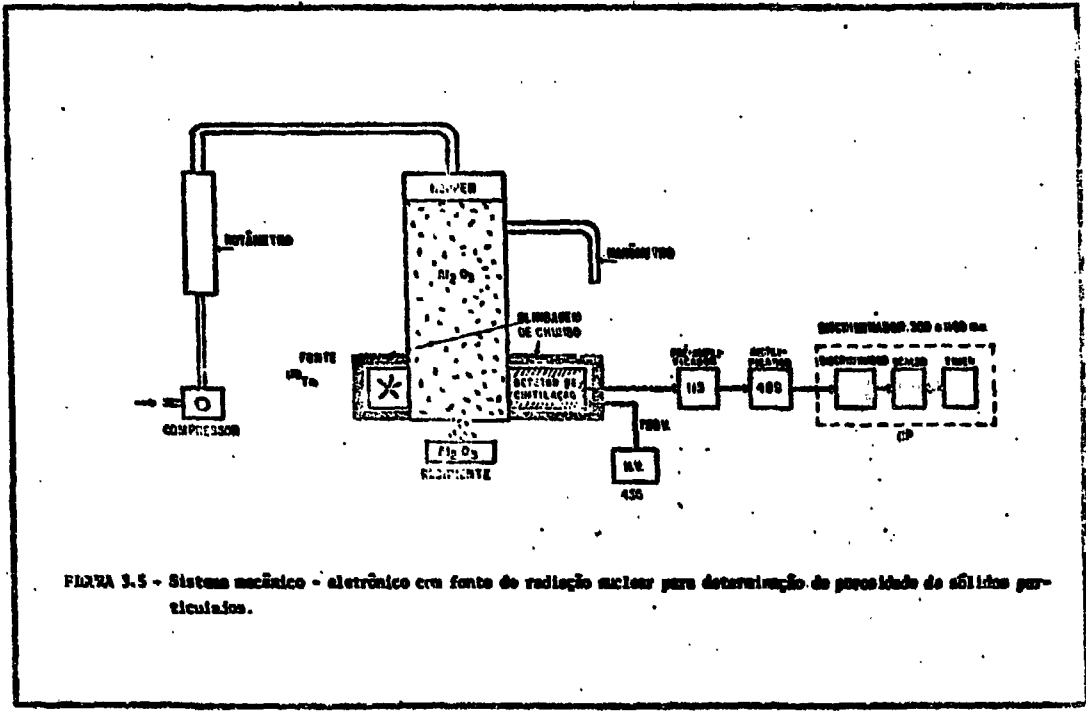


FIGURA 3.5 - Sistema mecânico - eletrônico com fonte de radiação nuclear para determinação de presença de sólidos particulados.

nária no interior do Hopper, sem compactação adicional.

R_{Ar} = taxa de contagem com o Hopper vazio.

Com o objetivo de se obter um "espectro" de porosidade mais amplo, foi usado o sistema de detecção da figura (3.6) acoplado a um registrador gráfico H.P. e fonte de radiação β^- de 540 keV do ^{90}Sr . Esta fonte foi usada devido sua maior atividade e apresentar maior atenuação na Alumina do que o ^{170}Tm , o qual emite radiação γ .

3.7 - Resultados

A figura (3.7) mostra os resultados obtidos com o sistema da figura (3.5). A porosidade média em torno do orifício está associada a ondas de dilatação e compressão que atravessam o leito durante o processo de escoamento das partículas. Cada ponto de determinada curva está associado às taxas de contagens médias observadas durante o escoamento do material. O escasso número de pontos foi devido às pequenas diferenças observadas entre fluxos de ar próximos e também em relação ao diâmetro do orifício. As curvas obtidas com diâmetros de 2,0cm e 1,41cm apresentam pontos de mesma c e t quando a diferença de fluxo é de 100ml/min. A curva obtida com diâmetro de 0,71 cm apresenta pontos com c e t diferentes quando a diferença de fluxo é maior que 100ml/min.

A figura (3.8) mostra o espectro de porosidade obtido com o sistema da figura (3.6). Este espectro mostra um registro contínuo do escoamento de Alumina em função do tempo (sem fluxo de ar) obtido com um registrador gráfico, onde v_p é a velocidade do papel. A presença de picos pronunciados no espectro mostra a ocorrência de um vazio relativo em torno do orifício. A linha base mostra a compactação relativa da Alumina em determinados intervalos de tempo. A região abaixo da altura de 25 cm do leito apresentou um espectro com picos mais frequentes, com bolhas eclodindo até a superfície do leito em torno de 15cm de altura. Nesta região a vazão provavelmente não é constante, como foi observado neste trabalho e por outros autores citados no texto.

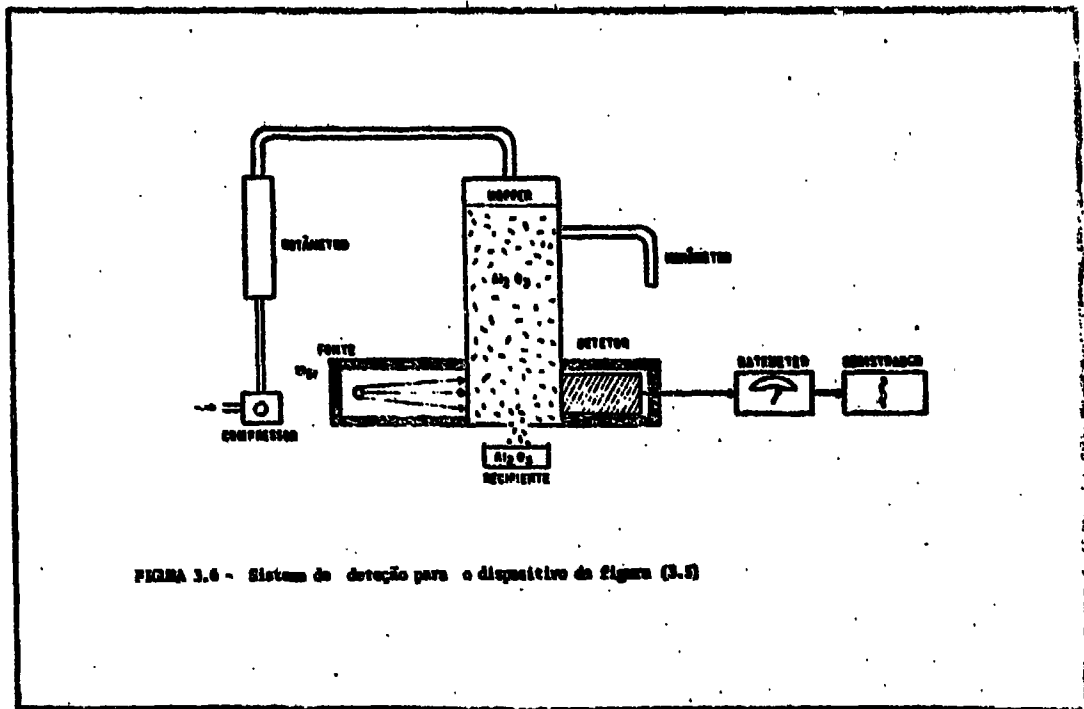


FIGURA 3.6 - Sistema de deteção para o dispositivo da figura (3.5)

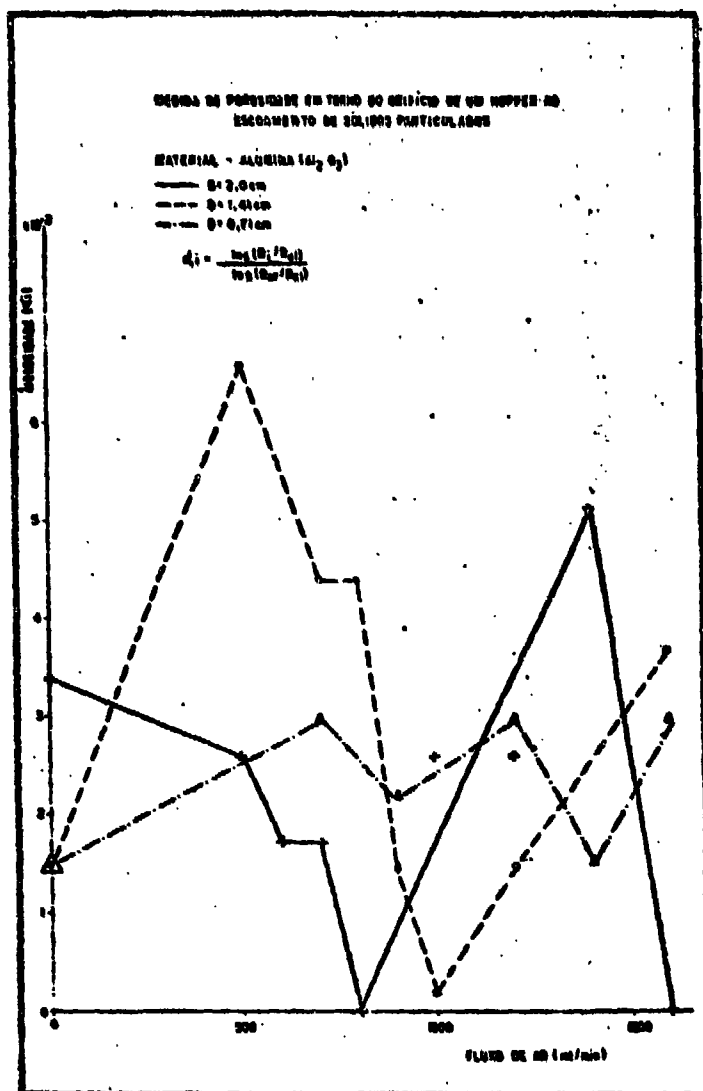


FIGURA 3.7 - Medida de porosidade em torno do orifício de um hopper em função do fluxo de ar que atravessa um leito de Alumina (Al₂O₃)

Da figura (3.8) obtemos o valor médio de R:

$$\begin{aligned} R &= 1,08 \times 10^4 \text{ cps} \quad , \quad \text{com} \\ R_{At} &= 1,02 \times 10^4 \text{ cps} \\ R_{Ar} &= 4,60 \times 10^4 \text{ cps} \end{aligned}$$

Com a equação (3.6) obtemos o valor médio de α , isto é:

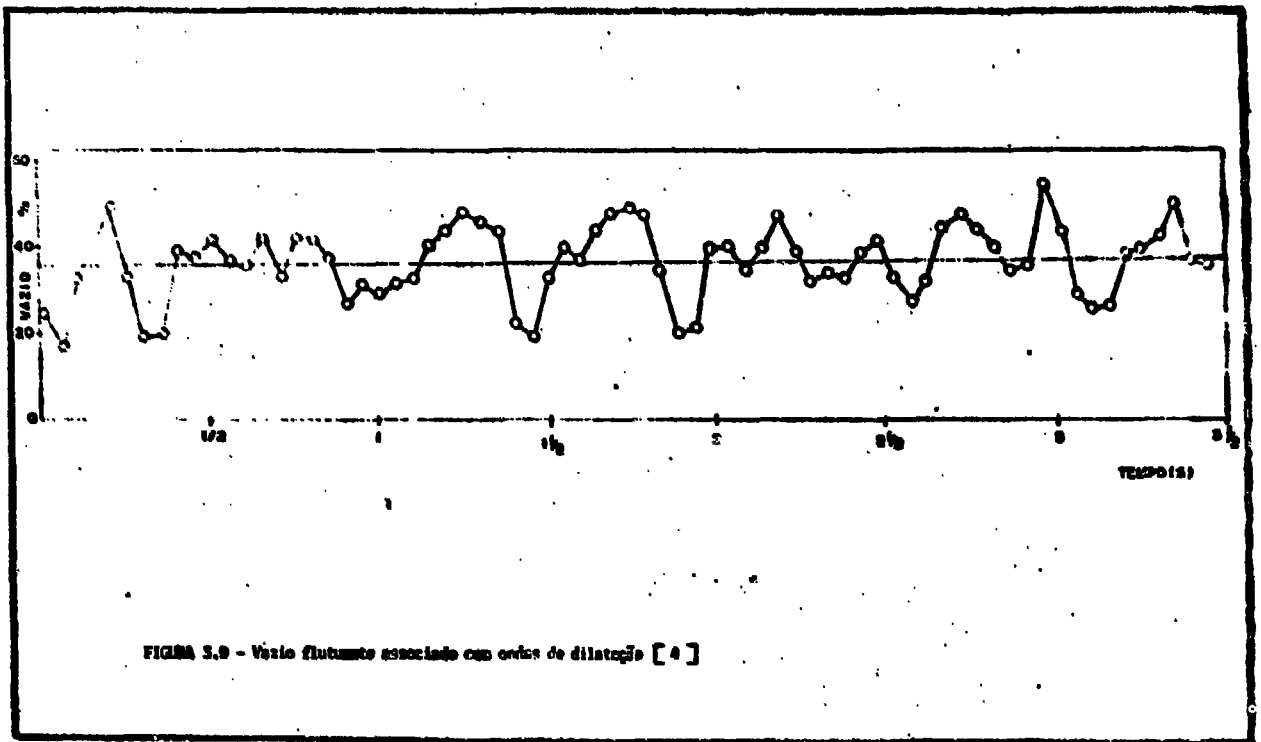
$$\alpha = 0,037 \pm 0,008.$$

O valor médio de α obtido da figura (3.7) para um diâmetro de orifício igual a 2,0 cm e sem fluxo de ar é igual a $0,034 \pm 0,009$, com erro relativo ao valor anterior em cerca de 8 %.

Estes resultados mostram que os valores calculados da porosidade através de medidas discretas e por registro contínuo da atividade concordaram razoavelmente entre si com erro inferior a 10 %.

A figura (3.9) mostra ondas de dilatação e compressão associados ao movimento de bolas que atravessam um orifício circular [4]. O espectro obtido é semelhante ao da figura (3.8).

<p>Modello di nota di spesa di natura non a carico dell'azienda</p> <p><i>[Handwritten signature]</i></p>	<p>Modello di nota di spesa di natura non a carico dell'azienda</p> <p><i>[Handwritten signature]</i></p>
<p>Modello di nota di spesa di natura non a carico dell'azienda</p> <p><i>[Handwritten signature]</i></p>	<p>Modello di nota di spesa di natura non a carico dell'azienda</p> <p><i>[Handwritten signature]</i></p>
<p>Modello di nota di spesa di natura non a carico dell'azienda</p> <p><i>[Handwritten signature]</i></p>	<p>Modello di nota di spesa di natura non a carico dell'azienda</p> <p><i>[Handwritten signature]</i></p>



CAPÍTULO IV

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O uso de técnicas convencionais para a medição da variação de pressão no orifício de um Hopper de base reta apresentou resultados (relativos ao material usado - Alumina) semelhantes aos resultados obtidos por outros autores. Foi observado que o fluxo de partículas através do orifício é espasmódico, o que provavelmente justifica o modelo de fluxo apresentado na figura (2.1).

A verificação da independência da vazão de partículas em função da altura do leito concorda razoavelmente com os resultados obtidos por Resnick [4]. Entretanto os resultados indicados na figura (3.2) mostram que a vazão não é constante abaixo de aproximadamente 40 cm. Provavelmente estes resultados decorrem de diferentes quantidades de material recolhido para pesagem para pequenas diferenças do intervalo de tempo previamente fixado para cada experiência.

Os resultados indicados na figura (3.3) e obtidos sem pesagem do material mostram que a vazão é constante e independe da altura do leito.

A introdução de uma técnica com o uso de radioisótopos mostrou a ocorrência de ondas que atravessam o leito particulado, tendo como indicador o cálculo da porosidade em torno do orifício e um espectro de porosidade, como mostram as figuras (3.7) e (3.8) respectivamente. O espectro de porosidade da figura (3.8) foi obtido com uma fonte de ^{90}Sr , emissor de partículas β^- com energia de 540 keV e um detetor de cintilação revestido com durziumínio (Figura 3.6). Devido a natureza do revestimento do detetor é provável que o espectro obtido seja o resultado de radiação de "bremsstrahlung", com efeito de interação entre radiação β^- e o alumínio.

Os resultados obtidos neste trabalho e a análise feita neste capítulo nos permite concluir o seguinte:

- a) - as técnicas utilizadas para a medida de variação de pressão em torno do orifício de um Hopper de base reta apresentou resultados consistentes com aqueles obtidos por diversos autores citados nas Referências deste trabalho, com excessão dos valores obtidos relativos ao material empregado como sólido particulado (Alumina).
- b) - O método usado para a verificação da independência da vazão de sólido particulado apresentou resultados melhores que aqueles obtidos por Resnick [4].
- c) - A utilização de radioisótopo para a estimativa de porosidade em torno do orifício do Hopper usado, apresentou um espectro semelhante ao espectro obtido com técnicas convencionais.
- d) - A rapidez na obtenção dos resultados e provavelmente a maior precisão nas medidas com o uso de radioisótopos, dão maior vantagem ao método introduzido neste trabalho, em relação aos métodos mecânicos de medida.

REFERÊNCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

- 1) - BROWN, R.L., RICHARDS, J.C., "Exploratory Study of the Flow of Granules Through Apertures", Trans. Inst. Chem. Engrs., London, 37, 108, 1959.
- 2) - HARMENS, A., "Flow of Granular Material Through Horizontal Apertures", Chem. Eng. Science, 18, 297, 1963.
- 3) - BROWN, R.L., RICHARDS, J.C., "Profile of Flow of Granules Through Apertures", Trans. Inst. Chem. Engrs., London, 38, 243, 1960.
- 4) - RESNICK, W., HELED, Y., KLEIN, A., PALM, E., "Effect of Differential Pressure on Flow of Granular Solids Through Orifices", I e EC Fundamentals, Vol. 5, nº 3, 392, 1966.
- 5) - CLYDE ORR, Jr., "Particulate Technology", The Mac Millan Company, New York, 1966.