

Este exemplar corresponde a versão  
final de Tese defendida por Meuris  
Gurgel Carlos da Silva e aprovada  
pela Comissão Julgadora em 07/06/84  
Cesar Costapinto Santana

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

DINÂMICA DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO

VERTICAL DE PARTÍCULAS

Autor: Meuris Gurgel Carlos da Silva

Orientador: Cesar Costapinto Santana

038/84

Tese submetida à Comissão de Pós-Graduação da  
Faculdade de Engenharia de Campinas UNICAMP  
como parte dos requisitos necessários para  
obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Quí-  
mica

Campinas, SP - Brasil

Junho de 1984

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

Aos meus pais, Luiz e Elda,  
pelo amor, estímulo e dedicação.  
À Marta, minha querida irmã,  
("in memorian")

## AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos são destinados à todos que contribuíram com a realização deste trabalho e, de modo especial:

Ao Professor Doutor Cesar Costapinto Santana, orientador deste trabalho, o meu sincero agradecimento pela completa e segura orientação e pela inestimável confiança e amizade.

A colega Liliam Maria Barbosa Torrezan pela ajuda na obtenção dos dados experimentais e ao Antonio Sergio R. Reganati pelo apoio na montagem experimental.

Ao Wilton Furquini, pela elaboração dos gráficos e a Magali Maria Cabrera, pelo esmerado serviço datilográfico.

A Rosa Maria Nogueira, pelo estímulo e amizade.

A CAPES, pela bolsa concedida, e a Termoquip pela fabricação do equipamento.

Um agradecimento final é dirigido ao Valeriano Juan Cano pelo inestimável incentivo e encorajamento no desenvolvimento deste trabalho.

**RESUMO:**

No presente trabalho, foram realizados estudos experimentais acompanhados de formulações matemáticas sobre a queda de pressão no escoamento de mistura ar-sólidos em sistema vertical. Foram incluídos nestes estudos a dinâmica de uma região de aceleração, bem como a da região de escoamento completamente desenvolvido.

Baseando-se em equações de conservação da massa e quantidade de movimento em sistemas particulados, foi proposto um método de previsão de queda de pressão nas regiões de escoamento acima mencionadas, envolvendo o cálculo da porosidade, velocidades do fluido e das partículas e o comprimento de entrada. Os resultados obtidos desses parâmetros foram comparados com os outros procedimentos previstos na literatura. No desenvolvimento deste trabalho foi estabelecida ainda, uma correlação semi-empírica para o coeficiente que expressa o atrito dos sólidos com a parede do tubo, analisando-a com outras existentes na literatura.

Os dados experimentais foram obtidos em um sistema vertical de 4,0m de altura e 0,05m de diâmetro, com partículas sólidas de 0,24; 0,40; 1,0; 1,2 e 1,7mm de diâmetro médio e com a mesma densidade, sendo realizadas cerca de 242 determinações experimentais, das quais

69 foram efetuadas na região de escoamento estabelecido e, 173 foram incluída a região de aceleração.

Estas determinações, acrescidas de um conjunto de dados da literatura, permitiram analisar a consistência das formulações e equações propostas para o cálculo dos parâmetros que descrevem a dinâmica do escoamento gás-sólido vertical em fase diluída.

## ABSTRACT

In the present experimental work studies were made with mathematical formulations on pressure drop on an air-solids vertical flow system. Both the dynamics of the acceleration region and the completely developed flow were included in the mentioned studies.

The equations of continuity and movement in particulated systems were taken as the basis of this work and a method of estimating the pressure drop in the two regions was proposed, which involved the calculation of the porosity, local velocities of fluid and particles and the entry length. The results obtained for these parameters were compared with some other methods cited in the literature. As a development of this work it was established a semi-empirical correlation for the particle-wall friction factor.

The experimental data were obtained for a vertical flow system of 4.0m of length and 0.05m of diameter including particles with mean diameter of 0.24, 0.40, 1.0, 1.2 and 1.7 mm, all having the same specific gravity. About 242 experimental determinations were made, 69 of which for the completely developed flow and the other 173 for the acceleration region.

These experimental determinations added to a set of data found in the literature allowed the verification of the

proposed formulations and equations for calculating the parameters describing the dynamics of a gas-solid vertical flow in diluted phase.

NOMENCLATURA

A	- Área de secção transversal do tubo, $L^2$
$C_{DM}$	- Coeficiente de arraste dos sólidos
$C_{DS}$	- Coeficiente de arraste dos sólidos segundo Yang (27)
D	- Diâmetro do tubo, L
$d_p$	- Diâmetro da partícula sólida, L
$F_r$	- Número de Froude
$F_{rs}$	- Força de arraste por unidade de volume de partícula
$f_f$	- Coeficiente de atrito de Fanning
$f_s$	- Coeficiente de atrito dos sólidos com a parede do tubo
g	- Aceleração da gravidade, $LT^{-2}$
$G_f$	- Velocidade mássica, $ML^{-2} T^{-1}$
$G_s$	- Velocidade mássica dos sólidos, $ML^{-2} T^{-1}$
$G_s^*$	- Velocidade mássica dos sólidos ( $TONS/hr cm^2$ )
L	- Comprimento do tubo de medida, L
$L_A$	- Comprimento de entrada, L
m	- Força de interação sólido-fluido ou força resistiva segundo equação de Massarani e Santana
$\Delta P_f$	- Queda de pressão devido ao fluido, $FL^{-2}$
$\Delta P_m$	- Queda de pressão segundo Rose-Duckworth (15), $FL^{-2}$
$\Delta P_o$	- Diferença entre a queda de pressão total e a do fluido escoando sozinho, $FL^{-2}$
$\Delta P_{st}$	- Queda de pressão devido ao sólido, $FL^{-2}$
$\Delta P_T$	- Queda de pressão total ao longo do sistema de medida, $FL^{-2}$
$\Delta P_T^*$	- Queda de pressão total (cm)
$\Delta P_{TA}$	- Queda de pressão na região de aceleração, $FL^{-2}$
$\Delta P_{TRE}$	- Queda de pressão na região de escoamento estabelecido, $FL^{-2}$

$q$	- Velocidade superficial do fluido, $LT^{-1}$
$q_{mf}$	- Velocidade mínima de fluidização, $LT^{-1}$
$Re_m$	- Número de Reynolds, definido por Shimizu (17)
$Re_p$	- Número de Reynolds, definido a partir da velocidade relativa
$u$	- Velocidade local do fluido, $LT^{-1}$
$\bar{u}$	- Velocidade média do fluido, $LT^{-1}$
$\bar{u}^*$	- Velocidade média do fluido, m/s
$u_{s1}, u_{s2}$	- Velocidade local inicial e final do fluido, m/s
$u_\infty$	- Velocidade terminal dos sólidos, m/s
$\dot{u}$	- Aceleração do fluido, $LT^{-2}$
$v_r$	- Velocidade relativa, $LT^{-1}$
$\dot{v}_s$	- Aceleração dos sólidos, $LT^{-2}$
$v_s$	- Velocidade local do sólido, $LT^{-1}$
$v_s^*$	- Velocidade local do sólido, m/s
$v_{s1}, v_{s2}$	- Velocidade local inicial e final dos sólidos, $LT^{-1}$
$w_f$	- Vazão mássica do fluido, $MT^{-1}$
$w_s$	- Vazão mássica dos sólidos, $MT^{-1}$
$\alpha$	- Função da taxa de fluxo do ar na velocidade, adimensional
$\bar{\gamma}$	- Fator de segregação média
$\Gamma$	- Razão de carga sólido-fluido
$\epsilon$	- Porosidade
$\eta$	- Variação radial da velocidade do sólido, adimensional
$\lambda$	- Atrito no tubo dado pela equação de Blasius, adimensional
$\mu$	- Viscosidade do fluido, $ML^{-1}T^{-1}$
$\rho$	- Densidade do fluido, $ML^{-3}$

- $\rho_s$  - Densidade do sólido,  $ML^{-3}$
- $\tau_{mo}$  - Tensão de cisalhamento na parede, segundo definição de Rose-Duckworth (15)
- $\tau_s, \tau_g$  - Tensão de cisalhamento na parede, para o escoamento do sólido e do fluido

ÍNDICE GERAL

	Página
CAPÍTULO I - Introdução	1
I.1. Motivação à Pesquisa	2
I.2. Objetivos deste Trabalho	2
CAPÍTULO II - Revisão da Literatura	5
II.1. Introdução	6
II.2. Trabalhos de Natureza Empírica	10
II.2.1. Queda de Pressão no Regime de Escoamento Estabelecido	10
II.2.2. Região de Aceleração	14
II.2.2.1. Queda de Pressão	14
II.2.2.2. Comprimento de Entrada	17
II.3. Trabalhos com Base em Equações de Conservação de Massa e do Movimento	19
II.3.1. Queda de Pressão	19
II.3.1.1. Correlações para o Coeficiente de Atrito dos Sólidos	24
II.3.1.2. Queda de Pressão na Região de Aceleração	28
II.3.1.3. Queda de Pressão na Região de Escoamento Estabelecido	29
II.3.2. Concentração Volumétrica de Velocidades dos Sólidos e Fluido	30
II.3.4. Comprimento de Entrada	34
CAPÍTULO III - Modelagem Matemática	38
III.1. Introdução	39

III.2. Modêlo utilizado no Escoamento Estabelecido	39
III.2.1. Cálculo da Velocidade Relativa Sólido-Fluido, Porosidade e Queda de Pressão	40
III.2.2. Formulação para o Coeficiente de Atrito dos Sólidos com a parede do tubo	43
III.3. Modêlo utilizado na Região de Aceleração	46
CAPÍTULO IV - Montagem Experimental	50
IV.1. Introdução	51
IV.2. Descrição da Montagem	51
IV.2.1. Sistemas de Alimentação	53
IV.3. Operação de Medida da Vazão de Gás e dos Sólidos	53
IV.4. Operação do Sistema	59
IV.5. Caracterização dos Sólidos e do Gás	60
CAPÍTULO V - Resultados Experimentais e Calculados	63
V.1. Introdução	64
V.2. Resultados Obtidos nas Determinações Experimentais	64
V.3. Resultados Calculados	76
V.4. Determinação das Constantes do Coeficiente de Atrito dos Sólidos, $f_s$ , com a Parede	96
CAPÍTULO VI - Análise dos Resultados	98
VI.1. Introdução	99
VI.2. Discussão dos Resultados	108

VI.2.1. Queda de Pressão no Regime de Escoamento Estabelecido	108
VI.2.2. Queda de Pressão na Região de Aceleração e ao Longo do Sistema	118
VI.2.3. Comprimento de Entrada	118
CAPÍTULO VII - Conclusões e Sugestões	121
A. Conclusões	122
I. Queda de Pressão no Regime de Escoamento Estabelecido	122
II. Comprimento de Entrada na Seção Vertical	123
III. Queda de Pressão na Região de Aceleração e ao Longo do Sistema	125
B. Sugestões	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
ANEXO A	133

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

### I.1. MOTIVAÇÃO À PESQUISA

O transporte pneumático vertical de partículas sólidas em dutos tem sido utilizado comercialmente desde o início deste século em vários processos e operações industriais. A partir de então vem-se fazendo estudos que visam o seu aperfeiçoamento, uma vez comprovado o baixo custo de utilização deste transporte de sólidos em relação aos outros meios de transporte, além das muitas vantagens que este apresenta em uma vasta diversificação de sistemas onde ocorrem transferência de calor e de massa.

Deste modo, tem-se uma operação frequentemente usada em várias tecnologias da indústria química, alimentícias, processamento de combustíveis sólidos e de minerais, no controle de emissão de particulados no ar, secagem de sólidos, e várias outras que envolvem o contato gás-sólido.

### I.2. OBJETIVOS DESTE TRABALHO

Visando aperfeiçoar o cálculo das variáveis dinâmicas neste tipo de transporte procurou-se neste estudo fazer uma análise comparativa com dados experimentais próprios acrescidos dos existentes na literatura, envol-

vendo dois principais tipos de enfoque: os de natureza empírica e os trabalhos com base em equações da conservação de massa e do movimento do sólido. Este trabalho contém ainda uma comprovação da aplicação das correlações de expressões da força resistiva gás-sólidos considerando a influência da aceleração para o cálculo da queda de pressão incluindo a seção de entrada do tubo.

Com o objetivo de se estudar o escoamento sólido-fluído em transporte pneumático vertical em fase diluída, torna-se importante efetuar investigações acerca das regiões de escoamento estabelecido e da região de aceleração. Com esse intuito, necessita-se determinar variáveis que caracterizam a dinâmica do escoamento, tais como: porosidade, velocidade do sólido e do fluido e queda de pressão. Na determinação do comprimento de entrada, de modo mais detalhado, é necessária a realização de simulação matemática envolvendo as equações de conservação de massa e da quantidade de movimento, procurando-se prever a influência das propriedades do fluido, das partículas e das condições de escoamento.

Procurando contribuir com dados experimentais próprios para análise das equações propostas, realizou-se a montagem de um sistema cujos resultados permitiram o estabelecimento de uma correlação para o coeficiente

de atrito dos sólidos com a parede do duto, além de analisar a consistência de equações existentes na literatura para previsão da queda de pressão no escoamento estabelecido.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO DA LITERATURA

### II.1 INTRODUÇÃO

São conhecidos três regimes de fluxo fundamentais no escoamento em sistemas de transporte vertical para uma mistura sólido-gás. Segundo a ordem decrescente de concentração de sólidos, esses regimes são classificados como:

- a. Regime de fase densa
- b. Regime de borbulhamento
- c. Regime de fase diluída

Na figura (II.1) tem-se um esquema qualitativo que mostra as regiões onde ocorrem os regimes mencionados no que concerne as variações das vazões de fluido e de sólidos.

A maioria dos trabalhos existentes sobre este assunto consideram o regime em fase diluída e, foram desenvolvidos através de modelos que descrevem as propriedades fluidodinâmicas da mistura, tais como: velocidades locais do sólido,  $v_s$ , do fluido,  $u_f$ , a concentração volumétrica, queda de pressão,  $\Delta P$ , e comprimento de entrada,  $L_A$ .

Neste tipo de transporte, observou-se no

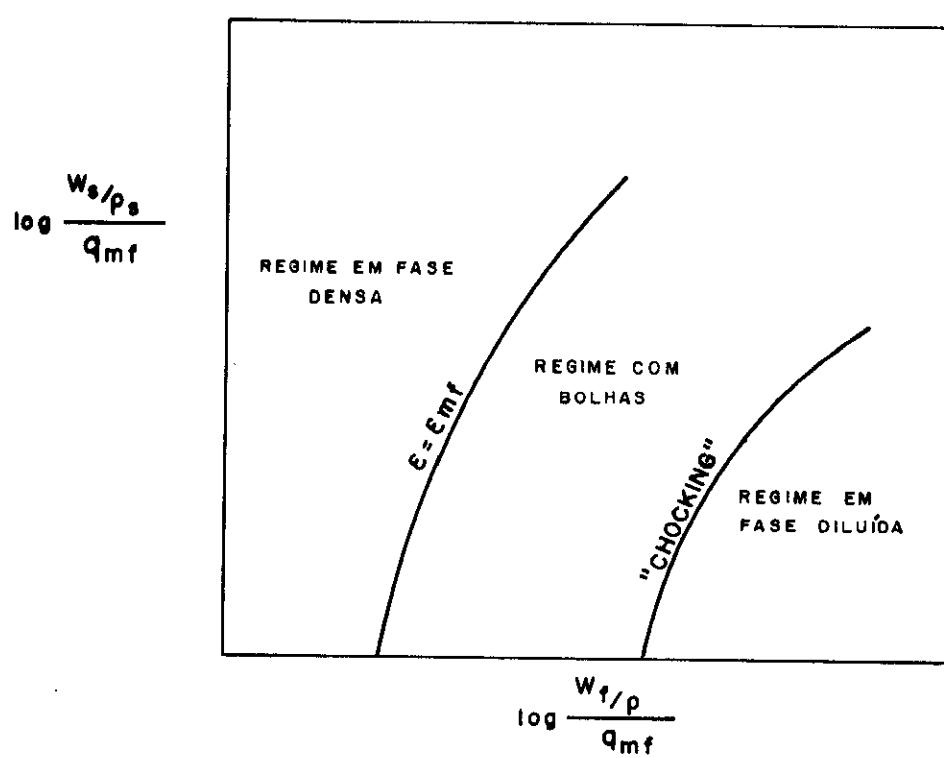


FIG.( II-1 ) REGIMES DE ESCOAMENTO NO TRANSPORTE PNEUMÁTICO VERTICAL

escoamento da mistura a existência de uma determinada distância no conduto onde ocorre a aceleração das partículas até atingirem uma velocidade constante na qual serão transportadas. Com isso, foram identificadas duas regiões distintas, conhecidas como região de aceleração e região de escoamento estabelecido, apresentados na figura (II.2).

Com o objetivo de se caracterizar mais adequadamente o comportamento dinâmico dos sistemas de transporte pneumático, tornou-se necessário estudar os vários parâmetros relacionados com a interação entre o fluido, os sólidos e o conduto no qual ocorre o escoamento.

Considerando isso, iniciaremos um estudo mais detalhado sobre a queda de pressão destes sistemas.

Existem na literatura um grande número de correlações propostas para predizer a queda de pressão em fluxo de suspensão sólido-fluido em regime de fase diluída. A maioria destas correlações, foi obtida de forma empírica, sendo que, no conjunto dos trabalhos a quantidade de variáveis envolvidas cobrem uma larga faixa de aplicação, porém cada estudo limita-se geralmente a situações particulares.

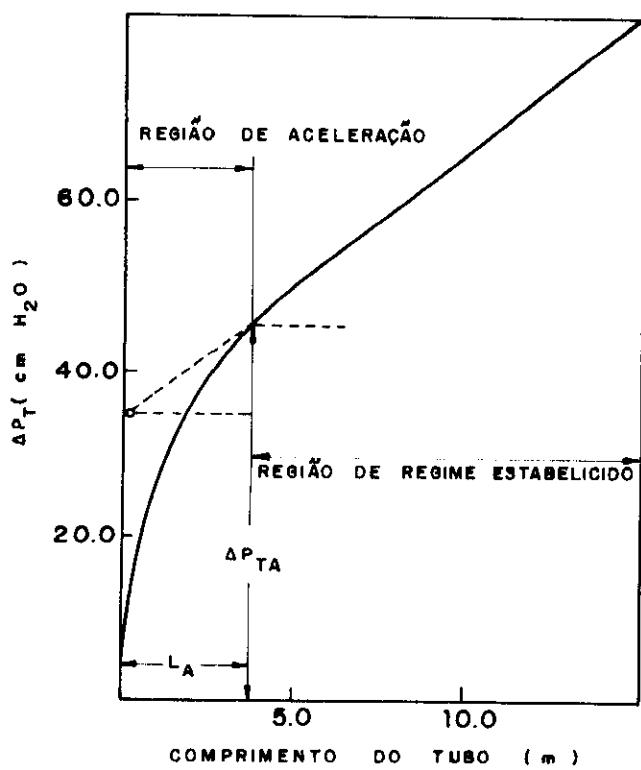


FIG. (III-2) DIAGRAMA BÁSICO PARA O ESCOAMENTO  
GÁS - SÓLIDO

Por essa razão, existem grandes discordâncias e dúvidas sobre a validade e segurança da utilização dessas correlações. Por outro lado, apenas um pequeno número de las foram desenvolvidas a partir de equações básicas de conservação para o escoamento bifásico gás-sólido.

Com base nisso pode-se fazer um estudo considerando dois tipos de trabalhos. Os de natureza empírica e aqueles baseados em uma análise mais detalhada das equações básicas de conservação e de movimento para os constituintes da mistura.

## II. 2 TRABALHOS DE NATUREZA EMPÍRICA

### II.2.1. QUEDA DE PRESSÃO NO REGIME DE ESCOAMENTO ESTABELECIDO

Destacam-se na literatura importantes trabalhos de revisão, tal como o de Khan-Pei (1), onde foi analisado um conjunto de 14 correlações empíricas, segundo referências (2.a.13) apresentadas na tabela (II.1), através de um estudo comparativo utilizando 1.200 dados experimentais, como os de Farbar (7), Harriu-Molstad (9), Chaddock (14) e outros, além de dados coletados pelo próprio autor classificando as correlações que forneceram melhores resultados. Nesse mesmo trabalho foi proposta uma nova correlação, cuja análise comparativa conduziu a um resultado mais satisfatório. A expressão que descreve essa correlação apresenta-se de forma adimensionalizada:

TABELA (II.1) - CORRELAÇÕES EMPIRICAS DE QUEDA DE PRESSÃO SEGUNDO REVISÃO DE KHAN-PEI

Belden and Kassel (2)	$\frac{\Delta P_T}{L} = \rho_s + 2 u \frac{(0,049 G_s + 0,22 G_f)}{gD(Re)^{0,2}}$
Boothroyd (3)	$\frac{\Delta P_T}{\Delta P_f} = \Gamma (\rho_s / \rho) ^{0,5} (n/f_f)$
Cramp and Priestley (4,5)	$\frac{\Delta P_T^*}{\Delta P_f} = \frac{W_s^*}{A} (2.1 + \frac{0,46}{\sqrt{\Gamma}}) L + \frac{L}{v_s^*} + 0,4 \frac{\bar{u}L}{dp} + 0,00092 \bar{u}^*$
Jones and Allendorf (6)	$\Delta P_T = \frac{\rho_s v_s^2}{2 g} + \frac{\rho u^2}{2 g} + \rho_s L + (f_f + f_s) L/D$
Farbar (7)	$\frac{\Delta P_s}{\Delta P_f} = \Gamma \tan \alpha$
Ghosh and Prem Chand (8)	$\frac{\Delta P_s}{\Delta P_f} = \frac{3}{8} \frac{Cd}{\lambda} \frac{\rho}{\rho_s} \Gamma Re^{0,25} Fr^{-0,5}$
Hariu and Molstad (9)	$\frac{\Delta P_s}{\Delta P_f} = 0,192 f_f \left( \frac{1}{u} + v_s^2 \frac{f_s}{gD} \right) G_s$

(Continuação)

TABELA (II.1) - CORRELAÇÕES EMPIRICAS DE QUEDA DE PRESSÃO SEGUNDO REVISÃO DE KHAN-PEI

Metha and Smith (10)	$\frac{\Delta P_s}{\Delta P_f} = \left( \frac{f_s}{f_f} \right) \left( \frac{v_s}{u} \right) \left( \frac{G_s}{f} \right)$
Razumou (11)	$\Delta P_T = \frac{(\rho_s - \rho) L}{\rho_s v_s A} + \frac{\lambda L \rho u^2}{2gD} + \frac{G_s v_s}{gA}$
Stemerding (12)	$\frac{\Delta P_T}{L} = \frac{G_s}{v_s} \left( 1 + \bar{\gamma} \frac{L}{A} \right) + \frac{v_r}{u} \left( \frac{f_s}{2} + \frac{D}{L} \right) F_r$
Voght and White (13)	$\frac{\Delta P_s}{\Delta P_f} = K \left( \frac{D}{dp} \right)^2 \left( \frac{\rho}{\rho_s} \frac{\Gamma}{Re} \right)^K$

$$\frac{\Delta P_{st}}{\Delta P_f} = 2,66 \left[ \left( \frac{C_d}{\lambda} \right) \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right) \left( \frac{d}{D} \right)^2 \left( \frac{Re}{Fr} \right)^{0,5} \left( \frac{r}{\phi} \right)^{0,5} \right] \quad (\text{II.1})$$

onde:  $C_d = \frac{4}{3} - \frac{g d_p \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)}{u_\infty^2}$  é o coeficiente de arraste da partícula isolada.

$\lambda = \frac{0,3164}{4Re^{0,25}}$  é o fator de atrito, dado pela equação de Blasius, adimensionalizado.

$Re = \frac{\rho u D}{\mu}$  é o nº de Reynolds, adimensionalizado.

$Fr = \frac{u^2}{gD}$  é o nº de Froude, adimensionalizado.

$\Gamma = \frac{w_s}{w_f}$  é a razão de carga sólido-gás, adimensionalizada.

Os autores consideraram que as velocidades das partículas e do gás eram iguais por tratar-se de um escoamento em fase muito diluída.

Essa correlação, dentre as existentes na literatura, nos parece como a mais confiável dentre as correlações empíricas uma vez que, reúne um maior número de parâmetros que descrevem mais adequadamente o comportamento da suspensão.

### II.2.2. REGIÃO DE ACELERAÇÃO

#### II.2.2.1. QUEDA DE PRESSÃO

Sempre que as partículas sólidas são alimentadas no seio de um fluido em escoamento ou mesmo quando a mistura encontra um acidente como válvula, cotovelo, etc. no seu percurso, ocorre uma região onde os fluidos e as partículas possuem variação de velocidade, mesmo no escoamento não transiente.

A figura (II.2) mostra a queda de pressão ao longo do sistema de transporte pneumático vertical em um fluxo de suspensão sólido-gás em fase diluída, onde  $\Delta P_{TA}$  e  $\Delta P_T$  correspondem a queda de pressão na região de aceleração e a total, respectivamente.

Somente na década de sessenta surgiram as primeiras correlações considerando a queda de pressão na região de aceleração. Devido a complexidade da determi-

nação do limite entre as duas regiões de escoamento distinto e a dificuldade de se determinar os parâmetros que descrevem o tipo de escoamento da mistura, as correlações propostas apresentam grandes limitações quanto a consistência do resultado de suas aplicações, ficando restritos a uma pequena faixa de condições.

Rose-Duckworth (15), realizaram uma análise simplificada da conservação do movimento aplicada a um fluxo de suspensão de partículas em um fluido, acrescida de resultados experimentais com dois tipos de sistema de transporte horizontal.

Nesse trabalho, utilizando como sólidos esferas de vidro, cobre, chumbo e semente de mostarda transportados por água e o ar em equipamentos adequado a cada caso, os autores concluíram que a queda de pressão estática,  $\Delta P_m$ , ao longo do sistema era fornecida pela soma das quedas de pressões devido ao efeito gravitacional,  $\Delta P_{mg}$ , atrito da mistura,  $\Delta P_{mf}$ , e aceleração das partículas,  $\Delta P_{ma}$ , onde essa última foi obtida de análise experimental do sistema em questão. A expressão que relaciona esses componentes se apresenta da forma integral:

$$\Delta P_m = g \operatorname{sen} \theta \int_{x_1}^{x_2} \left[ \rho + \frac{G_s}{v_s} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) \right] dx + \frac{4}{3} \int_{x_1}^{x_2} \tau_{mo} dx + \\ + \left[ G_f (u_2 - u_1) + G_s (v_{s2} - v_{s1}) \right] \quad (\text{II.2})$$

onde:  $x_1, x_2$  são os limites de integração da região de aceleração.

$v_s = \frac{\Delta P_a}{G_s}$  é a velocidade do sólido determinada pela razão entre a queda de pressão requerida para acelerar as partículas e a velocidade mísica das mesmas.

$$\frac{\Delta P_A}{\rho u^2} = 1,12 \frac{G_s}{G_f} \times f_4 \left( \frac{u^2}{gd_p \left( \frac{\rho_s}{\rho} \right)^2} \right) \times f_5(\theta)$$

As funções  $f_4$  e  $f_5$  são lidas em gráficos da forma:  $\log f_4 \left( \frac{u^2}{gd_p \left( \frac{\rho_s}{\rho} \right)^2} \right) \times \log \left( \frac{u^2}{gd_p} \right)$  e  $f_5(\theta) \times (\theta)$ , respectivamente.

Os autores estenderam a mesma correlação para aplicação em transporte pneumático vertical, considerando apenas que o ângulo  $\theta$  fosse igual a  $90^\circ$ . Por essa razão a sua confiabilidade e validade são questionáveis para esse caso.

Stemerding (12), realizou um trabalho experimental em um sistema de transporte pneumático vertical introduzindo novos parâmetros de origem empírica, além de concluir através dos seus resultados obtidos, que o coeficiente de atrito dos sólidos com a parede do tubo é um valor constante e igual a 0,003.

A expressão para queda de pressão ao longo do sistema, baseou-se na análise da relação teórica obtida por Hinze (16), fornecendo a seguinte correlação:

$$\frac{\Delta P_T}{L} = \frac{w_s}{v_{s\infty}} \left(1 - \frac{\bar{\gamma} L_A}{L}\right) + \frac{v_{s\infty}}{u} \left(\frac{f_s}{2} + \frac{D}{L}\right) F_r \quad (\text{II.3})$$

O valor de  $\bar{\gamma} L_A$  foi encontrado igual a 5,5 para uma velocidade de fluido maior que 5 m/s.

#### II.2.2.2. COMPRIMENTO DE ENTRADA

O comportamento dinâmico da suspensão antes de atingir um regime de escoamento estável, se caracteriza pela variação no perfil das velocidades dos sólidos e gás, concentração volumétrica e, consequentemente os outros parâmetros que descrevem este comportamento também variam, visto que dependem das variáveis anteriores.

São poucos os trabalhos experimentais existentes

tes na literatura propondo correlações que visem o estudo das variáveis nessa região. Os principais estudos neste aspecto, destacam a importância de se conhecer o comprimento de entrada.

Rose-Duckworth (15), no mesmo trabalho em que propuseram a correlação para queda de pressão, apresentaram uma correlação para o cálculo do comprimento de entrada de forma simplificada e adimensionalizada, como:

$$\frac{L_A}{D} = 6 \left[ \left( \frac{W_s}{\rho g^{1/2} D^{5/2}} \right) \left( \frac{D}{d_p} \right)^{1/2} \left( \frac{\rho_s}{\rho} \right)^{1/2} \right]^{1/3}$$

(II.4)

Contudo, por razões semelhantes das considerações feitas para queda de pressão de estender a aplicação da expressão desenvolvida para transporte horizontal ao caso vertical fazendo  $\theta$  igual a  $90^\circ$ , os resultados obtidos por essa correlação não se mostraram satisfatórios.

Shimizu et al (17), partindo de um estudo experimental em um sistema de transporte pneumático vertical para uma suspensão sólido-gás, utilizando esferas de cobre de diferentes diâmetros e medindo sistematicamente a queda de pressão e comprimento de entrada, propuseram uma correlação para definir uma relação de número de Reynolds aparente,  $Re_m$ , e, concluíram que o comprimento

de entrada era função crescente desse número para fai-  
xas distintas de razão de carca sólido-gás. Baseado nes-  
sa conclusão, apresentaram um novo método para determi-  
nação de comprimento de entrada adimensional, através  
de um gráfico de  $L_{A/D} \times Re_m$ , mostrado na figura (II.3).

A expressão que define esse número de Reynolds  
aparente tem a forma:

$$Re_m = (1 + \Gamma) \frac{\varepsilon \rho u D}{\mu} \quad (\text{II.5})$$

onde:  $\Gamma = \frac{w_s}{w_f}$

Dentre as correlações de natureza empírica pa-  
ra o cálculo do comprimento de entrada, essa última mos-  
trou-se mais satisfatória no caso em estudo, pois intro-  
duziu parâmetros, tal como porosidade, que descreve mais  
adequadamente o comportamento da mistura. Contudo, o nú-  
mero de variáveis relacionadas ainda é muito limitado,  
o que certamente concorre para uma margem de erro consi-  
derável, caso se mude as condições experimentais.

## II.3. TRABALHOS COM BASE EM EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO DA MASSA E DO MOVIMENTO

### II.3.1. QUEDA DA PRESSÃO

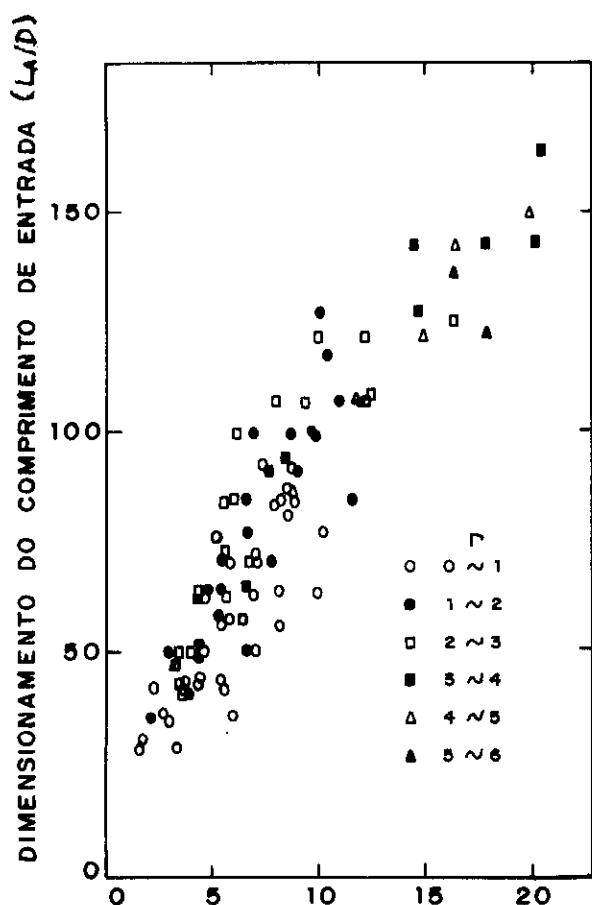


FIG. (II-3) (Nº DE REYNOLDS APARENTE )  $Re_m$

As formulações da literatura para o estudo desse parâmetro, basearam-se em duas equações da continuidade para os constituintes sólido-gás, e duas equações de movimento, que por sua vez envolvem um conjunto de outras variáveis como : velocidade do sólido, do gás, concentração volumétrica e outros, descrevendo de forma mais precisa o modelo de fluxo em estudo. Por esta razão o método de cálculo das mesmas serão apresentados neste capítulo.

Para descrever as formulações destas equações, foi considerado inicialmente o modelo de fluxo homogêneo para uma suspensão uniforme sólido-gás em secção constante. As equações que descrevem este modelo são conhecidas na literatura, sendo utilizadas por diversos autores e, citados a seguir:

Equação da continuidade do fluido

$$\frac{d(\epsilon \rho u)}{dz} = 0 \quad (\text{II.6})$$

Equação da continuidade do sólido

$$\frac{d[(1-\epsilon) \rho_s v_s]}{dz} = 0 \quad (\text{II.7})$$

Equação de movimento da mistura :

$$-\frac{dp}{dz} = \left[ (1-\epsilon) \rho_s v_s \frac{dv_s}{dz} + \epsilon \rho u \frac{du}{dz} \right] + \left[ \rho_s (1-\epsilon) + \rho \epsilon \right] g + F_w \quad (\text{II.8})$$

Os três componentes mostrados no lado direito da equação (II.8) representam a queda de pressão devido à aceleração das partículas e do fluido ao efeito gravitacional e ao atrito da mistura com a parede do tubo, respectivamente.

A quarta equação, ou seja, a equação do movimento do sólido é de natureza controvertida. Em face a isso, existem na literatura várias equações propostas para descreverem este modelo, destacando-se os de:

Soo (18), que propôs o modelo simplificado de queda de pressão da fase sólida com a seguinte equação:

$$\rho_s v_s \frac{dv_s}{dz} = F_{rs} - \rho_s g \quad (\text{II.9})$$

onde:  $F_{rs}$  é a força de arraste por unidade de volume.

No modelo de Capes-Nakamura (19) a equação foi proposta para queda de pressão nas duas fases sob a forma:

$$\rho_s v_s \frac{dv_s}{dz} = F_{rs} - \rho_s g - \left( \frac{dp}{dz} \right) \quad (\text{II.10})$$

Enquanto Gidaspow (20), propôs um modelo que difere do apresentado por Soo (18) pela introdução do

termo da velocidade relativa, expresso como:

$$-\frac{\rho_s}{2} \frac{d(u-v_s)^2}{dz} = F_{rs} - \rho_s g \quad (\text{II.11})$$

A validade das equações (II.8) a (II.11) são questionadas, pois as mesmas desprezam o atrito dos sólidos com a parede do tubo e supõem que a queda de pressão devido ao atrito da mistura com a parede, está relacionada diretamente com o coeficiente de atrito de Fanning para o fluxo de gás,  $f_f$ . Por essa razão não é possível afirmar que este modelo é mais confiável que outros convencionais para se predizer parâmetros como: as velocidades das partículas e gás, concentração volumétrica e queda de pressão.

Leung (21), partindo de análises das correlações anteriores, reescreveu a equação (II.8) para o cálculo desta queda de pressão considerando o atrito da mistura sólido-gás com a parede do tubo, onde a equação obtida corresponde a uma forma expandida daquela citada acima, descrita como:

$$\begin{aligned} -\frac{dp}{dz} &= [\rho_s(1-\varepsilon) + \rho\varepsilon]g + \left[ (1-\varepsilon)\rho_s v_s \left(\frac{dv_s}{dz}\right) + \rho\varepsilon u \left(\frac{du}{dz}\right) \right] + \\ &+ \left[ \frac{2f_f\rho u^2 \varepsilon}{D} + \frac{2f_s \rho_s v_s^2 (1-\varepsilon)}{D} \right] \quad (\text{II.12}) \end{aligned}$$

O comportamento da queda de pressão,  $\rho\varepsilon g$ , de

vido ao efeito gravitacional do gás na mistura é desprezível quando comparado com o do sólido, enquanto o termo,  $\epsilon \rho u \frac{du}{dz}$ , corresponde a aceleração do gás e também normalmente desprezível devido as pequenas variações na velocidade linear do fluido. Com estas considerações a eq. (II.12) adquire a forma simplificada:

$$-\frac{dp}{dz} = (1-\epsilon) \rho_s g + (1-\epsilon) \rho_s v_s \frac{dv_s}{dz} + \left[ \frac{2f_s (1-\epsilon) \rho_s v_s^2}{D} + \frac{2f_f \rho u^2 \epsilon}{D} \right] \quad (\text{II.13})$$

Dentre as equações existentes para o cálculo da queda de pressão a equação (II.13), no caso em questão, relaciona um maior número de variáveis que permitem a obtenção de resultados mais confiáveis, vistos que esta apresenta de forma mais abrangente os componentes que descrevem o parâmetro para cada regime de escoamento.

### II. 3.1.1. CORRELAÇÕES PARA O COEFICIENTE DE ATRITO

DOS SÓLIDOS  $f_s$

A queda de pressão devido ao atrito dos sólidos com a parede poderá se constituir numa parcela razável da queda de pressão total ao longo do sistema, tornando-se necessário conhecer com precisão os parâmetros

que a compõem. Contudo, o número de correlações que descrevem o coeficiente de atrito é muito limitado e restrito a uma pequena faixa de condições de operação e aplicação.

Somente a partir da década de sessenta, constatou-se a necessidade de realizar estudos que permitem a obtenção de expressões para o cálculo do coeficiente de atrito para os sólidos visando ampliar a sua faixa de aplicação.

Com o objetivo de preencher essa lacuna existente, foram desenvolvidos diversos trabalhos partindo de resultados experimentais obtidos, dentre os quais destacam-se: o de Stemerding (12), citado anteriormente que obteve um valor constante para  $f_s$  e igual a 0,003.

Reddy e Pei (22), que na discussão de seus próprios dados experimentais e, considerando a distribuição de partículas uniforme, obteve uma expressão para a queda de pressão devido ao atrito dos sólidos com a parede da forma  $\Delta P_{st} = 0,045 W_s \rho_s$ , da qual resultou uma correlação para  $f_s$ , quando comparada ao termo correspondente da equação (II.12). A expressão desta correlação de  $f_s$ , bem como as que serão mencionadas a seguir, encontram-se relacionadas na tabela (II.2).

TABELA (II.2) - CORRELAÇÕES PARA O COEFICIENTE DE ATRITO  $f_s$ :

AUTORES	$f_s$
Stemerding (12)	0,003
Reddy e Pei (22)	$0,046 v_s^{-1}$
Van Swaaij et all (23)	$0,080 v_s^{-1}$
Capes e Nakamura (26)	$0,048 v_s^{-1,22}$
Kimić et all (25)	$0,0742 v_s^{-0,75}$
Konno e Saito (24)	$0,0285 \sqrt{gD} v_s^{-1}$
Yang (27), Vertical	$0,00315 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \left[ \frac{(1-\varepsilon) u_\infty}{(u - v_s)} \right]^{-0,979}$
Yang (28) , Horizontal	$0,0293 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \left[ \frac{(1-\varepsilon) u}{\sqrt{gD}} \right]^{-1,16}$

Van Swaaij et al (23), demonstraram que a tensão de cizalhamento na parede de um transporte pneumático se relacionava diretamente com o tempo de escoamento dos sólidos medido na vizinhança da parede, a qual foi determinada pelo método de succão. Partindo desta observação e de seus próprios dados experimentais, obtiveram a expressão de  $f_s$ .

Os trabalhos desenvolvidos por Konno e Saito (24) e Kimiec et al (25), adotaram formas semelhantes baseando-se na aplicação da equação de Fanning para o fluxo de sólidos em um tubo vertical, introduzindo o termo de coeficiente de atrito do sólido na parede através da definição análoga desse coeficiente para gás-parede, cuja equação é descrita como:

$$\tau_s = \frac{1}{2} f_s \rho_s (1-\varepsilon) \left[ \frac{w_s}{A (1-\varepsilon)} \right]^2 \quad (\text{II.14})$$

As formulações propostas em cada um desses trabalhos foram obtidas finalmente pela aplicação de seus resultados experimentais.

Aproximações melhores e mais abrangentes foram encontradas através de métodos teóricos e experimentais, tais como: de Capes e Nakamura (26), que pro-

puseram dois modelos para o transporte vertical, dos quais foram sugeridos os modelos uniforme e anular, sendo que este último mostrou-se mais realístico. A correlação desses autores para  $f_s$ , foi determinada por solução numérica. Yang (27), partindo de dados experimentais próprios e da equação modificada de Ergun para o cálculo da queda de pressão, propôs duas correlações para o coeficiente de atrito dos sólidos nos casos de transporte vertical e horizontal implícitas em  $\epsilon$ .

### II. 3.1.2. QUEDA DE PRESSÃO NA REGIÃO DE ACELERAÇÃO

Para determinação deste valor nesta região, foi adotado o modelo de Leung (21), onde a equação (II. 13) utilizada foi colocada de forma integral, visto que a concentração volumétrica e a velocidade dos constituintes da mistura, bem como as variáveis que são definidas em função destes parâmetros variam com a distância. Portanto, as condições de contorno no limite desta região deverão ser observadas.

A forma integral da equação (II.13) é expressa como:

$$\Delta P_{TA} = \int_{v_{s1}}^{v_{s2}} \rho_s (1-\epsilon) v_s dv_s + \int_0^{L_A} (1-\epsilon) \rho_s g dz +$$

$$+ \int_0^{L_A} \frac{2f_s \rho_s (1-\varepsilon) v_s^2}{D} dz + \int_0^{L_A} \frac{2f_f \rho \varepsilon u^2}{D} dz \quad (\text{II.15})$$

Os limites de integração  $v_{s_1}$  e  $v_{s_2}$  correspondem respectivamente as condições em  $z=0$  e em  $z=L_A$ .

### III.3.1.3 QUEDA DE PRESSÃO NA REGIÃO DE ESCOAMENTO ESTABELECIDO

O cálculo da queda de pressão nesta região é determinado pela equação (II.15). Considerando que o termo referente a aceleração dos sólidos é nulo. Com isso, a equação anterior assume a forma:

$$\frac{\Delta P_{TRE}}{L} = (1-\varepsilon)\rho_s g + \frac{2f_s \rho_s (1-\varepsilon) v_s^2}{D} + \frac{2f_f \rho \varepsilon u^2}{D} \quad (\text{II.16})$$

Finalmente a queda de pressão ao longo do sistema é expressa pela soma das equações (II.15) e (II.16) referentes às duas regiões de fluxos como mostrada a seguir:

$$\Delta P_T = \Delta P_{TA} + \Delta P_{TRE} \quad (\text{II.17})$$

### II.3.2 CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA E VELOCIDADES DOS SÓLIDOS E FLUIDO

A pesquisa da literatura apresentou um razoável número de formulações para o cálculo da concentração volumétrica,  $C_V = (1-\varepsilon)$ , no sistema. Contudo, foi colocada a necessidade de se conhecer as velocidades locais dos constituintes da mistura, sólido e fluido,  $v_s$  e  $u$ , respectivamente.

Um método bastante simplificado e conhecido para determinação de  $C_V$ , baseia-se no cálculo da velocidade local do sólido,  $v_s$ , partindo das equações de conservação da massa para sólido e gás que é uma função implícita em  $\varepsilon$ ,  $v_s$  e  $u$ , considerando que a velocidade terminal da partícula sólida é igual a velocidade relativa dos constituintes da mistura, e ainda que a velocidade local do fluido,  $u$ , poderá ser igual a velocidade superficial,  $q$ , do mesmo para sistema com escoamento uniforme e em fase muito diluída. O sistema de equações que permite calcular os valores destas variáveis é composto das seguintes equações já simplificadas para escoamento uniforme.

Equação de conservação dos constituintes da mistura:

Para o sólido:

$$v_s = \frac{w_s / \rho_s}{A (1 - c)} \quad (\text{II.18.a})$$

Para o fluido:

$$u = \frac{w_f / \rho}{A \epsilon} \quad (\text{II.18.b})$$

Velocidade terminal da partícula sólida, consideran  
do  $u_\infty = v_r$

$$u_\infty = u - v_s \quad (\text{II.19.})$$

onde:  $u_\infty = \frac{\text{Re}_\infty \mu}{\rho dp}$  é a equação da velocidade terminal  
da partícula sólida.

E, sendo  $\text{Re}_\infty$  calculado através das várias correlações  
propostas na literatura, tal como a de Yuan (29)

$$\begin{aligned} \log \text{Re}_\infty = & - 1,38 + 1,94 \log \Lambda - 8,60 \times 10^{-2} (\log \Lambda)^2 - \\ & - 2,52 \times 10^{-2} (\log \Lambda)^3 + 9,19 \times 10^{-4} (\log \Lambda)^4 \\ & + 3,35 \times 10^{-4} (\log \Lambda)^5 \end{aligned}$$

$$\text{onde: } \Lambda = \left[ \frac{4}{3} g dp^3 \frac{(\rho_s - \rho) \rho}{\mu^2} \right]$$

Devido às simplificações deste método, a sua  
aplicação fica restrita a uma faixa muito limitada de  
operação.

Métodos mais aproximados que conduzem a determinação destas velocidades e concentração volumétrica , surgiram baseados no balanço de forças das partículas sólidas na seção diferencial  $dz$ , representado por:

$$\frac{dG_s}{dt} \frac{dv_s}{dt} = dF_d - dF_g - dF_f \quad (\text{II.20})$$

onde:  $dG_s = W_s \frac{dz}{v_s}$  é a massa das partículas

Nesta equação (II.20) o termo à esquerda corresponde a aceleração māssica e os três componentes a direita representam a força de interação sólido-gás, gravitacional e o atrito dos sólidos com a parede, respectivamente. Estas forças podem ser representadas pela seguinte forma diferencial:

$$dF_d = \frac{3}{4} \frac{C_{DM} \rho (u - v_s)^2}{(\rho_s - \rho) d_p} \frac{dz}{v_s} \quad (\text{II.20.a})$$

$$dF_g = g \frac{W_s dz}{v_s} \quad (\text{II.20.b})$$

$$dF_f = \frac{2 f_s v_s}{D} W_s dz \quad (\text{II.20.c})$$

Substituindo-se os componentes de forças dados pelas equações (II.20.a,b,c) na equação (II.20), tem-se:

$$\frac{w_s}{v_s} \frac{dz}{dt} - \frac{dv_s}{dt} = \frac{3}{4} \frac{C_{DM} \rho (u-v_s)^2}{\rho_s dp} w_s \frac{dz}{v_s} - g - \frac{w_s}{v_s} \frac{dz}{v_s} -$$

$$- \frac{f_s v_s}{2D} w_s dz \quad (\text{II.21})$$

Simplificando a equação (II.21), obtém-se:

$$\frac{dv_s}{dt} = \frac{3}{4} \frac{C_{DM} \rho (u-v_s)^2}{\rho_s dp} - g - \frac{f_s v_s^2}{2D} \quad (\text{II.21.a})$$

Supondo-se que  $v_s = dz/dt$ , a equação acima pode ser expandida para a forma:

$$v_s \frac{dv_s}{dz} = \frac{3}{4} \frac{C_{DM} \rho (u-v_s)^2}{(\rho_s - \rho) dp} - g - \frac{2 f_s v_s^2}{D}$$

$$(II.22)$$

Yang (27), partindo da equação de balanço de força e considerando regime permanente, obteve uma equação para velocidade local do sólido implícita em  $\epsilon$  e  $f_s$ , onde este último foi expresso em função de  $\epsilon$  e  $v_s$ , segundo correlação proposta pelo próprio autor já apresentada anteriormente na tabela (II.2).

As velocidades locais dos sólidos e do gás são calculadas por Yang (27) através da solução do sistema composto pelas equações de conservação da massa

(II.18.a,b), e a equação e correlação obtidas pelo pró prio autor, assim descritas:

$$v_s = \frac{w_s / \rho_s}{(1-\epsilon) A} \quad (\text{II.18.a})$$

$$u = \frac{w_f / \rho}{A \epsilon} \quad (\text{II.18.b})$$

$$v_s = u - v_s \sqrt{\left(1 + \frac{2 f_s v_s^2}{g D}\right) \epsilon^{4,7}} \quad (\text{II.23})$$

$$f_s = 0,00315 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \left[ \frac{(1-\epsilon) u_\infty}{(u-v_s)} \right]^{-0,979} \quad (\text{II.24})$$

#### II.3.4. COMPRIMENTO DE ENTRADA

São poucos os trabalhos existentes na literatura para determinação do comprimento de entrada com base nas equações da continuidade e de movimento apresentadas no ítem (II.3.1). Dentre estas equações, a equação obtida por Yang (27), vem sendo a mais aplicada recentemente. Ela foi estabelecida a partir da equação (II.22) resultante do balanço de forças nas partículas sólidas.

Neste mesmo trabalho o autor sugeriu uma modificação no coeficiente de arraste,  $C_{DM}$ , considerando o

efeito da porosidade,  $\epsilon$ , obtendo a seguinte correlação:

$$C_{DM} = C_{DS} \cdot \epsilon^{-4,7} \quad (\text{II.25})$$

As expressões que definem este coeficiente de arraste estão relacionadas com o número de Reynolds para as partículas sólidas,  $Re_p$ , e são distintas para diferentes faixas desse número, como apresentadas a seguir:

Stokes (30)

$$C_{DS} = 24/Re_p, \text{ para } Re_p \leq 0,1 \quad (\text{II.26.a})$$

Schiller e Naumann (31)

$$C_{DS} = C_{DS_{STOKES}} \left[ (1+0,150 (Re_p))^{0,687} \right], \text{ para}$$

$$Re_p < 800 \quad (\text{II.26.b})$$

Yang e Yu (32)

$$C_{DS} = 24 (Re_p)^{-1} + 3,6 (Re_p)^{-0,313}, \text{ para}$$

$$2,0 < Re_p < 1000 \quad (\text{II.26.c})$$

Enquanto para  $1000 < Re_p < 2,5 \times 10^5$  o coeficiente de arraste assume um valor médio constante de 0,44 e  $Re_p > 2,5 \times 10^5$  e este valor sofre um decréscimo em 50% devido ao descolamento completo da camada limite em torno das partículas sólidas.

A determinação do comprimento de entrada, resulta da solução da integração da equação (II.22) por um método numérico adequado ao tipo de função. A forma integral da equação (II.22) pode ser expressa como:

$$\int_0^{L_A} dz = \left\{ \begin{array}{l} v_{s_2} \\ \frac{v_s dv_s}{\frac{3}{4} C_{DS} \tilde{c}^{4,7} \frac{\rho (u - v_s)}{(\rho_s - \rho) dp} - \frac{2 f_s v_s^2}{D} - g} \end{array} \right.$$

(II.27)

A velocidade local inicial dos sólidos,  $v_{s_1}$ , na entrada da alimentação é calculada pela equação (II.18.a) considerando a porosidade inicial do leito,  $\epsilon_1$ , igual a de um leito compacto fechada para 0,5. Enquanto a velocidade local final  $v_{s_2}$ , deste, corresponde aquela na qual o escoamento é uniforme e, é determinada pela solução do sistema composto pelas equações (II.18.a,b), (II.23) e (II.24) através de métodos numéricos, utilizando um programa de computador para obtenção dos resultados (ANEXO A).

Outra versão para o estudo do comportamento dinâmico do fluido neste tipo de transporte foi apresentado por Massarani e Santana (33), os quais forneceram expressões para a força resistiva sólido-fluido. No entan-

to este estudo será apresentado mais detalhadamente no capítulo posterior, uma vez que a análise destas expressões se constituem em um dos objetivos do presente trabalho.

## CAPÍTULO III

### MODELAGEM MATEMÁTICA

### III.1. INTRODUÇÃO

No estudo dos parâmetros dinâmicos que descrevem o escoamento do fluido deste trabalho, foram adotadas as correlações de Massarani e Santana (33) para força de interação sólido-gás, ou força resistiva,  $m$ , devido ao sucesso obtido no correlacionamento de resultados no transporte hidráulico de sólidos em secções constantes, segundo Massarani e Restini (34), D'Avila e Massarani (35) e recentemente Rocha (36).

Estas correlações, serão aqui estudadas através de análise comparativa com dados disponíveis na literatura e com subsídios de novas determinações experimentais. Será desenvolvido também e, pela primeira vez, uma nova comprovação experimental da aplicação destas expressões considerando a influência da aceleração de fluido,  $\ddot{u}$ , e a do sólido,  $\dot{v}_s$ , na caracterização da região de entrada, pela determinação do comprimento destas regiões.

Visando condensar os resultados obtidos experimentalmente no escoamento estabelecido da mistura sólido-fluido foi proposta uma nova correlação para o coeficiente de atrito dos sólidos.

### III.2. MODELO UTILIZADO NO ESCOAMENTO ESTABELECIDO

III.2.1. CÁLCULO DA VELOCIDADE RELATIVA SÓLIDO-FLUIDO,  
POROSIDADE E QUEDA DE PRESSÃO

Supondo um escoamento unidimensional e permanente com distribuição uniforme da concentração volumétrica, a determinação destes parâmetros é resultante da solução de um conjunto de equações diferenciais que se compõem de duas equações de conservação de massa para os constituintes sólido e fluido apresentadas no capítulo anterior pelas equações (II.18.a,b), e uma equação de movimento do sólido, adotando uma forma análoga à de Soo (18) equação (II.9), adaptada por Massarani e Santana (33) ao estudo do transporte de partículas, sem o efeito da aceleração, sendo que no presente trabalho foi incluído o efeito do atrito dos sólidos com a parede através do coeficiente de atrito dos sólidos,  $f_s$ . Partindo disso o sistema de equações fica constituído por:

$$v_s = \frac{w_s / \rho_s}{A (1-\epsilon)} \quad (\text{II.18.a})$$

$$u = \frac{w_f / \rho}{A\epsilon} \quad (\text{II.18.b})$$

$$m = (1-\epsilon) \rho_s g + \frac{2f_s (1-\epsilon) \rho_s}{D} v_s^2 \quad (\text{III.1})$$

Para resolução deste sistema de equações, será necessário se conhecer expressões para a força resistiva,  $m$ . Com este objetivo foram utilizadas as correlações de

Massarani e Santana (33) obtidas pelas análises de dados experimentais em sistemas particulados para o fenômeno da fluidização e sedimentação. As expressões que descrevem este valor são distintas para diferentes faixas de porosidade,  $\epsilon$ , e número de Reynolds,  $Re_p$ , e são funções da velocidade relativa,  $u-v_s$ , e da porosidade. Estas correlações são apresentadas como:

Para  $\epsilon < 0,75$  e  $Re_p$

$$m = \left[ \frac{18\mu(1-\epsilon) [1 + (1-\epsilon)^{1/3}] e^{\frac{(1-\epsilon)}{0,6\epsilon}}}{dp^2} + \right. \\ \left. + \frac{44\rho(1-\epsilon)(u-v_s)}{dp e^{4,74\epsilon}} \right] (u-v_s) \quad (\text{III.2.a})$$

Para  $\epsilon \geq 0,75$  e  $Re_p < 70$

$$m = \left[ \frac{18\mu(1-\epsilon) [1 + (1-\epsilon)^{1/3}] e^{\frac{(1-\epsilon)}{0,6\epsilon}}}{dp^2} + \right. \\ \left. + 1,5(1-\epsilon)\epsilon^{9/5} \left( \frac{\mu\rho^4}{dp^6} \right)^{1/5} (u-v_s) \right] (u-v_s) \quad (\text{III.2b})$$

Para  $\epsilon \geq 0,75$  e  $Re_p \geq 70$

$$m = \left[ \frac{44\rho(1-\epsilon)}{dp e^{4,74\epsilon}} \right] (u-v_s)^2 \quad (\text{III.2c})$$

$$\text{onde } Re_p = \frac{\rho(u-v_s) s}{\mu}$$

A solução numérica do sistema de equações não pode ser obtida de forma direta para valores de porosidade e da velocidade relativa desconhecidas, consequentemente não será possível identificar qual dentre as formulações de  $m$  está de acordo com as condições estabelecidas. Devido a estas dificuldades, foi desenvolvido um estudo através de simulação matemática para elaboração de um método de cálculo apropriado.

Dentre os métodos estudados, o de convergência simples mostrou-se mais adequado, além de apresentar operação de cálculo bastante simplificada. Um programa de computador (Anexo: A ) que envolve todo procedimento matemático foi elaborado para determinação das funções envolvidas, à partir da atribuição inicial de um valor para  $\epsilon$ , no intervalo 0 a 1, calculando-se com este valor inicial de  $\epsilon$ , as velocidades locais dos sólidos e fluido pelas equações (II.18.a,b) e o número de Reynolds, Rep. Desta forma foi identificado e determinado o valor de  $m$  entre as equações (III.2.a,b,c). Com  $m$ , calculou-se  $\epsilon$  pela equação (III.1), e em seguida testou-se esse valor com o anterior correspondente. Se a diferença entre eles fosse maior que  $10^{-5}$ , a operação seria repetida, considerando o  $\epsilon$  calculado como o no-

vo valor inicial atribuido ao mesmo, caso contrário, o valor real de  $\epsilon$  seria tomado como o último valor calculado.

Deste modo, possuindo-se  $\epsilon$ , a queda de pressão na região de escoamento estabelecido,  $\Delta P_{TRE}$ , poderá ser calculada, através da equação proposta por Leung (21), equação (II.16) ou seja:

$$\frac{\Delta P_{TRE}}{L} = (1-\epsilon) \rho_s g + \frac{2f_s \rho_s (1-\epsilon) v_s^2}{D} + \frac{2f_f \rho \epsilon u^2}{D}$$

(II.16)

### III.2.2 FORMULAÇÃO PARA O COEFICIENTE DE ATRITO DOS SÓLIDOS COM A PAREDE DO TUBO

A partir da discussão acima verifica-se que para a determinação de  $f_s$  necessita-se de uma expressão para  $\Delta P_T$  que permita obter  $f_s$  possuindo-se valores experimentais de  $\Delta P_T$  além de um amétodo para determinar a porosidade,  $\epsilon$ . Uma correlação para  $f_s$  poderá ser portanto desenvolvida baseando-se na equação de movimento da mistura para a queda de pressão, considerando a distribuição de partículas uniforme no escoamento do fluido, expressa pela forma expandida da equação (II.12) como:

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{d}{dz} \left[ \rho \epsilon u^2 + \rho_s (1-\epsilon) v_s^2 \right] + \rho \epsilon g + \rho_s (1-\epsilon) g + \frac{4}{D} \tau_g + \frac{4}{D} \tau_s \quad (\text{III.3})$$

Baseando-se numa análise de magnitude dos componentes, supõe-se que o termo da aceleração é nula para regime de escoamento estabelecido e que o termo ( $\rho \epsilon g$ ) é desprezível com relação aos outros termos, esta equação passa para a forma simplificada:

$$-\frac{dp}{dz} = (1-\epsilon) \rho_s g + \frac{4}{D} (\tau_g + \tau_s) \quad (\text{III.4})$$

Integrando-se na seção reta vertical, L, e rearranjando, a tensão de cizalhamento na parede é fornecida da forma:

$$\tau_s = \left[ \Delta P_T - \Delta P_f - (1-\epsilon) \rho_s g L \right] \frac{D}{4L} \quad (\text{III.5})$$

$$\text{onde: } \frac{\Delta P_f}{L} = \frac{4 \tau_g}{D}$$

Considerando, tal como Konno e Saito (24), que o termo de atrito sólido-parede é encontrado através de uma definição análoga do termo de atrito fluido-parede

da equação de Fanning para o fluxo de sólido em um tubo vertical. A expressão que descreve esta tensão é dada por:

$$\tau_s = \frac{1}{2} f_s \rho_s (1-\epsilon) \left[ \frac{w_s}{A(1-\epsilon)} \right]^2 \quad (\text{II.14})$$

Substituindo-se esta equação (II.14) em (III.5), obtem-se a expressão para o fator de atrito dos sólidos,  $f_s$ .

$$f_s = \frac{\left[ \Delta P_T - \Delta P_f - (1-\epsilon) \rho_s g L \right] D}{(1-\epsilon) A \rho_s v_s^2} \quad (\text{III.6})$$

ou ainda:

$$f_s = \frac{\frac{\Delta P_{st}}{L} D}{(1-\epsilon) \rho_s A v_s^2} \quad (\text{III.7})$$

onde:  $\Delta P_{st} = \Delta P - \Delta P_f - (1-\epsilon) \rho_s L$

Os dados experimentais de  $\Delta P_{st}/L$  acoplados à determinação de  $\epsilon$  poderão impor para  $f_s$  uma forma, para a qual proporemos:

$$f_s = K \left[ \frac{w_s / \rho_s}{(1-\epsilon) A} \right]^a \quad (\text{III.8})$$

Baseando-se no trabalho recente de Kimicć et al (25) . Os valores de K e a serão obtidos através de otimização da equação (III.8) em relação aos resultados experimentais.

### III.3. MODELO UTILIZADO NA REGIÃO DE ACELERAÇÃO

O comportamento dinâmico desta região foi estudado utilizando um sistema de equações que se compõe de duas equações de conservação da massa, uma da quantidade de movimento da mistura adotando-se para este caso o modelo de Leung (21), correspondendo às equações (II.18 a,b) e (II.12), respectivamente. Além destas equações, foi obtida uma nova equação para quantidade de movimento do sólido, baseada no balanço de forças das partículas na seção diferencial  $dz$  como apresentado na equação (II.20).

Adotando-se as correlações de Massarani e Santana (24) para o termo da força resistiva, a equação (II.20) tornou a forma expandida:

$$\frac{w_s}{v_s} \frac{dv_s}{dt} dz = m dz - g \frac{w_s}{v_s} dz - \frac{2f_s v_s}{D} w_s dz \quad (\text{III.9})$$

onde:

$$w_s = \rho_s (1-\epsilon) v_s$$

Simplificando e supondo que  $v_s = dz/dt$ , a equação (III.9) assume a forma:

$$\frac{dv_s}{dz} = \frac{m}{(1-\epsilon)\rho_s} - g - \frac{2f_s v_s^2}{D} \quad (\text{III.10})$$

Para a determinação do comprimento de entrada é necessário um estudo da dinâmica do escoamento da mistura nesta região, através da obtenção dos perfis longitudinais da porosidade, velocidades dos sólidos e fluido e ainda do perfil de pressão do sistema, que fornece o valor deste comprimento por meio de observação experimental, além de predizer a queda de pressão.

O procedimento matemático para o cálculo desse parâmetro, partiu da integração da equação (III.10) em função do perfil da velocidade dos sólidos o qual é função da concentração volumétrica, da mistura. A forma integral estudada foi expressa como:

$$\int_0^{L_A} dz = \int_{v_{s1}}^{v_{s2}} \frac{v_s dv_s}{\frac{m}{(1-\epsilon)\rho_s} - g - \frac{2f_s v_s^2}{D}} \quad (\text{III.11})$$

Nesta equação os limites de integração foram estabelecidos levando-se em conta a aceleração de uma condição inicial onde a velocidade dos sólidos  $v_{s1}$  até a velocidade do regime estabelecido  $v_{s2}$ .

Considerando que a concentração volumétrica inicial do fluido é igual a 0,5, cujo valor refere-se aproximadamente ao de um leito fluidizado, a velocidade inicial do sólido,  $v_{s1}$ , poderá ser calculada pela equação (II.18.a) para  $c = 0,5$ . Enquanto a velocidade final,  $v_{s2}$ , corresponde à mesma do regime de escoamento estabelecido, calculada da forma descrita no item (III.2.1) deste capítulo.

Devido a complexidade da operação, tornou-se necessário elaborar um programa que abrangesse todas estas operações matemáticas (Anexo A). Para solução da integral adotaremos o método Runge-Kutta que se mostrou mais adequado ao nosso tipo de função.

Finalmente, conhecendo-se os valores das variáveis que caracterizam o sistema e as propriedades físicas da mistura, pode-se calcular a queda de pressão ao longo do mesmo, aplicando-se as equações (II.15), (II.16) e (II.17), que se constituem respectivamente no valor desta na região de aceleração, de escoamento

estabelecido a soma total.

Os valores calculados para a queda de pressão poderão ser comparados com os de outros procedimentos da literatura e também com resultados experimentais.

## CAPÍTULO IV

### MONTAGEM EXPERIMENTAL

#### IV.1. INTRODUÇÃO

Um sistema de transporte pneumático vertical foi montado, visando a determinação de novos dados experimentais para analisar a consistência dos resultados obtidos pela aplicação das formulações propostas por Massarani e Santana(33), através do estudo da influência na caracterização do tipo do escoamento em diferentes condições de operação.

Embora não fôsse necessário ao desenvolvimento deste trabalho, a montagem foi equipada também com instrumento ,tais como o aquecedor,termopares, controladores de temperatura, com o objetivo de se estudar posteriormente a transferência de calor sólido-gás adequadamente.

#### IV.2. DESCRIÇÃO DA MONTAGEM

A figura IV.1., mostra o esquema detalhado do equipamento montado. A instalação permite que a operação se realize tanto da forma contínua como descontínua, sendo o fluido transportado à pressão positiva para a seção vertical constituída de um tubo com diâmetro igual a 5,08cm e possuindo 4,0 metros de comprimento. Para uma descrição mais detalhada dividiremos a montagem em duas parte, como a seguir:

- Sistema de Alimentação
- Seção de Testes

**LEGENDA**

- I - SOPRADOR
- II - VENTURI DE ALIMENTAÇÃO
- III - VISOR
- IV - TUBO TRANSPORTADOR
- V - SEPARADOR GRAVITACIONAL
- VI - SEPARADOR GRAVITACIONAL (TIPO CICLONE)
- VII - SEPARADOR DE AMOSTRA
- VIII - FLUIDIZADOR
- IX - DEPÓSITO
- X - COLETOR DE AMOSTRA
- XI - MANÔMETROS

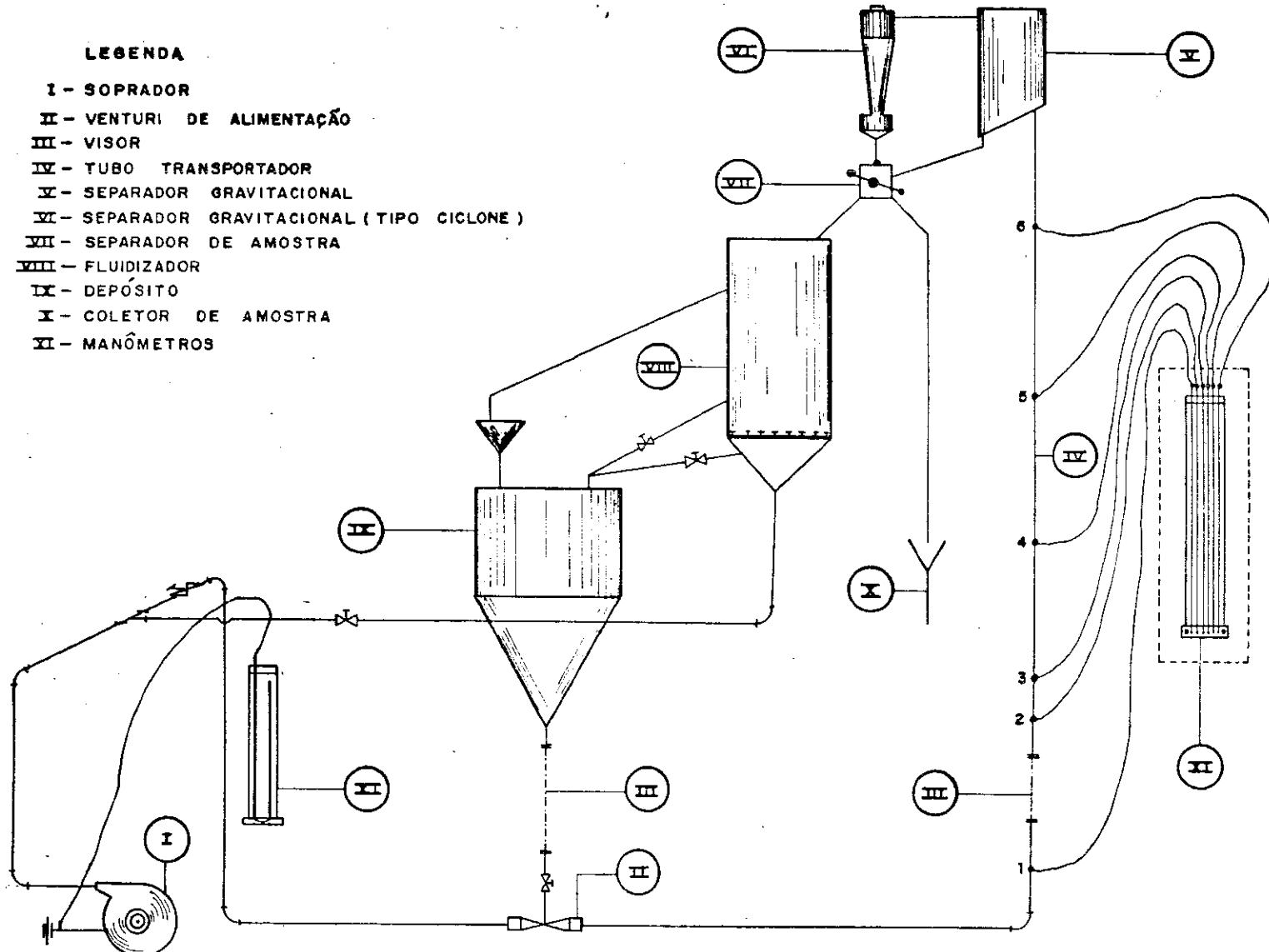


FIG. (IV-1) SISTEMA DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO VERTICAL DE D = 2"

As figuras de IV.2 a IV.6 mostram o aspecto geral e seções individuais de operação do sistema.

#### IV. 2.1. SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO

Os sólidos foram colocados em um reservatório (IX) de forma cilíndrica com base cônica, com capacidade de armazenamento de 150 litros. De sua saída desce um tubo transparente (III) de 2,54cm de diâmetro conectado a uma válvula do tipo gaveta por onde é feito o controle da alimentação dos sólidos. Estes caem por gravidade na garanta de um venturi (II) interno localizado na linha horizontal do sistema, onde são transportados para o tubo de medida vertical.

O gás é injetado no sistema por um soprador tipo ventilador, com rotor fechado de potência de 4 CV e vazões de ar na faixa de  $2,25 \times 10^{-2}$  a  $5,30 \times 10^{-2}$  Kg/s. Uma outra válvula foi conectada após o ventilador para controlar a vazão do mesmo.

#### IV.3. OPERAÇÃO DE MEDIDA DA VAZÃO DE GÁS E DOS SÓLIDOS

A vazão de gás foi obtida com a utilização de uma placa de orifício de diâmetro, d, igual a 39,5mm, instalada em uma flange na extremidade de um tubo conectado no bocal de sucção com diâmetro igual a 5,08cm e 9,0cm de comprimento. A tomada de pressão foi colocada a 2,03cm

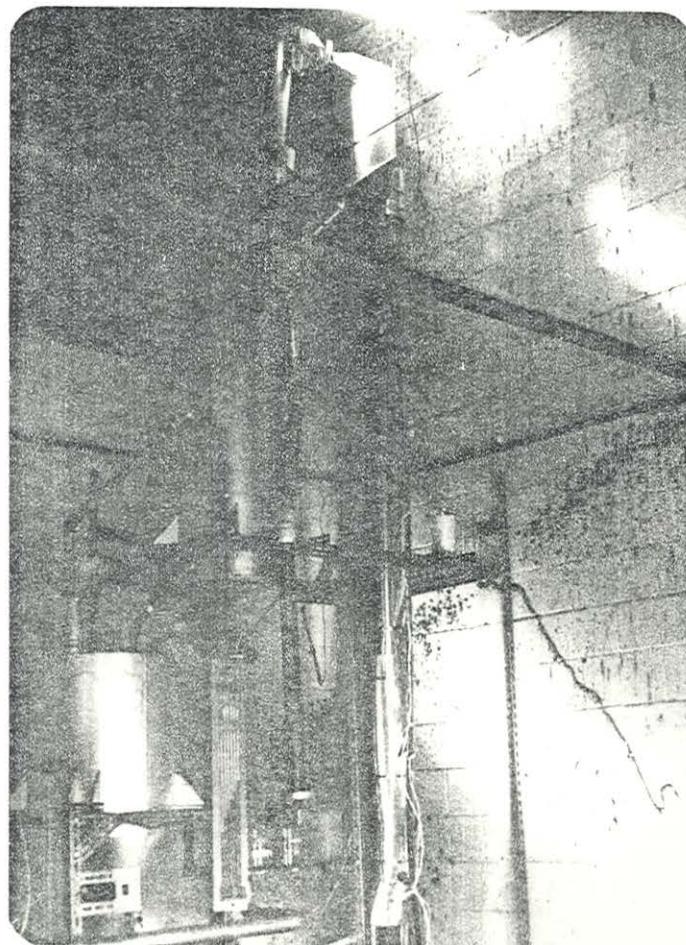


Figura IV.2 - Aspecto geral do equipamento e seção de testes.

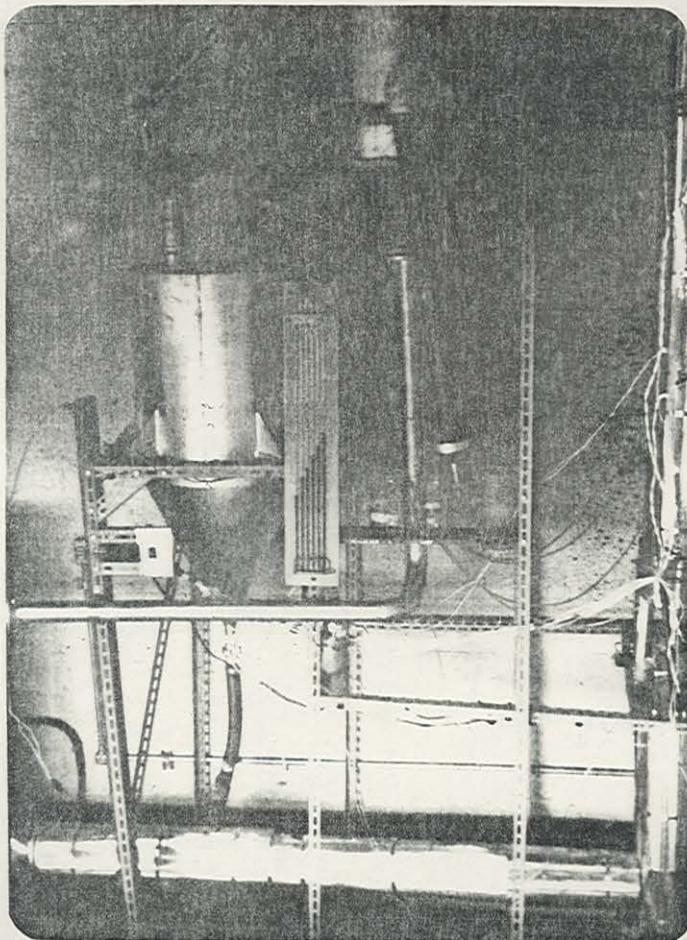


Figura IV.3 - Sistema de alimentação de sólidos e medida do perfil longitudinal de pressão

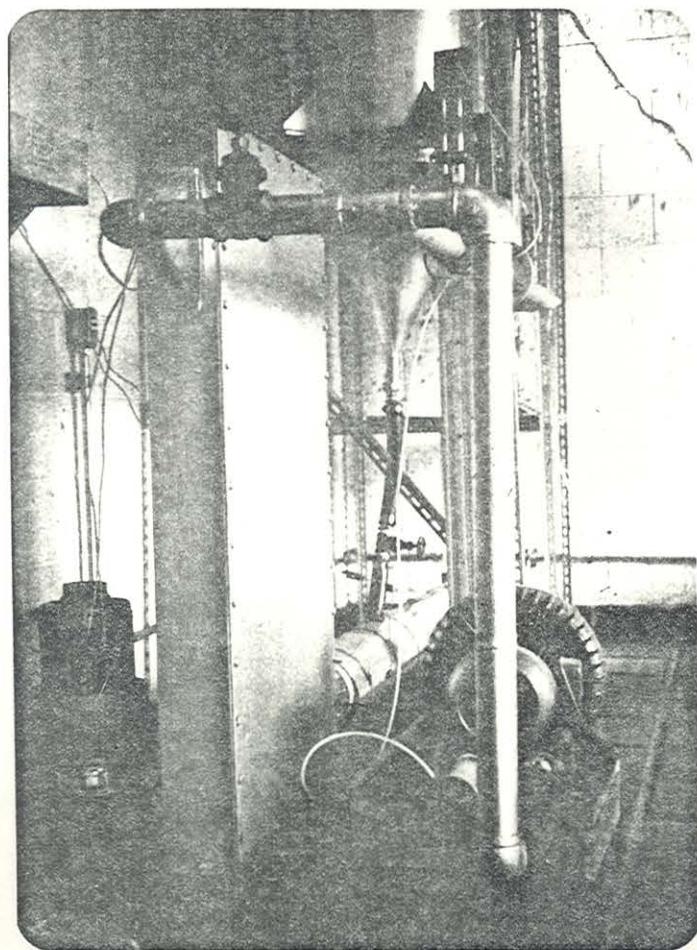


Figura IV.4 - Sistemas de insuflamento e medida de vazão de ar

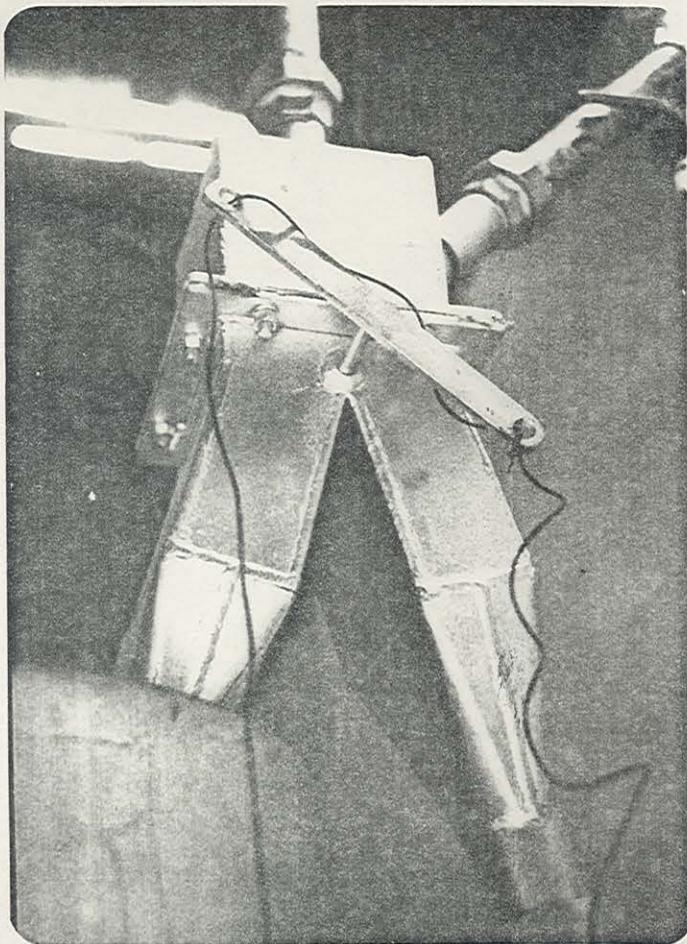


Figura IV.5 - Amostragem para medida de vazão de sólidos

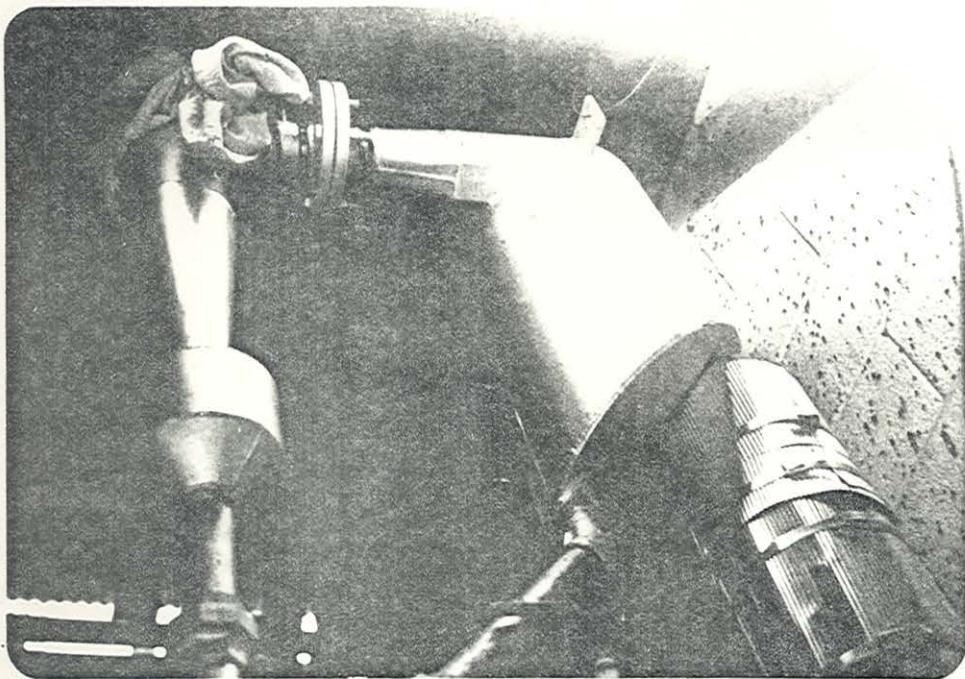


Figura IV.6 - Sistema de separação gás-sólido

da placa.

O coeficiente de descarga  $K$ , foi determinado como sendo igual a 0,601 para  $0,2 < d/D < 1,0$ , considerando que a tomada de pressão estava localizada a 0,4 D da placa de orifício e essa à 4 D do bocal do ventilador.

A vazão de ar seco foi calculada pela equação:

$$W_f \text{ (Kg/h)} = 7,81 \times 10^{-3} d(\text{mm}) \sqrt{h(\text{mmca})} \quad (\text{IV.1})$$

obtida na calibração da placa de orifício com as dimensões acima descritas. Sendo  $h$  a deflexão manométrica, medida em um manômetro em U (XI), com uma das extremidades aberta para a atmosfera, considerando que esta medida independe da temperatura e pressão da tubulação.

A vazão mássica de sólidos,  $W_s$ , foi obtida pela média de quatro amostras, coletadas após o amostrador sólio-gás através da válvula do tipo esfera, medindo-se o peso por uma unidade de tempo, para cada vazão de carga sólio-gás.

#### IV.4. OPERAÇÃO DO SISTEMA

Inicialmente, gás era insuflado para o sistema a uma vazão previamente estabelecida. Abrindo-se parcialmente a válvula situada abaixo do reservatório, as partículas sólidas caíam no fluxo de gás e eram transportadas por esse para seção de testes, onde efetuavam-se as medidas de

pressão. O fluido passava em seguida, por dois separadores gravitacionais (V e VI), colocados em série, ocorrendo a separação das duas fases. Um fechamento temporário na válvula (VII) situada na saída do último separador, desviava os sólidos para o sistema de coleta de amostra (X), onde o tempo de descarga desta quantidade de material era devidamente cronometrado, tendo-se assim, a vazão mássica dos mesmos. Terminada esta medida, abria-se a válvula e o fluxo de sólido era descarregado no reservatório.

Novas medidas foram obtidas mantendo-se a mesma vazão de gás, bastando para isso aumentar ou diminuir a quantidade de sólidos ao sistema; o mecanismo de controle está diretamente relacionado com o manuseio da válvula de alimentação. O mesmo procedimento foi repetido variando-se as vazões de gás para outras faixas de vazões de sólidos. Contudo, um cuidado todo especial foi tomado quanto a vazão de carga sólido-gás para evitar a sedimentação na entrada do sistema.

#### IV.5. CARACTERIZAÇÃO DOS SÓLIDOS E DO GÁS

Neste trabalho foram utilizados partículas sólidas de 5 diâmetros diferentes, porém com a mesma densidade  $2,5\text{g/cm}^3$  fabricados pela POTTERS INDUSTRIAL LTDA-SP.

Na tabela (IV.1) são especificadas as características destas partículas sólidas.

TABELA IV.1. CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS

MATERIAL	ESPECIFICAÇÃO	DIÂMETRO (mm)	$u_\infty$ (m/s)
ESFERA DE VIDRO $\rho_s = 2,5 \text{ g/cm}^3$	AB	0,24	1,63
	AA	0,40	3,03
	A100	1,00	7,56
	A120	1,20	8,70
	A170	1,70	8,75

O ar foi usado como gás transportador, sendo a sua densidade ,  $\rho$  , igual a  $1,18 \text{ Kg/m}^3$  e viscosidade,  $\mu$  , igual a  $1,84 \times 10^{-5} \text{ Kg/m.s}$  a  $25^\circ\text{C}$  e 1,0 atm.

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS EXPERIMENTAIS E CALCULADOS

## V.1. INTRODUÇÃO

No desenvolvimento deste trabalho foram realizados cerca de 242 determinações experimentais, sendo que 173 foram efetuadas envolvendo as duas regiões de escoamento de mistura, enquanto nas 69 medidas restantes, considerou-se apenas a região de escoamento estabelecido.

Mudanças realizadas nas vazões de sólido e gás conduziram à obtenção de variações de queda de pressão no escoamento da mistura ar-sólido.

## V.2. RESULTADOS OBTIDOS NAS DETERMINAÇÕES EXPERIMENTAIS

A tabela (V.1) apresenta a especificação das partículas sólidas utilizadas e a faixa de razão de carga mínima e máxima em que foram transportadas pelo gás.

Os valores obtidos de queda de pressão ao longo da seção de testes em cada transporte de mistura, foram colocados em gráficos sob a forma de pressão versus distância fornecendo o comprimento de entrada considerando-se que a distância do comportamento parabólico da curva, correspondente ao valor deste parâmetro. Parte destes resultados são apresentados nas figuras de ( V.1 ) a (V.10) para os cinco tipos de partículas.

TABELA - V.1 - CARACTERÍSTICA DAS PARTÍCULAS E FAIXAS  
DE RAZÃO DE CARGA SÓLIDO-FLUÍDO

MATERIAL	ESPECIFICAÇÃO	DIÂMETRO (mm)	$T = w_s / w_f$
ESFERA DE VIDRO $\rho_s = 2,5 \text{ g/cm}^3$	AB	0,24	0,16 - 2,19
	AA	0,40	0,95 - 4,31
	A100	1,00	0,71 - 6,21
	A120	1,20	1,07 - 5,17
	A170	1,70	0,63 - 5,06

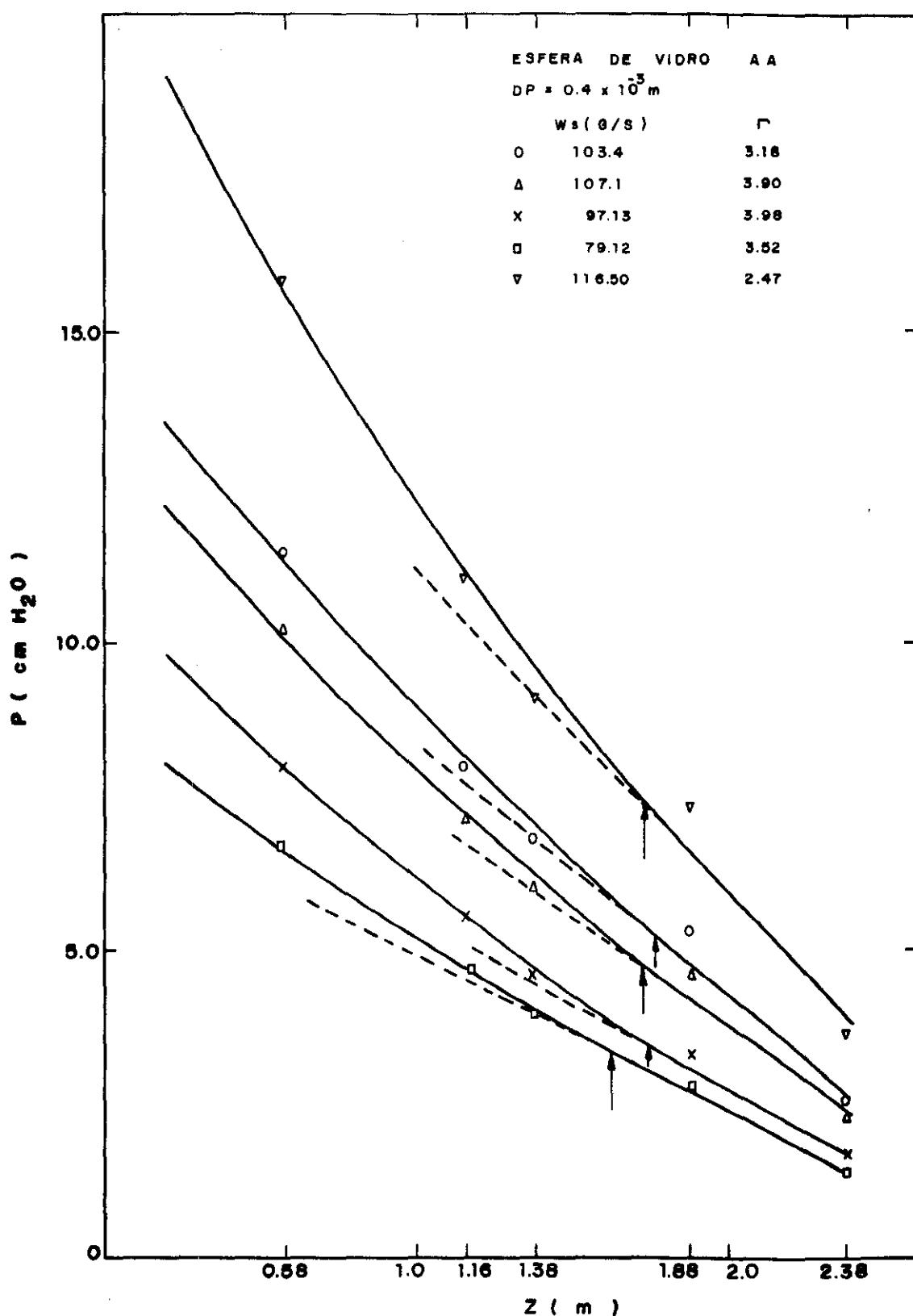


FIG.(II-1) PERFIL LONGITUDINAL DE PRESSÃO NA SECÇÃO VERTICAL

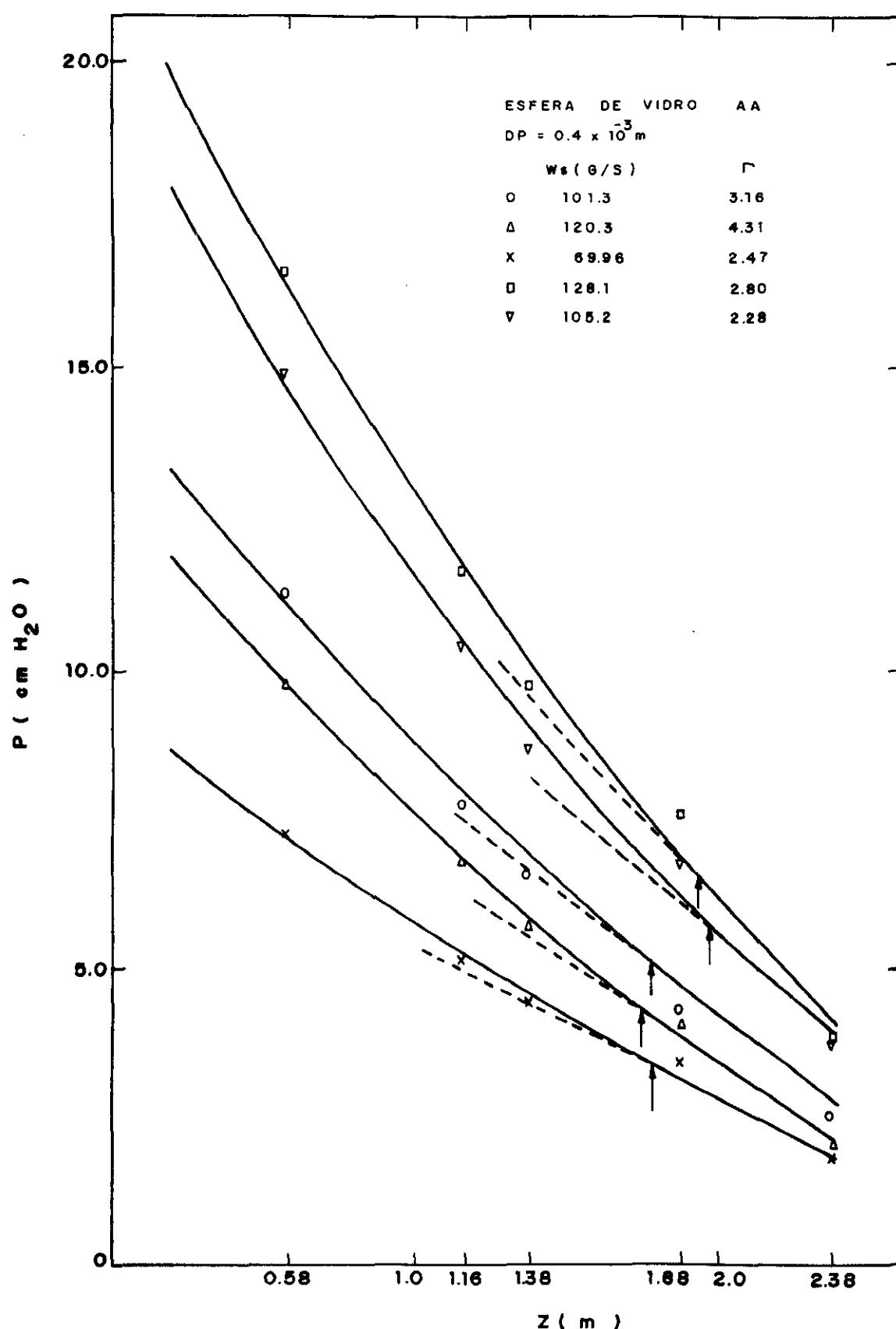


FIG. ( IV - 2 ) PERFIL LONGITUDINAL DE PRESSÃO NA SECÇÃO VERTICAL

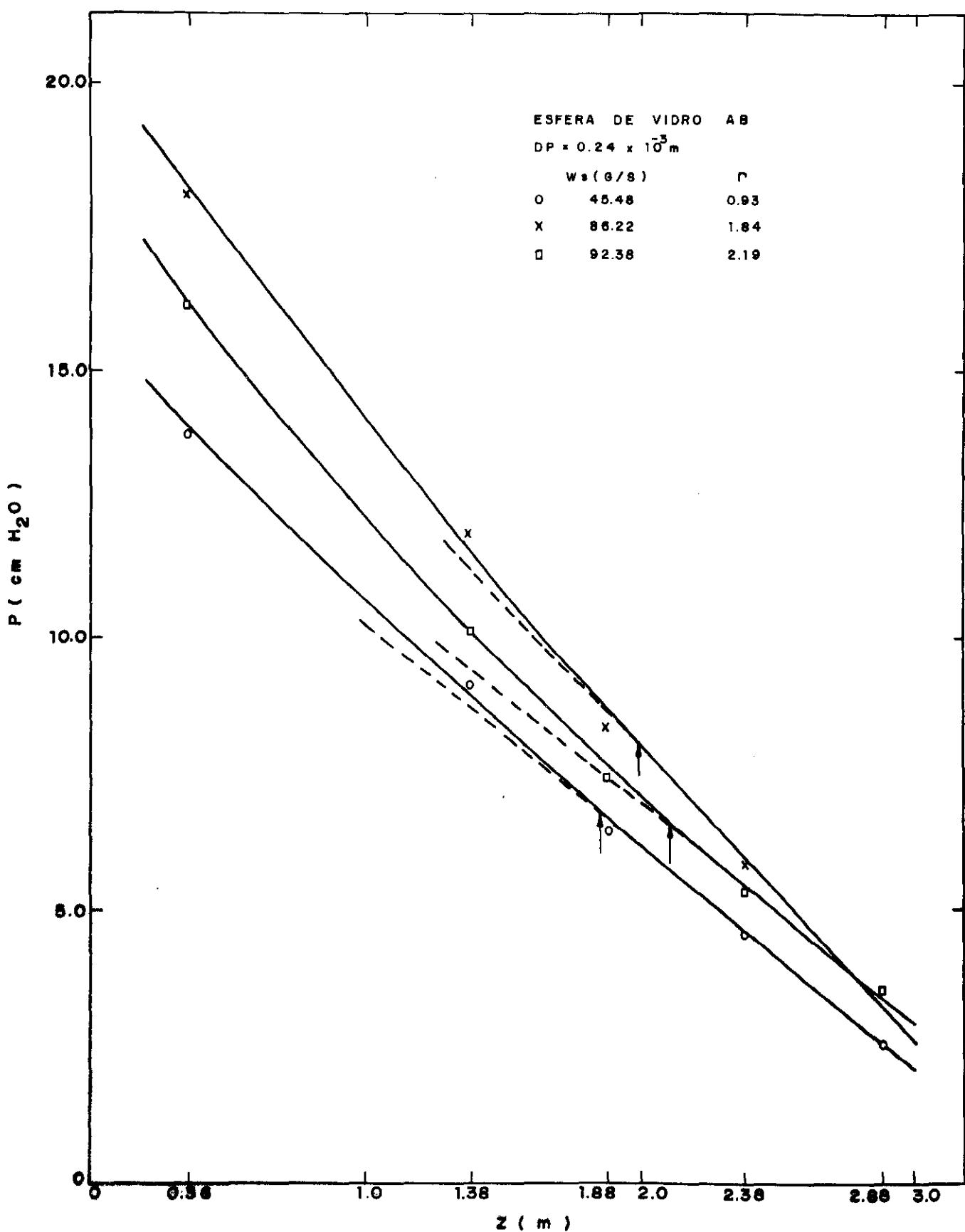


FIG. (E-3) PERFIL LONGITUDINAL DE PRESSÃO NA SECÇÃO VERTICAL

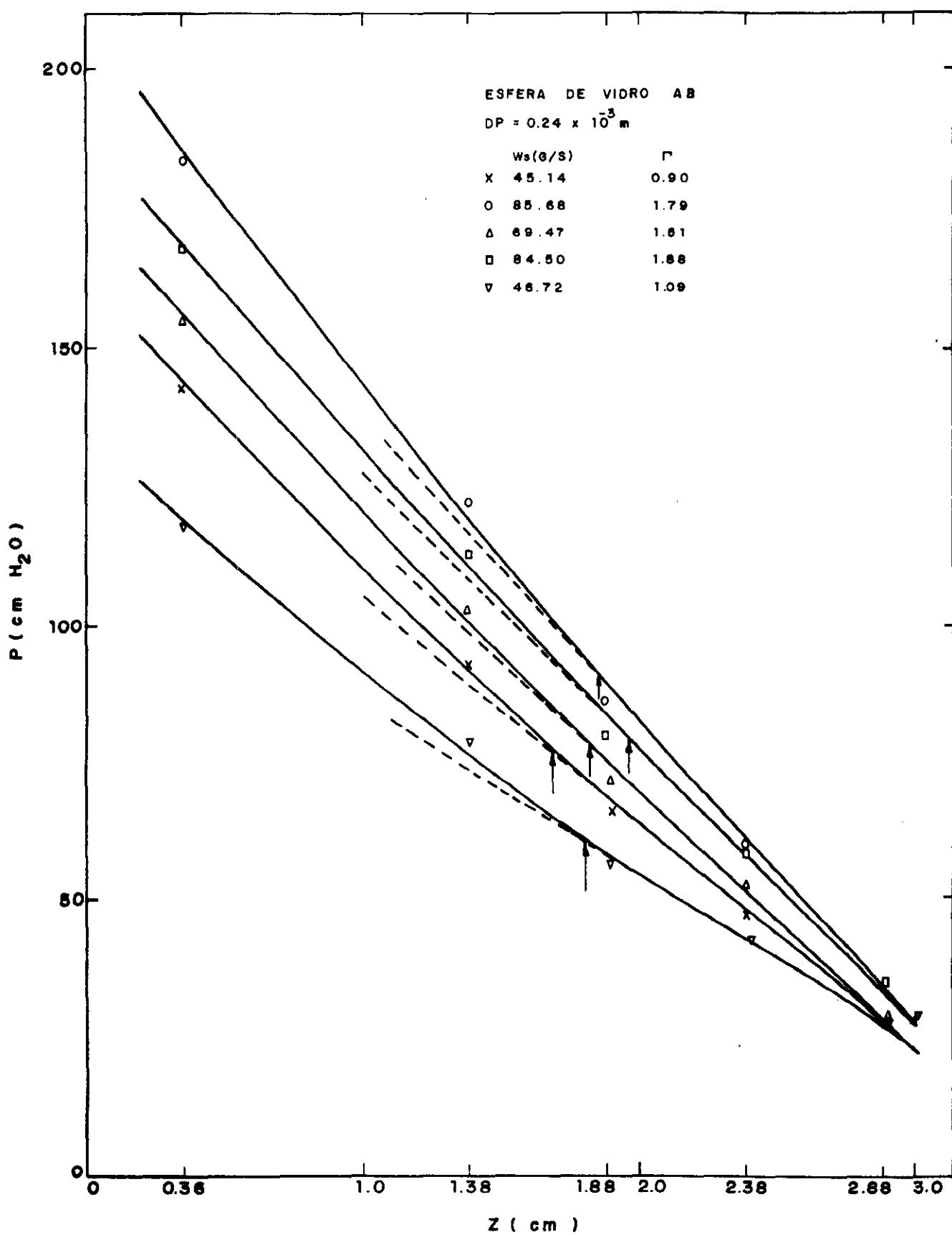


FIG. (IV-4) PERFIL LONGITUDINAL DE PRESSÃO NA SECÇÃO VERTICAL

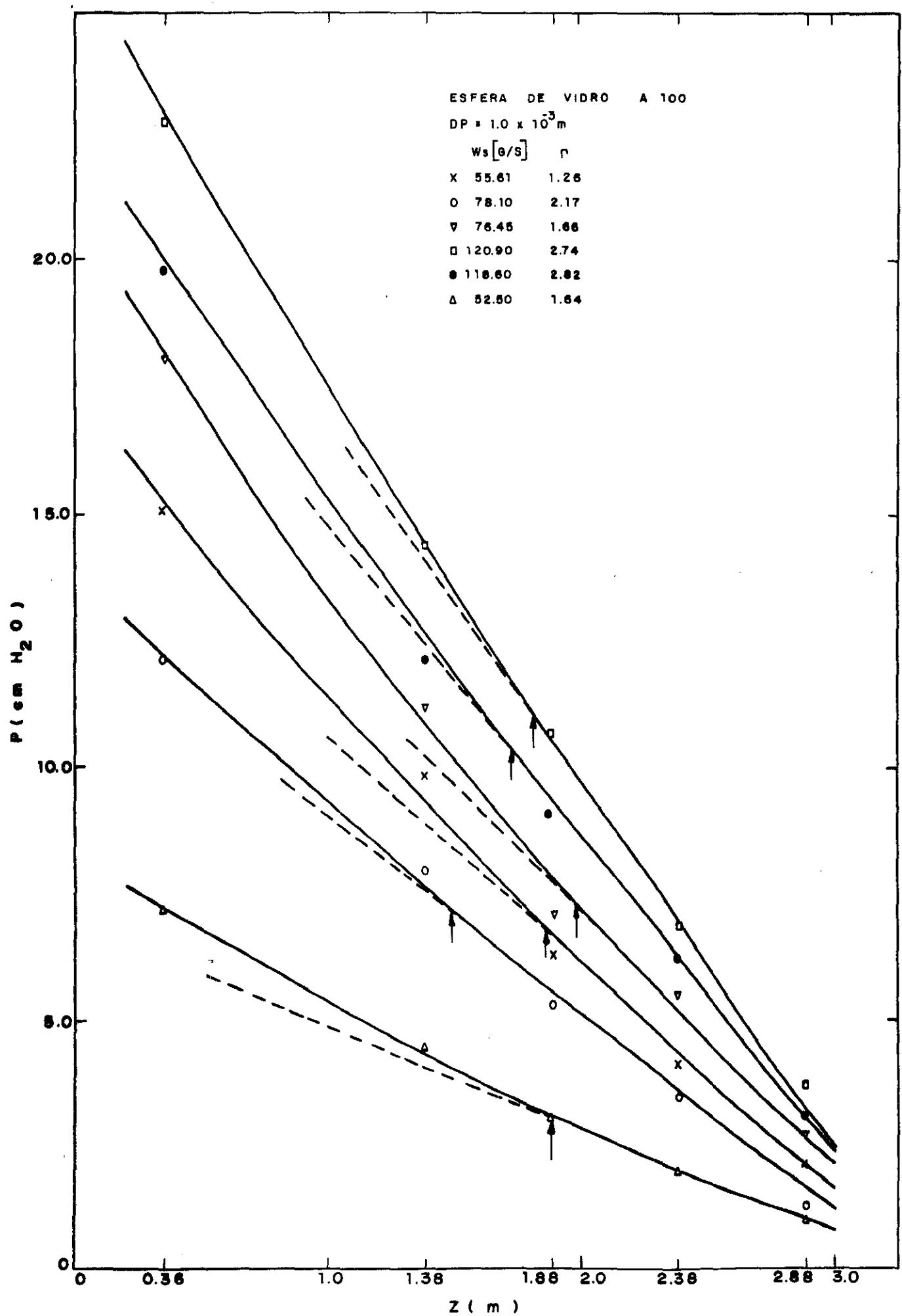


FIG.(V-5) PERFIL LONGITUDINAL NA SECÇÃO VERTICAL

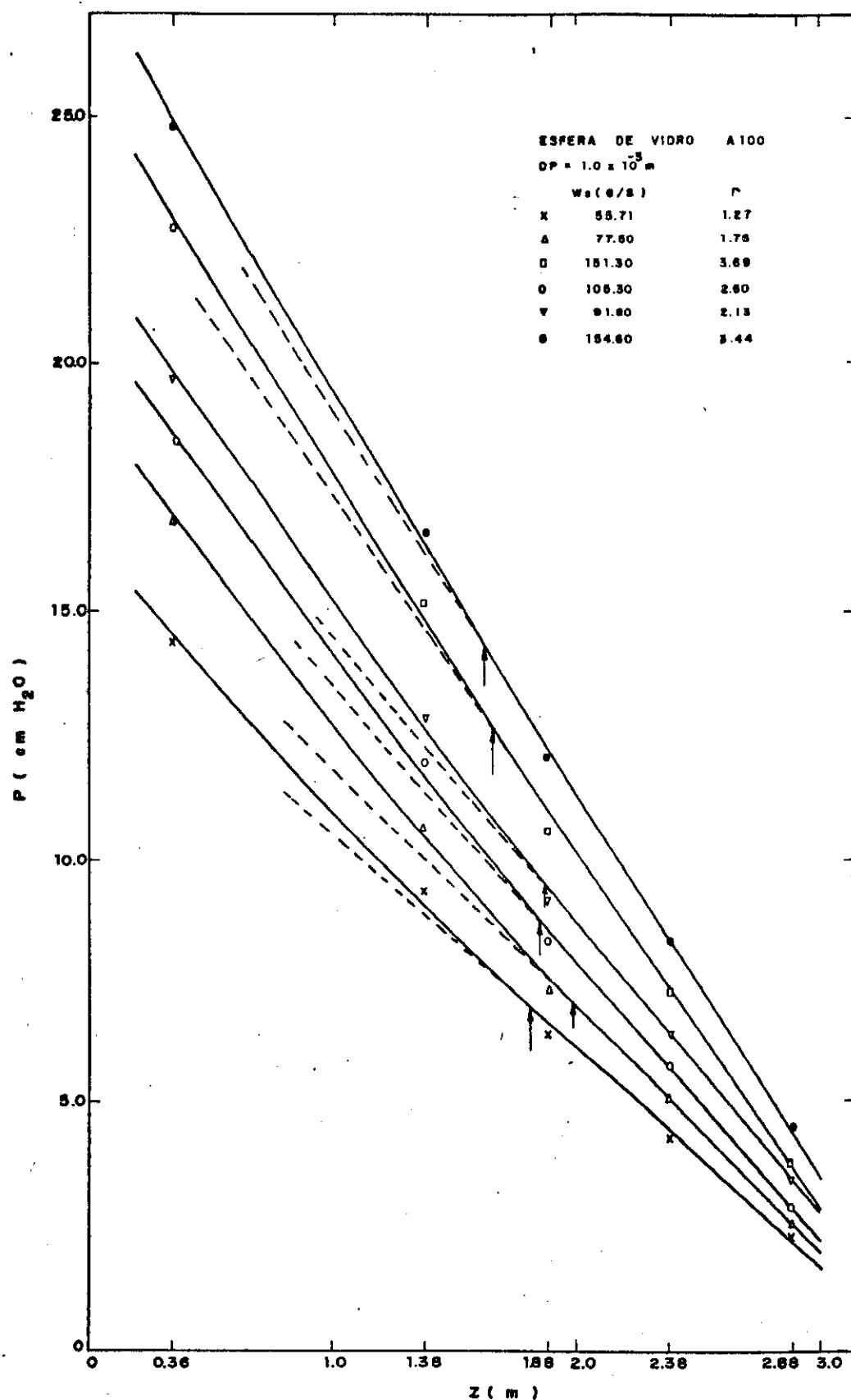


FIG. ( II-6 ) PERFIL LONGITUDINAL DE PRESSÃO NA SECÇÃO VERTICAL

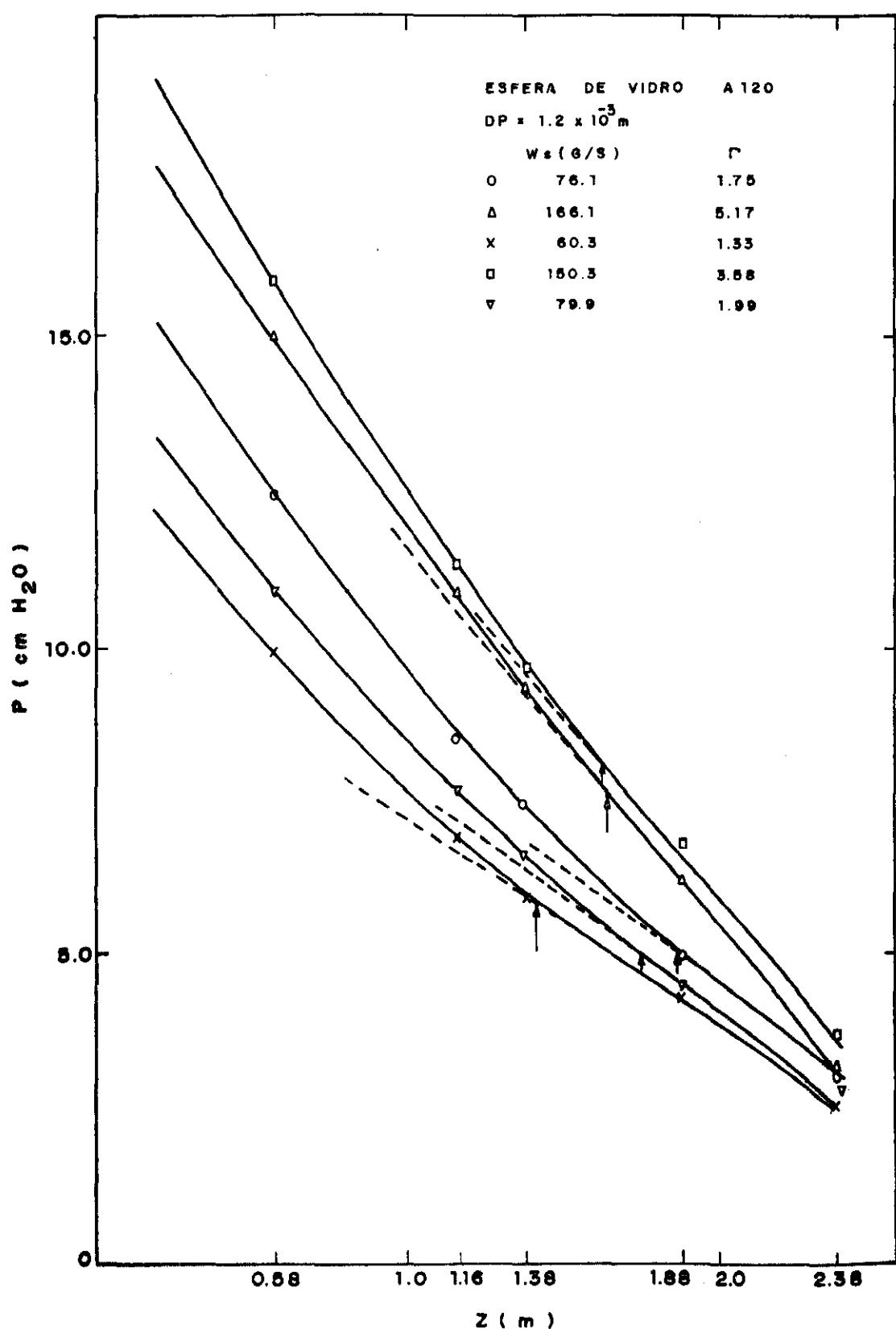


FIG.(X-7) PERFIL LONGITUDINAL DE PRESSÃO NA SECÇÃO VERTICAL

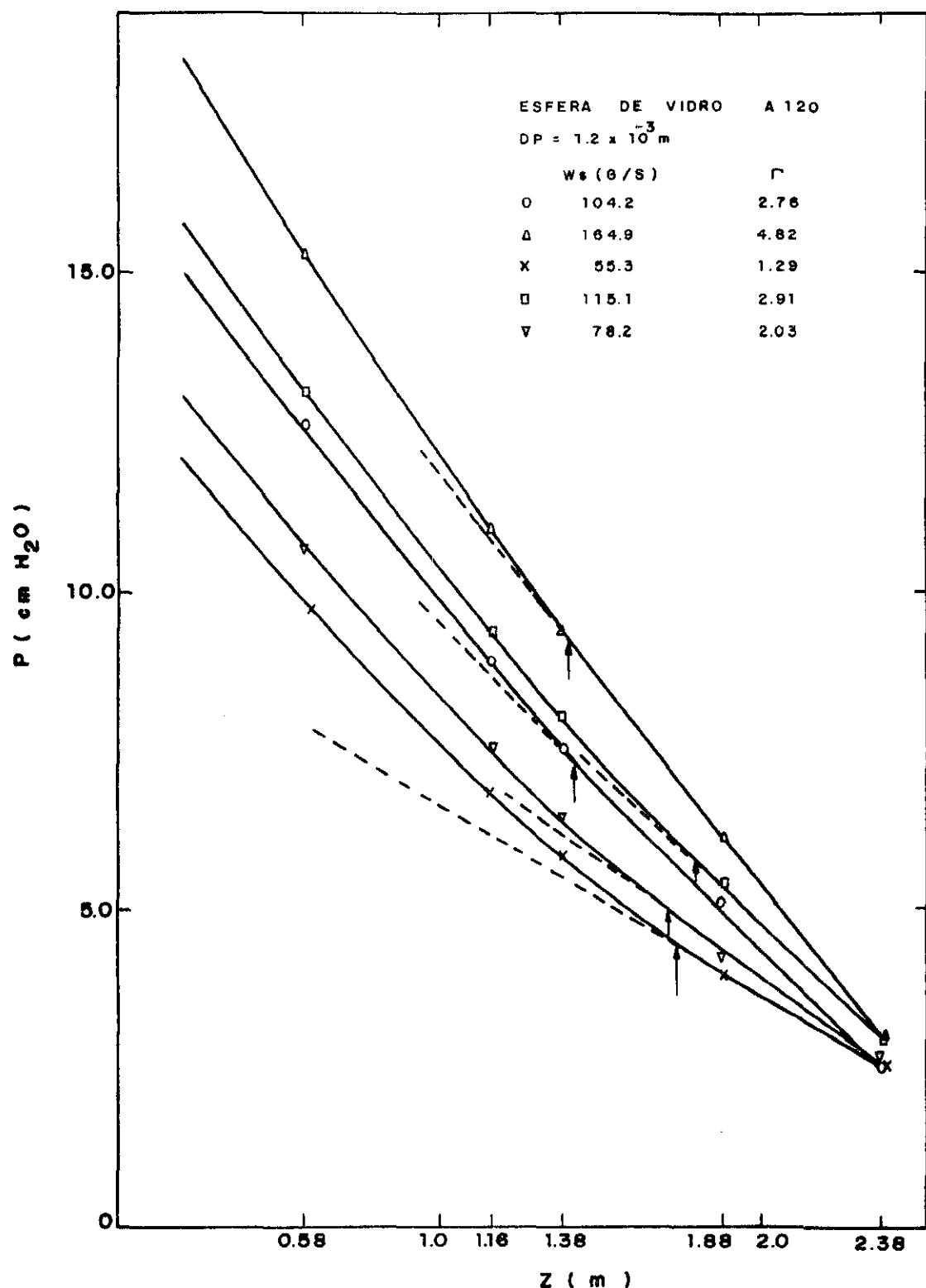


FIG. (IV-8) PERFIL LONGITUDINAL DE PRESSÃO NA SEÇÃO VERTICAL

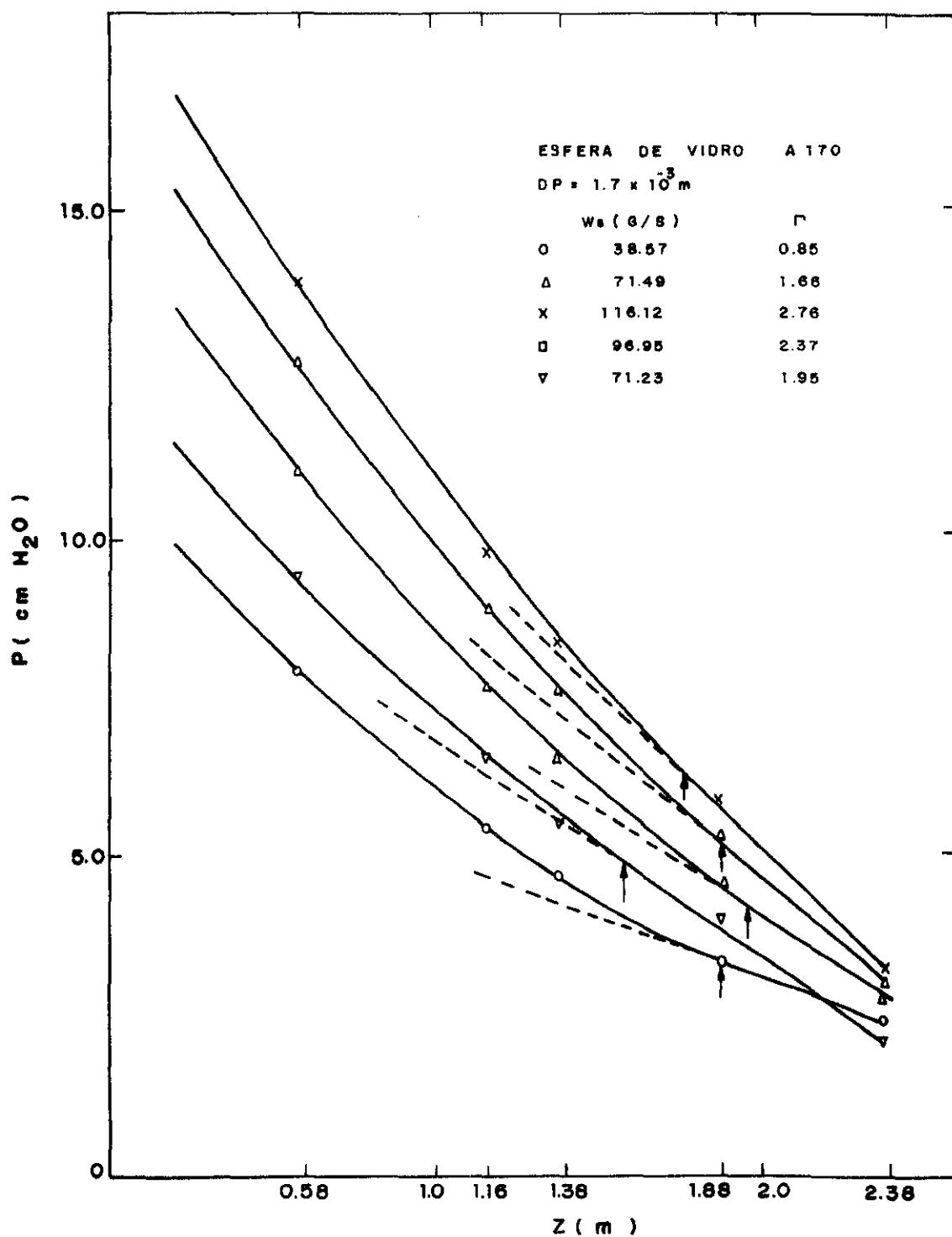


FIG.( II - 9 ) PERFIL LONGITUDINAL DE PRESSÃO NA SECÇÃO VERTICAL

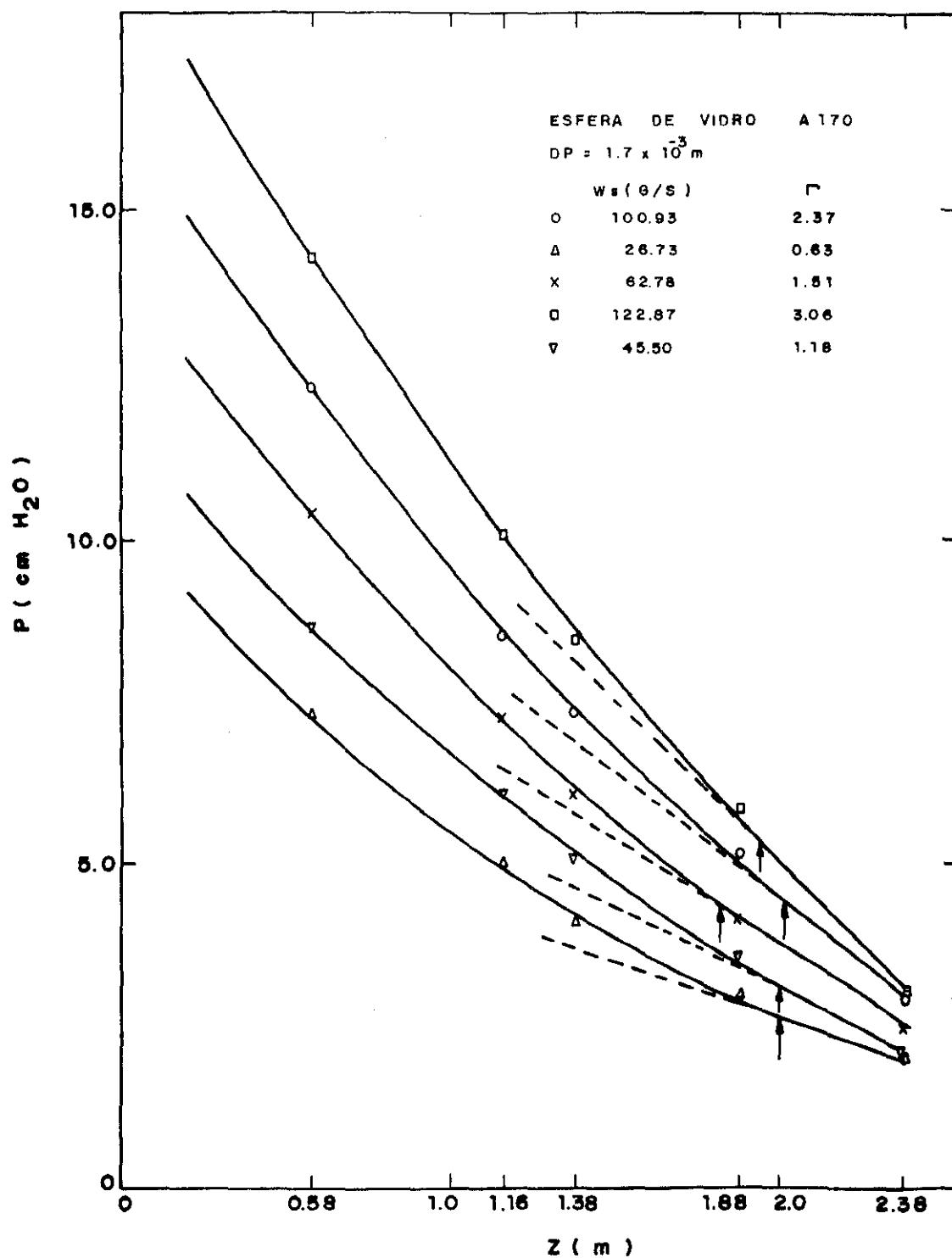


FIG.(IX-10) PERFIL LONGITUDINAL DE PRESSÃO NA SECÇÃO VERTICAL

### V.3. RESULTADOS CALCULADOS

Com as determinações das vazões de sólido-gás, conhecendo-se as propriedades físicas da mistura e a geometria do sistema, obteve-se os valores de porosidade, velocidade relativa e queda de pressão na região de escoamento estabelecido através da aplicação do modelo descrito, no ítem (III.2) do capítulo III. Além destes dados, foram analisados 39 determinações experimentais obtidas por Hariu-Molstad (9).

O comprimento de entrada e a queda de pressão na região de aceleração foram determinados utilizando os resultados experimentais deste trabalho, através da solução das equações apresentadas no ítem (III.3) do referido capítulo. Contudo, apenas 11 dados experimentais da literatura se aproximaram mais satisfatoriamente das nossas condições de operações, permitindo assim, uma análise comparativa dos mesmos.

Nas tabelas V.2 e V.3, constam os resultados experimentais e calculados de porosidade e queda de pressão na região de escoamento estabelecido previstos pelas correlações analisadas neste trabalho e por dois modelos existentes na literatura, visando uma análise comparativa dos resultados obtidos; o primeiro deles baseou-se no cálculo da porosidade de forma simplificada e o segundo

TABLA 1. VALORES ALFAROS, DENSIDADES CALCULADAS EN REGIMEN DE FLUJO ESTACIONAL

MATERIAL	W <sub>0</sub> (g/s)	W <sub>F</sub> (g/s)	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$
Al	55.700	57.100	.998940	.999450	.999492
ESTILO: 6B	16.400	51.400	.9992690	.999840	.999875
$d_p=0.024\text{cm}$	54.200	57.600	.998915	.999440	.999274
$K_{05}=2.5\text{g/cm}^3$	48.300	33.100	.999425	.999717	.999274
$D=5.21\text{cm}$	55.700	33.300	.998147	.990780	.999273
$L=4.0\text{m}$	53.100	33.100	.998350	.999179	.999274
$LE=2.0\text{m}$	61.100	42.300	.998596	.999279	.999274
	91.200	46.600	.997803	.998875	.999273
	18.500	42.300	.999570	.999782	.999275
	17.600	45.900	.999626	.999810	.999275
	54.600	44.600	.998822	.999394	.999274
	78.800	45.700	.998340	.999101	.999274
	37.900	43.500	.999212	.999592	.999274
	45.500	44.400	.999012	.999492	.999274
	18.100	47.800	.999636	.999814	.999275
	36.600	47.200	.999257	.999617	.999274
	53.600	46.100	.998865	.999415	.999274
	81.800	45.400	.998275	.999108	.999274
	20.600	48.500	.999593	.999791	.999275
	38.900	47.600	.999233	.999694	.999274
	55.400	47.100	.999082	.999420	.999274
	73.400	46.100	.998480	.999214	.999274
	82.700	46.700	.998345	.999113	.999274
	72.300	47.200	.999543	.999213	.999183
	43.300	48.300	.999146	.999560	.999278
	22.700	47.300	.999360	.999773	.999223
	18.300	50.800	.999656	.999924	.999263
	39.200	50.300	.999262	.999620	.999263
	53.900	47.300	.998711	.999433	.999262
	71.700	48.300	.999535	.999249	.999262

TABELA V.2: CONTINUAÇÃO

MATERIAL	Ws(g/s)	Wf(g/s)	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$
A	2.900	52.900	.999906	.999964	.994589
ESFERA A100	36.600	50.600	.998853	.999520	.994588
$dp=0.10\text{cm}$	59.800	50.600	.998134	.999215	.994588
$R_0=2.5\text{g/cm}^3$	80.800	49.500	.997403	.998889	.994587
$D=5.21\text{cm}$	102.700	48.300	.996592	.998536	.994587
$L=1.0\text{m}$	126.200	47.200	.996592	.998159	.994586
$LE=2.0\text{m}$	144.000	47.200	.990750	.997848	.994586
	146.100	47.200	.995016	.997850	.994586
	138.300	47.200	.995261	.997917	.994586
	139.800	47.200	.995228	.997943	.994586
	115.400	48.300	.996167	.998329	.994586
	88.700	48.300	.997052	.998744	.994587
	70.000	49.500	.997745	.999037	.994587
	49.200	50.600	.998457	.999337	.994588
	30.600	50.600	.999041	.999599	.994588
	28.000	42.600	.998860	.999506	.994588
	47.900	41.400	.997982	.999137	.994587
	67.100	41.400	.997160	.998748	.994459
	88.300	40.300	.996145	.998317	.994586
	115.100	40.300	.994982	.997752	.994586
	142.600	39.100	.993538	.971450	.994585
	162.900	39.100	.992630	.996693	.994584
	18.100	43.700	.992870	.996693	.994588
	59.300	42.600	.997600	.998944	.994597
	79.700	41.400	.996650	.998531	.994587
	99.400	40.300	.995680	.998127	.994586
	124.900	40.300	.994570	.997588	.994585
	147.900	39.100	.993310	.997073	.994585
	104.300	36.800	.994753	.997696	.994585
	84.100	38.000	.995947	.998171	.994586
	60.200	38.000	.997094	.998726	.994587
	38.200	39.100	.998823	.999214	.994587
	33.800	35.700	.998177	.999216	.994587
	48.100	35.700	.997410	.998829	.994587
	152.300	42.600	.993955	.997343	.994585
	97.000	43.700	.995258	.998358	.994586
	77.500	44.900	.997124	.998750	.994587
	58.600	44.900	.997827	.999080	.994587
	37.700	46.000	.998642	.999418	.994588

MATERIAL	Ws(g/s)	Wf(g/s)	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$
B	4.448	4.034	.992495	.996290	.991410
CATALISADOR	4.448	5.559	.995928	.998170	.993173
PEQUENO	4.448	6.723	.996964	.998625	.993737
$d_p=0.0963\text{cm}$	4.448	7.318	.997316	.998787	.993924
$R_{Os}=0.859\text{g/cm}^3$	9.929	5.611	.991201	.995937	.993920
$L=4.0\text{m}$	20.505	3.284	.952497	.991444	.977577
$L=4.12\text{m}$	20.505	4.163	.971317	.985523	.982493
		6.143	.985585	.993195	.989014
		32.580	.975241	.987906	.983039
		32.580	7.266	.991045	.986516
		32.580	8.766	.985267	.988266
B	3.594	4.060	.977102	0.000000	.970361
CATALISADOR	3.594	6.077	.995270	.997599	.990922
GRANDE	3.594	8.223	.997448	.998898	.993054
$d_p=0.194\text{cm}$	3.594	9.076	.997838	.999095	.993427
$R_{Os}=0.974\text{g/cm}^3$	7.989	6.102	.989945	.994773	.989127
$L=4.0\text{m}$	7.989	7.938	.994059	.997372	.991854
$L=4.12\text{m}$	16.626	6.102	.980174	.989007	.984856
	16.626	7.550	.986849	.993827	.988775
	26.659	8.585	.989397	.995288	.990110
	26.659	6.387	.972509	.984923	.981063
	26.659	8.171	.982509	.991537	.986480
B	3.865	.680	.947097	.974946	.973453
CATALISADOR	3.865	.796	.960991	.983508	.979840
PEQUENO	3.865	.940	.970892	.988470	.983936
$d_p=0.0963\text{cm}$	3.865	1.073	.976444	.990827	.986139
$R_{Os}=859\text{g/cm}^3$	9.732	.901	.933087	.968151	.966237
$D=1.201\text{cm}$	9.732	1.084	.948057	.977531	.971456
$L=4.12\text{m}$	9.732	1.228	.955903	.981466	.974913
	9.732	1.349	.960978	.983919	.977058
	9.732	1.476	.965239	.985200	.978787
B	3.296	.813	.930007	0.000000	.943914
CATALISADOR	3.296	.990	.951660	.948568	.970139
GRANDE	3.296	1.371	.978303	.991177	.985499
$d_p=0.194\text{cm}$	3.296	1.731	.985662	.994925	.988947
$R_{Os}=0.859\text{g/cm}^3$	5.109	.976	.908061	0.000000	.929852
$D=1.201\text{cm}$	5.109	1.327	.965854	.984352	.979535
$L=4.12\text{m}$	5.109	1.626	.976146	.991017	.984484
	5.109	1.874	.980909	.993252	.986565

VALORES DE POROSIDADE CALCULADOS SEGUNDO:

1. Modelo deste trabalho
2. Forma simplificada
3. Modelo de Yang (27)
4. Dados deste trabalho
5. Dados de Hariu-Molstad (9)

TABLEA M3-RESULADOS DE CPM1 E CPMLF obtidos experimente e culturados

ANSWERED BY THE CHIEF OF STAFF, DEPARTMENT OF DEFENSE

TABELA V-3: CONTINUAÇÃO

	$\Delta P/L$	$T(1a)$	$T(1b)$	$T(1c)$	$T(2a)$	$T(2b)$	$T(2c)$
	(Pa/sat/m)	(Pa/sat/m)	(Pa/sat/m)	(Pa/sat/m)	(Pa/sat/m)	(Pa/sat/m)	(Pa/sat/m)
$a$	2.900	52.900	255.06	255.75	270.23	486.14	235.52
ESPERA 0100	36.000	50.000	431.54	446.93	450.75	484.55	221.48
dp=0.16L <sub>m</sub>	59.800	50.600	544.46	591.22	923.76	503.93	221.32
R0=2.59/cm <sup>3</sup>	80.800	49.500	647.46	707.53	1139.22	527.66	209.21
D=5.21L <sub>m</sub>	102.700	48.300	740.65	834.34	1162.34	552.26	200.38
L=4.0m	126.200	47.200	833.85	969.91	1468.99	582.52	194.98
LE=2.0m	144.000	47.200	902.52	1000.00	1786.97	617.61	189.56
146.100	47.200	824.04	1093.71	1825.17	621.91	192.73	192.73
138.300	47.200	882.90	1045.60	1717.38	606.55	187.99	187.99
129.800	47.200	882.90	1054.28	1754.31	602.40	193.04	192.77
115.100	48.300	750.41	912.87	1494.17	574.81	196.76	196.54
68.700	48.300	667.03	748.45	1209.52	529.56	202.18	202.01
70.600	49.500	583.69	642.54	1014.17	542.35	208.34	208.18
49.200	50.600	430.67	520.57	795.22	496.08	214.67	214.57
30.600	50.600	377.69	409.99	563.47	480.15	221.61	221.55
28.000	42.600	309.01	329.58	440.57	423.98	158.94	157.94
47.700	41.400	387.49	455.53	646.79	429.47	155.14	155.05
67.400	41.400	470.88	563.08	634.60	447.67	150.29	150.03
88.300	40.300	564.07	685.01	685.00	463.30	145.88	145.72
115.100	40.300	652.36	850.06	1287.95	490.51	112.01	111.91
142.600	39.100	770.08	1011.91	1542.96	625.63	138.14	137.89
162.900	39.100	819.14	1139.31	1733.86	554.48	136.12	135.84
18.100	43.700	239.56	276.63	357.19	426.66	166.24	166.32
59.300	42.600	416.92	520.16	768.07	417.82	156.85	157.75
79.700	41.400	510.12	638.81	962.09	461.42	151.27	151.13
99.400	40.300	608.22	752.88	1150.42	477.29	147.53	147.35
124.900	40.300	691.61	910.37	1392.34	512.51	143.66	143.44
147.900	39.100	774.99	1043.93	1604.25	533.23	139.80	139.54
161.360	36.800	593.50	767.44	1117.27	454.73	125.40	125.10
84.100	38.000	510.12	647.65	931.61	442.05	127.72	127.58
60.200	38.000	421.83	500.81	713.27	417.54	131.54	131.43
38.200	39.100	333.54	369.90	503.31	407.92	135.45	135.34
33.800	35.700	250.16	329.14	437.14	305.32	120.65	120.59
48.100	35.700	304.11	415.63	561.27	373.77	116.78	116.70
152.300	42.300	873.89	1092.94	1743.95	579.42	159.62	159.35
97.000	43.700	676.89	760.69	1107.50	502.55	165.51	165.33
77.500	44.900	593.50	649.25	1006.07	485.55	174.43	174.28
58.600	44.900	510.12	535.97	816.20	463.52	179.99	179.83
37.700	46.000	402.21	413.78	595.41	452.58	103.58	103.51

TABELA V. DIFERENCIACAO MATERIAL												
	H <sub>1</sub> (g/g)	H <sub>2</sub> (g/g)	(AP/L) <sub>1</sub> (g) (Pascal/cm <sup>2</sup> )	(AP/L) <sub>2</sub> (g) (Pascal/cm <sup>2</sup> )	(AP/L) <sub>3</sub> (g) (Pascal/cm <sup>2</sup> )	(AP/L) <sub>4</sub> (g) (Pascal/cm <sup>2</sup> )	(AP/L) <sub>5</sub> (g) (Pascal/cm <sup>2</sup> )	(AP/L) <sub>6</sub> (g) (Pascal/cm <sup>2</sup> )	(AP/L) <sub>7</sub> (g) (Pascal/cm <sup>2</sup> )	(AP/L) <sub>8</sub> (g) (Pascal/cm <sup>2</sup> )	(AP/L) <sub>9</sub> (g) (Pascal/cm <sup>2</sup> )	(AP/L) <sub>10</sub> (g) (Pascal/cm <sup>2</sup> )
B	4.448	4.034	161.70	127.15	135.02	105.40	29.52	29.46	29.61	29.67		
CATALISADOR	4.448	5.559	221.46	133.74	173.75	114.92	51.00	51.67	51.00	51.77		
PEQUENO	4.448	6.773	242.20	152.53	206.69	132.39	71.14	71.01	71.22	72.34		
d <sub>p</sub> =0.0763cm	4.448	7.316	280.90	164.69	225.20	143.29	82.56	82.40	82.61	83.44		
R <sub>0</sub> =0.839g/cm <sup>3</sup>	9.929	5.611	348.50	235.53	324.59	126.45	51.06	51.55	51.98	52.69		
L=4.0m	26.505	3.624	439.60	349.47	5911.93	327.84	16.24	15.84	16.11	16.47		
L=4.12m	26.505	4.613	419.20	407.20	521.97	206.92	30.50	29.96	30.70	31.93		
	26.505	6.413	604.50	444.59	672.40	222.58	64.82	64.14	65.01	67.04		
	32.500	5.947	621.70	605.49	902.36	220.29	56.63	55.60	56.87	57.59		
	32.500	7.266	675.10	696.54	1121.98	302.55	80.50	79.35	80.75	83.77		
	32.500	8.766	759.90	753.84	1273.34	406.46	110.00	109.54	111.06	115.50		
B	3.594	4.860	191.50	266.22	0.00	314.79	28.82	28.60	0.00	31.14		
CATALISADOR	3.594	6.077	194.70	136.30	143.00	147.12	59.81	59.56	59.81	60.37		
GRANDE	3.594	8.223	249.60	166.29	206.22	171.93	101.70	101.38	101.61	102.75		
d <sub>p</sub> =0.191cm	3.584	9.076	304.66	105.02	234.95	183.19	121.09	120.74	121.02	122.16		
R <sub>0</sub> =0.971g/cm <sup>3</sup>	7.989	6.301	320.30	229.31	250.02	171.50	60.26	59.54	60.17	61.17		
L=4.0m	7.989	7.938	392.50	240.76	322.20	185.10	95.80	95.11	95.67	96.91		
L=4.12m	16.626	6.182	491.40	407.94	453.82	224.65	59.54	58.31	59.23	61.39		
	16.626	7.550	615.40	395.13	538.50	225.00	86.77	85.39	86.43	89.30		
	16.626	8.585	679.80	409.30	609.74	242.37	100.45	109.98	108.09	111.10		
	26.659	6.387	719.10	601.30	712.55	205.65	64.74	62.74	61.15	67.53		
	26.659	8.171	879.20	589.11	863.31	294.17	90.12	95.86	97.49	102.86		
B	3.065	.680	687.66	726.37	753.91	305.09	49.63	47.89	50.39	53.06		
CATALISADOR	3.065	.796	733.20	651.51	819.79	278.94	65.69	62.59	66.22	69.22		
PEQUENO	3.065	.940	832.10	634.38	938.42	282.02	87.84	85.34	88.27	91.82		
d <sub>p</sub> =0.0763cm	3.065	1.073	752.79	630.57	1024.76	304.01	198.09	196.26	199.07	215.17		
R <sub>0</sub> =0.839g/cm <sup>3</sup>	9.732	.901	1483.60	1403.34	2128.30	528.25	79.18	73.85	78.70	88.04		
D=1.291cm	9.732	1.084	1763.10	1465.90	2441.59	577.33	109.57	103.65	109.35	129.31		
L=4.12m	9.732	1.228	1927.90	1494.11	2663.66	632.41	133.94	127.71	133.71	148.80		
	9.732	1.349	2058.20	1538.67	2830.68	691.96	156.79	150.24	156.58	174.74		
	9.732	1.476	2290.60	1578.01	3046.78	764.62	182.93	176.08	182.73	203.90		
B	3.296	.813	857.20	908.93	0.00	620.72	67.30	63.28	0.00	76.54		
CATALISADOR	3.296	.990	794.40	813.55	827.14	403.00	94.05	89.60	91.00	101.63		
GRANDE	3.296	1.371	926.30	627.26	881.18	353.22	170.69	165.27	167.09	177.50		
d <sub>p</sub> =0.191cm	3.296	1.710	1132.60	600.92	1140.82	400.04	37.42	245.89	249.46	264.01		
R <sub>0</sub> =0.974g/cm <sup>3</sup>	5.109	.796	1146.10	1244.96	0.00	762.11	66.37	66.26	0.00	113.03		
D=1.293cm	5.109	1.327	1232.50	890.45	1210.05	426.48	157.93	149.91	153.00	169.24		
L=4.12m	5.109	1.526	1375.30	902.55	1520.43	402.11	226.86	217.74	223.71	238.67		
	5.109	1.874	1595.10	958.06	1763.17	557.89	207.18	227.08	243.72	304.86		

## VALORES DE QUEDA DE PRESSÃO CALCULADOS POR:

1. Equação (II.13)
2. Equação (II.1)

## VALORES DE POROSIDADE CALCULADO SEGUNDO:

- a. Modelo deste trabalho
- b. Forma simplificada
- c. Modelo de Yang (27)
- A. Dados deste trabalho
- B. Modelo de Hariu-Molstad (9)

adotou o modelo de Yang (27). No caso da queda de pressão, além da determinação pela equação (II.12) de Leung (21), considerando o termo de aceleração, a mesma foi obtida pela correlação empírica de Khan-Pei (1), eq. (II.1).

Os resultados obtidos de porosidade, comprimento de entrada na região de aceleração e da queda de pressão nas duas regiões, encontram-se listados nas tabelas V.4 e V.5, respectivamente nos quais os valores de  $\epsilon$ , foram determinados pelo modelo em estudo, e segundo Yang (27). Para o comprimento de entrada foram utilizados além dos dois modelos citados anteriormente, as correlações empíricas de Rose-Duckworth (15), eq (II.4), e Shimizu (17), eq (II.5) e fig. (II.3.).

A queda de pressão nesta região foi calculada através da eq (II.12) de Leung (21).

No Anexo A., contém os programas de computador utilizados para o cálculo dos parâmetros que caracterizam mais adequadamente o escoamento das duas regiões.

No desenvolvimento deste estudo, observa-se que valores de porosidade diferenciados à partir do quinto algarismo significativo conduz a resultados distintos para cada parâmetro analisado; por essa razão os valores de  $\epsilon$  apresentados nas tabelas são descritos com mais de

TABLA V.4: RESULTADOS DE PROPRIEDADES FÍSICAS E TÉRMICAS DA ALUMINÍUMO OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE

MATERIAL	$E_1$ GPa	$E_2$ GPa	$\nu_1$	$\nu_2$	Largura mm	Larg. mm	Larg. mm	Larg. mm	Larg. mm
A	19.000	36.000	0.227023	0.2270466	2.0000	1.120	1.410	1.710	2.000
ESFERA AA	48.200	44.900	0.2270260	0.2270470	1.0000	1.110	1.630	1.920	2.020
$d_p = 0.0400$	71.000	35.700	0.2270253	0.2270473	1.0000	1.050	1.630	1.920	2.020
POLE 2.000/cm <sup>3</sup>	95.100	33.200	0.2270263	0.2270473	1.0000	1.030	1.510	1.920	2.020
D. S. C. 100	100.000	32.500	0.2270275	0.2270479	1.730	1.710	1.810	1.990	2.000
L = 4.0m	101.000	32.100	0.2270270	0.2270476	1.730	1.800	1.720	1.900	2.020
L = 4.8m	127.300	31.400	0.2270271	0.2270476	2.000	1.520	1.550	1.960	21.930
	65.000	21.800	0.2270268	0.2270463	1.920	1.110	1.280	1.690	2.020
	107.100	30.700	0.2270260	0.2270464	1.980	1.110	1.840	1.610	20.270
	89.000	27.900	0.2270260	0.2270464	1.740	1.050	1.550	1.860	2.020
	52.500	28.700	0.2270262	0.2270466	1.780	1.270	1.800	1.970	2.020
	69.400	29.000	0.2270269	0.2270464	1.580	1.420	1.130	1.620	2.020
	107.100	27.500	0.2270262	0.2270469	1.720	1.430	1.900	1.360	10.350
	120.000	27.900	0.2270262	0.2270469	1.740	1.140	1.670	1.990	2.020
	70.000	28.300	0.2270264	0.2270462	1.780	1.770	1.890	1.410	2.020
	97.100	24.400	0.2270263	0.2270466	1.710	1.630	1.390	1.210	2.020
	79.100	22.500	0.2270262	0.2270464	1.620	1.540	1.170	1.070	2.020
	116.500	47.100	0.2270264	0.2270472	1.620	1.210	1.640	1.400	2.020
	128.100	45.700	0.2270260	0.2270474	1.820	1.900	1.870	1.870	2.020
	163.400	44.600	0.2270260	0.2270472	1.080	1.210	2.120	1.000	10.440
	105.200	46.200	0.2270260	0.2270476	1.860	1.890	1.460	8.840	2.010
	132.000	45.200	0.2270260	0.2270479	1.780	2.000	2.050	10.060	2.710
	163.000	43.900	0.2270267	0.2270474	1.920	1.440	2.870	9.050	10.430
	101.800	44.400	0.2270262	0.2270472	1.700	1.400	1.480	2.220	2.220
	56.000	46.400	0.2270264	0.2270483	1.860	1.610	1.630	1.190	2.020
	87.100	44.600	0.2270275	0.2270486	1.920	1.150	1.020	2.620	2.120
	89.100	42.300	0.2270264	0.2270483	1.920	1.170	1.230	2.620	2.370
	154.900	42.000	0.2270264	0.2270485	1.860	1.660	1.240	8.520	11.230
	91.400	41.500	0.2270264	0.2270485	1.860	1.520	1.280	2.270	9.030
	151.600	42.500	0.2270267	0.2270485	1.960	1.000	1.510	9.480	2.520
	30.700	39.500	0.2270260	0.2270486	1.860	1.230	1.450	4.060	27.140
	76.000	38.600	0.2270260	0.2270488	1.800	1.520	1.050	3.680	8.900
	114.100	37.700	0.2270262	0.2270489	1.820	1.450	1.830	7.120	10.210
	84.500	37.100	0.2270260	0.2270481	1.920	1.220	1.260	6.720	9.230
	71.500	42.800	0.2270263	0.2270487	1.820	1.430	1.930	6.870	9.300

TABELA V.4: CONTINUACAO

MATERIAL	$\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$E_1$ ( $\text{GPa}$ )	$E_2$ ( $\text{GPa}$ )	$L_{\text{desp}}$ ( $\text{cm}$ )	$L_{\text{ext}}$ ( $\text{cm}$ )	$L_{\text{ext}}$ ( $\text{cm}$ )	$L_{\text{ext}}$ ( $\text{cm}$ )	$L_{\text{ext}}$ ( $\text{cm}$ )	
A	69.700	47.100	1991363	1.991140	2.100	1.400	1.600	2.000	2.400
ESTERA AB	39.600	43.800	1991356	1.991067	2.100	1.400	1.200	1.300	1.800
$d_p = 0.024 \text{ cm}$	58.100	17.200	1.991075	1.991021	1.900	1.000	1.300	1.100	1.700
$R_0 = 2.5 \text{ g/cm}^3$	79.700	16.900	1.991013	1.991017	2.100	1.500	1.200	1.500	1.700
$D = 0.21 \text{ cm}$	45.400	84.200	1.991019	1.991046	2.200	1.500	1.000	1.500	16.130
$L = 4.0 \text{ m}$	46.400	52.000	1.991153	1.991147	2.000	1.210	1.000	1.300	1.470
$L_E = 2.0 \text{ m}$	84.300	49.000	1.991059	1.991046	2.100	1.300	1.200	1.300	1.120
	68.300	49.000	1.991069	1.991142	2.100	1.100	1.500	1.200	1.500
	81.000	52.000	1.991046	1.991004	2.100	1.720	1.020	1.700	1.000
	45.100	50.000	1.991137	1.991143	1.700	1.100	1.300	1.200	1.400
	85.700	48.000	1.991048	1.991002	1.860	1.250	1.010	1.900	1.170
	135.600	45.000	1.991160	1.991156	2.220	1.810	2.830	10.120	10.600
	45.500	49.000	1.991134	1.991129	1.720	1.170	1.310	1.200	1.420
	86.200	47.000	1.991035	1.991024	1.920	1.370	1.050	1.950	1.190
	44.800	47.000	1.991078	1.991115	2.140	1.050	1.310	1.090	1.390
	69.500	46.000	1.991063	1.991120	1.800	1.070	1.600	1.870	1.550
	84.500	45.000	1.991177	1.991052	1.960	1.190	1.830	1.720	1.120
	89.300	45.000	1.991075	1.991076	2.160	1.190	1.800	1.620	1.290
	46.700	43.000	1.991032	1.991038	2.000	1.050	1.300	1.320	1.490
	92.400	42.000	1.991038	1.991061	2.100	1.120	1.000	1.060	1.100
	62.600	42.000	1.991024	1.991028	2.200	1.130	1.540	1.220	1.260

TABELA V.4 (CONTINUAÇÃO)

MATERIAL	$\omega_0$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu_1$ (g/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$L_{\text{EXP}}$ (cm)	$L_{\text{A(1)}}$ (cm)	$L_{\text{A(2)}}$ (cm)	$L_{\text{A(3)}}$ (cm)	$L_{\text{A(4)}}$ (cm)
A	34.200	49.100	1.992010	1.992250	1.000	1.180	1.860	1.670	3.310
ESFERA A100	36.600	46.000	1.992200	1.992370	1.000	1.270	1.300	2.100	6.290
D=0,100m	35.600	44.000	1.992100	1.992310	1.000	1.480	1.380	6.220	6.260
R=2,50g/cm <sup>3</sup>	32.700	41.000	1.992070	1.992360	1.000	1.450	1.150	6.750	6.760
D=5,21m	33.100	43.000	1.992070	1.992360	1.000	1.690	1.900	6.510	7.110
L=4,0m	34.100	44.000	1.992140	1.992300	1.000	1.470	1.000	5.100	5.790
L=1,0m	33.700	43.000	1.992120	1.992320	1.000	1.290	1.130	7.450	8.420
L=0,300	33.200	42.000	1.992100	1.992340	1.000	1.150	1.150	6.710	7.420
L=0,100	33.400	43.000	1.992080	1.992350	1.000	1.150	1.150	6.430	5.970
L=0,090	33.100	43.000	1.992070	1.992360	1.000	1.030	9.000	9.900	8.070
L=0,080	36.500	46.000	1.992160	1.992330	1.000	1.240	1.020	6.300	6.960
L=0,070	37.000	47.000	1.992170	1.992320	1.000	1.300	2.620	9.480	8.110
L=0,060	37.000	47.000	1.992060	1.992340	1.000	1.300	2.760	9.410	8.760
L=0,050	37.000	44.000	1.992400	1.992391	1.000	1.320	1.750	7.460	7.550
L=0,040	35.100	41.000	1.992450	1.992663	1.000	1.550	3.110	8.450	9.540
L=0,030	31.800	42.000	1.992650	1.992455	1.000	1.930	2.590	8.350	8.800
L=0,020	30.000	40.000	1.992622	1.992602	1.000	1.670	2.350	7.740	8.450
L=0,010	31.000	41.000	1.992376	1.992630	1.000	1.360	1.650	6.550	7.140
L=0,005	31.000	40.000	1.992694	1.992011	1.000	1.360	2.670	7.250	8.140
L=0,002	30.000	39.000	1.992667	1.992650	1.000	1.730	2.720	7.500	8.570
L=0,001	37.000	47.000	1.992124	1.992730	1.040	1.290	2.240	7.350	8.260
L=0,0005	32.000	39.000	1.992395	1.992653	1.700	1.090	1.430	5.250	7.030
L=0,0002	40.000	49.6131	1.992399	1.992020	1.400	2.340	7.570	8.280	
L=0,0001	37.000	49.5651	1.992450	1.840	1.310	2.210	7.480	8.510	
L=0,00005	34.000	49.2469	1.992662	1.910	1.310	2.310	6.670	9.960	
L=0,00002	34.000	49.2422	1.992501	1.760	1.050	2.080	8.830	10.090	
L=0,00001	32.500	45.000	1.992610	1.992509	1.820	1.520	2.760	7.000	8.870
L=0,000005	40.000	49.000	1.992096	1.992420	1.910	2.400	2.700	8.500	9.060
L=0,000002	39.000	49.7863	1.992670	1.820	1.310	1.310	7.320	7.350	
L=0,000001	43.000	49.2654	1.992303	1.990	1.450	2.540	8.630	8.920	
L=0,0000005	45.000	49.000	1.992054	1.992060	1.700	1.490	3.210	8.580	9.850
L=0,0000002	38.000	49.7232	1.992041	1.800	1.450	1.520	8.010	9.650	
L=0,0000001	31.000	49.2140	1.992544	1.840	1.480	2.050	8.010	9.650	
L=0,00000005	29.000	49.000	1.992238	1.994043	1.940	0.850	2.500	8.220	10.410

TABELA V.4: CONTINUAÇÃO

MATERIAL	$\mu_1$ (g/cm³)	$\mu_2$ (g/cm³)	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	LAe:P (m)	LA(1) (m)	LA(2) (m)	LA(3) (m)	LA(4) (m)
A	50.600	47.100	.990357	.990361	1.920	1.520	1.300	6.970	6.430
ESFERA A120	59.300	46.700	.990360	.990368	1.940	1.940	1.520	6.400	6.020
$d_p=0.12\text{cm}$	66.300	46.200	.990376	.990618	1.920	1.670	1.760	6.770	7.090
$R_{\text{ext}}=2.5\text{g/cm}^3$	117.600	44.900	.995891	.997420	1.920	1.050	2.780	8.430	8.510
D=5.21cm	76.100	43.600	.997227	.998286	1.850	1.020	1.990	7.190	7.390
L=4.0m	83.100	44.100	.996978	.998138	1.950	1.420	2.250	7.310	7.580
LE=1.8m	72.200	43.100	.997329	.998359	1.780	1.510	1.930	6.940	7.280
	87.300	42.000	.996700	.997983	1.970	1.640	2.220	6.980	7.820
	61.200	41.500	.997661	.998083	1.800	1.260	1.690	6.170	6.990
	85.100	40.700	.990530	.997894	1.910	1.270	2.230	6.770	7.630
	127.200	40.100	.994561	.996699	1.880	1.410	2.060	7.240	8.640
	98.000	39.800	.995897	.997531	1.500	1.400	2.430	7.380	8.060
	62.000	39.500	.997435	.998468	1.900	1.600	1.740	6.110	7.030
	97.200	38.600	.995822	.997507	1.560	1.550	2.430	7.210	8.120
	104.200	37.700	.995450	.997305	1.420	1.280	2.530	7.370	8.400
	103.200	37.100	.993934	.996294	2.200	2.00	2.510	8.350	7.460
	161.900	34.200	.9908948	.993149	1.400	1.290	2.800	9.840	8.720
	166.100	32.100	.997224	.992108	1.610	1.600	2.530	9.820	8.710
	60.300	45.200	.996808	.998113	1.420	.850	1.810	7.270	6.240
	92.600	43.600	.995896	.997438	1.810	1.600	2.500	8.160	7.190
	129.500	42.000	.994114	.996327	1.720	1.640	2.910	8.010	8.010
	150.300	42.000	.992981	.995621	1.620	1.100	3.060	8.450	8.450
	42.000	55.300	.997430	.998426	1.740	1.200	1.610	6.060	6.060
	94.000	42.000	.995562	.997262	1.640	1.260	2.450	7.230	7.230
	158.100	40.600	.992198	.995151	1.920	1.160	3.350	8.600	8.600
	30.000	49.900	.998495	.999004	1.880	1.200	1.020	4.910	4.910
	56.200	40.300	.997124	.9990241	1.930	1.690	1.670	6.050	6.050
	77.900	40.100	.995904	.997405	1.750	1.260	2.000	6.850	6.850
	115.100	39.500	.993979	.996296	1.780	1.110	2.610	7.730	7.730
	147.700	38.600	.991915	.995011	1.360	1.400	2.020	8.440	8.440
	29.500	39.500	.998421	.999045	1.080	.850	1.030	4.910	4.910
	78.200	38.100	.995701	.997323	1.520	.870	2.010	6.800	6.800
	131.100	38.000	.993760	.996180	1.660	.790	2.570	7.640	7.640
	146.100	37.100	.991912	.994782	1.920	.840	1.030	8.370	8.570
	29.900	36.500	.998141	.998086	1.720	1.310	1.090	4.930	4.930
	77.000	35.500	.995036	.996983	1.940	.750	1.980	6.220	6.770
	128.000	34.800	.991561	.994797	2.200	.680	2.320	8.030	8.030
	42.200	35.200	.997192	.998311	1.820	1.420	1.830	5.540	5.540
	123.500	33.500	.991186	.991600	1.910	.660	2.220	7.920	7.920

TABELA V.4: CONTINUAÇÃO

MATERIAL	$M_1$ (g/cm <sup>3</sup> )	$M_2$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	LA <sub>EP</sub> (cm)	LA(1) (cm)	LA(2) (cm)	LA(3) (cm)	LA(4) (cm)
A	39.700	45.200	.9920369	.9920445	1.380	1.420	1.470	1.750	5.670
ESFERA A170	71.500	43.100	.9926754	.9927087	1.950	1.050	1.010	2.830	6.230
d <sub>P</sub> =0.17cm	180.900	42.500	.9925037	.9927103	2.100	1.450	1.480	8.410	6.990
$\rho_{OS}=2.5g/cm^3$	116.100	42.000	.9924545	.9926607	1.750	1.300	1.730	7.170	7.320
D=5.21cm	26.700	42.500	.9926244	.9927034	2.600	1.900	1.860	4.140	4.490
L=4.0m	62.000	43.700	.9926979	.9928141	1.820	1.010	1.930	2.220	5.960
LE=1.8m	97.000	40.900	.9926142	.9926416	1.780	1.050	2.450	8.030	6.890
	122.700	40.100	.9923253	.9925143	1.740	1.170	2.920	8.100	7.460
	45.500	38.600	.9924725	.9924469	2.100	1.910	1.510	5.940	5.360
	98.000	38.600	.9925096	.9925992	1.940	1.120	2.370	7.850	6.740
	115.500	38.300	.9926220	.9926014	1.720	1.000	2.720	7.950	7.310
	137.700	38.1000	.9923224	.9925280	1.820	1.450	2.940	8.740	7.750
	42.000	37.400	.9925224	.9925303	1.880	1.880	1.880	5.700	5.220
	71.200	36.500	.9925540	.9925393	1.580	1.000	2.010	7.430	6.220
	122.000	35.500	.9922237	.9922254	1.720	1.600	2.560	8.690	7.410
	148.000	34.800	.9926239	.9924010	1.820	2.200	2.700	9.280	7.950
	41.000	34.200	.9927049	.9928223	1.940	1.850	1.320	5.500	5.210
	88.300	33.500	.9923613	.9926112	1.780	1.750	1.960	7.510	6.680
	140.600	32.500	.9926567	.9923590	1.700	1.640	2.370	8.910	7.790
	92.600	30.300	.9924127	.9922020	1.610	1.300	1.410	5.710	5.620
	106.500	29.500	.9929274	.9923646	1.620	1.820	1.750	7.320	7.100
	40.700	41.500	.9928391	.9929030	1.960	1.490	1.190	4.220	5.680
	102.000	40.600	.9925606	.992332	1.920	1.410	2.630	7.770	7.520
	97.500	40.100	.9925890	.9925115	1.740	1.010	2.580	7.160	10.020
	103.000	39.500	.9925392	.9925115	1.020	1.090	2.560	7.750	10.960
	27.200	38.300	.9920816	.992309	2.020	1.040	1.020	3.140	7.360
	43.100	38.100	.9920110	.9928077	1.840	1.160	1.310	4.910	8.360
	47.500	36.100	.9926998	.9928666	1.720	1.100	1.140	5.190	8.450
	43.700	35.500	.9927003	.9928733	2.020	1.300	1.350	4.970	8.420
	80.300	34.200	.9925600	.9925111	1.760	1.040	2.030	6.410	7.170
	43.000	33.500	.9921200	.9925371	1.740	1.990	2.830	8.140	8.680
	78.000	33.200	.9945001	.9926038	1.780	1.880	2.250	7.040	7.690
	59.600	32.100	.9926396	.9927957	1.840	1.870	1.730	5.630	6.520
	59.200	31.800	.9926332	.9928039	2.060	1.900	1.700	5.660	6.610
	81.200	31.000	.9949722	.9921724	1.780	1.790	2.040	6.200	7.330
	102.100	30.500	.9920552	.9925962	1.940	1.080	2.300	6.340	8.050
	60.500	29.500	.9925813	.9926278	1.780	1.970	1.750	5.350	6.640
	147.200	29.100	.9927927	.9924236	1.620	1.860	2.160	7.970	8.920
	64.000	28.300	.9925359	.9924663	1.960	1.810	1.760	5.360	6.870
	99.700	27.100	.9920203	.9925603	1.740	1.360	2.120	6.170	7.920
	92.000	27.100	.9925225	.9925879	1.720	1.650	1.950	5.960	7.690
	115.700	26.200	.9927964	.9924445	1.760	1.960	1.990	6.890	8.300
	115.000	25.800	.9929057	.9924450	2.020	1.540	1.990	6.800	8.610
	105.000	25.300	.9920540	.9927720	1.740	1.740	1.700	6.160	8.140

TABELA V.4 (CONTINUACAO)

MATERIAL	$\theta_0$ (%)	$\theta_f$ (%)	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$L_{aexp}$ (m)	$L_A(1)$ (m)	$L_A(2)$ (m)	$L_A(3)$ (m)	$L_A(4)$ (m)
B	2.130	11.200	.9997230	.9997266	.300	2.500	.000	3.000	.000
CORTE	2.140	11.200	.9997110	.9997110	1.000	1.670	.070	5.000	1.800
$d_p=0.1032$	52.350	11.200	.9997113	.9997157	4.000	.220	.710	9.000	4.300
$Ros=8.96g/cm^3$	62.160	17.800	.9998127	.9998118	4.700	.760	1.610	9.000	4.700
$D=0.020m$	0.000	0.000	0.0000000	0.0000000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$L=6.2m$	0.000	0.000	0.0000000	0.0000000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$LE=1.8m$	0.000	0.000	0.0000000	0.0000000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
 C	 4.030	 9.400	 .999376	 .999377	 .160	 .410	 .070	 2.000	 1.120
AREIA	2.600	9.400	.9998021	.9998179	.240	.400	.170	3.000	1.570
$d_p=0.126cm$	19.840	9.400	.998995	.998655	.670	.330	.510	4.000	2.640
$Ros=2.7g/cm^3$	45.000	9.400	.993255	.996936	.770	.780	1.080	6.000	3.800
$D=0.03m$	68.050	9.400	.989105	.995352	1.170	.570	2.110	7.000	4.650
$L=2.8m$	154.5610	9.400	.973042	.9817672	1.360	.360	0.000	9.000	7.020
$LE=L.8m$	291.210	9.400	.979530	.986635	1.560	.950	0.000	10.000	9.520

VALORES DE POROSIDADE E COMPRIMENTO DE ENTRADA CALCULADOS SEGUNDO:

1. Modelo deste trabalho
  2. Modelo de Yang (27)
  3. Modelo de Shimizu (17)
  4. Modelo de Rose-Duckworth (15)
- A. Dados deste trabalho  
 B. Dados de Shimizu (17)  
 C. Dados de Kolpakov (37)

TABELA V.5: RESULTADOS DE  $(\Delta P)_1$ ,  $(\Delta P)_2$ , E  $(\Delta P)_3$  OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE E CALCULADOS NAS DIFERENTES REGIÕES.

MATERIAL	$W_s$ (g/s)	$W_f$ (g/s)	$\Delta P_{1exp}$ (PASCAL)	$\Delta P_{1expt}$ (PASCAL)	$\Delta P_{1a}$ (PASCAL)	$\Delta P_{1b}$ (PASCAL)	$\Delta P_{1c}$ (PASCAL)	$\Delta P_{1d}$ (PASCAL)	$\Delta P_{1e}$ (PASCAL)	$\Delta P_{1f}$ (PASCAL)	$\Delta P_{1g}$ (PASCAL)
A	36.600	36.500	725.94	686.70	520.91	313.72	403.46	264.82	78.34	27.12	
ESTERA NA $d_p=0.04cm$	48.700	33.800	1000.52	951.57	626.40	375.41	557.38	342.08	66.28	59.47	
RGS=2.5g/cm <sup>3</sup>	71.000	35.200	882.90	600.22	867.27	667.45	769.74	556.15	99.87	63.25	
D=5.2cm	95.100	33.200	1049.67	824.04	1073.13	710.66	923.36	70.64	73.48	76.70	
L=4.0m	103.400	32.500	1029.48	604.42	1149.96	906.64	993.92	880.21	93.62	10.32	
LL=1.8m	101.300	32.100	1039.36	804.42	1122.72	741.05	969.05	842.01	70.21	92.67	
	177.800	31.400	1181.31	1314.54	1130.54	1314.96	0.00	2714.22	76.52	326.22	
	65.000	31.900	627.34	490.50	760.50	419.56	661.71	164.92	59.10	52.12	
	109.100	30.700	1068.01	941.70	1153.92	697.15	931.61	677.29	55.90	91.23	
	38.000	27.900	985.00	676.99	909.23	575.59	743.76	616.12	52.30	65.91	
	52.500	28.700	573.79	470.88	593.14	370.26	499.22	305.62	56.87	35.32	
	69.400	28.300	745.56	500.31	743.13	510.29	615.01	454.07	61.26	49.14	
	107.100	27.100	769.99	524.74	1082.57	750.66	885.31	801.41	60.69	80.37	
	120.300	27.900	765.18	532.55	1142.00	566.46	774.20	672.52	76.93	53.62	
	76.300	28.300	549.36	382.59	559.56	310.97	497.77	355.12	24.73	35.37	
	77.100	24.100	618.03	441.45	904.72	343.08	594.07	460.77	15.08	34.96	
	79.100	22.500	519.93	327.63	743.05	253.37	471.21	363.14	32.47	25.46	
	116.500	47.100	1187.61	824.04	1507.63	977.95	1312.88	1111.92	95.93	129.79	
	128.100	45.700	1471.50	1118.34	1965.19	1273.27	1375.95	1234.62	142.98	140.44	
	163.400	44.600	1471.50	1118.34	1965.19	1273.27	0.00	1773.72	67.41	195.95	
	105.200	46.200	1098.72	962.52	1358.90	1154.92	1175.01	951.52	144.81	111.68	
	132.800	45.200	1268.73	915.57	1643.33	1156.41	1402.36	1302.08	147.68	151.04	
	163.300	43.400	1373.40	1160.53	1942.68	1354.05	0.00	1786.98	101.20	201.43	
	101.300	44.400	1177.20	863.28	1405.78	997.24	1341.94	1023.76	124.79	131.41	
	56.600	46.400	845.39	659.51	914.32	705.64	902.55	521.23	161.29	61.91	
	83.700	44.600	1010.33	824.04	1991.70	856.42	1135.19	911.31	138.63	96.57	
	88.100	42.300	761.38	784.06	1201.08	871.45	1132.45	856.53	121.57	101.57	
	154.900	42.000	1442.97	1137.96	1941.45	1529.57	6.00	1007.69	130.34	342.85	
	91.400	41.500	705.75	480.69	1200.04	906.31	1100.99	945.14	121.13	98.64	
	45.600	42.500	784.80	676.99	717.56	470.28	683.52	372.44	108.42	42.50	
	38.700	39.500	716.13	549.36	595.54	373.82	555.79	296.10	98.64	32.49	
	76.000	38.600	853.40	686.70	982.35	721.49	992.57	632.27	106.73	73.63	
	114.100	37.700	1222.70	1030.50	1371.71	983.12	1229.48	1093.14	98.17	123.62	
	84.500	37.100	971.19	745.56	1042.14	666.47	931.66	743.71	80.17	82.66	
	71.500	42.800	814.24	698.20	1020.34	723.54	967.97	652.84	120.51	78.29	

TABELA V.5: CONTINUACAO  
MATERIAL W5

	$W_f$ (g/s)	$\Delta P_{Temp}$ (PASCAL)	$\Delta P_{ficha}$ (PASCAL)	$\Delta P_{(1a)}$ (PASCAL)	$\Delta P_{(1b)}$ (PASCAL)	$\Delta P_{(2a)}$ (PASCAL)	$\Delta P_{(2b)}$ (PASCAL)	$\Delta F_{(1a)}$ (NEWTON)	$\Delta F_{(2a)}$ (NEWTON)
<b>A</b>	69.700	47.400	1481.31	1177.20	1195.79	861.59	1290.16	143.61	56.78
ESFERA AB	37.600	48.300	1236.06	578.79	821.42	585.38	904.20	249.21	23.92
$d_p = 0, 021m$	54.800	47.700	1608.84	990.81	1016.95	763.62	1122.98	563.65	46.84
$R_05=2.59/cm^3$	79.700	46.700	1569.40	1265.49	1314.96	776.38	1415.11	891.98	145.94
$D=5.21cm$	45.400	64.200	1569.40	1373.40	1362.27	1043.27	1476.76	973.19	156.61
$L=4.0m$	46.400	52.000	1120.15	892.71	843.77	528.54	835.94	464.62	113.82
$1.1 \times 2.0m$	64.300	49.000	1500.93	1245.87	1288.10	820.60	1228.65	799.57	97.51
	68.300	49.000	1363.59	1118.34	1080.07	680.66	1039.16	607.90	92.30
	81.000	52.000	604.22	667.08	328.15	124.97	328.39	61.94	67.56
	45.100	50.000	1128.15	745.06	795.49	478.43	74.62	378.63	1.38
	85.700	48.000	1471.50	1036.65	1282.16	850.66	1221.53	803.08	102.25
	135.600	45.000	2423.52	1608.84	1828.42	1179.07	9.00	1837.31	35.56
	45.500	49.000	1088.91	756.18	785.38	488.84	725.25	374.62	59.08
	86.200	47.000	1432.26	1039.86	1267.27	894.62	1174.31	779.27	109.39
	41.800	47.000	1020.24	824.04	746.20	436.10	707.15	354.14	32.67
	69.500	46.000	1245.87	735.75	1079.72	658.43	1034.59	620.38	87.64
	B4.500	45.000	1324.35	1049.67	1201.11	771.82	1109.11	701.54	66.75
	86.300	45.000	1422.45	1294.92	1260.38	811.00	1163.17	795.05	86.93
	46.700	43.000	873.09	539.55	710.53	114.23	647.41	347.59	70.77
	92.400	42.000	1226.25	1088.91	1229.95	760.31	1077.28	784.26	72.58
	62.600	42.000	990.81	873.09	881.43	546.69	790.96	476.13	36.24

TABELA V.5:CONTINUACÃO

MATERIAL	WS (g/s)	WF (g/s)	$\Delta PT_{exp}$ (PASCAL)	$\Delta PT_{exp}$ (PASCAL)	$\Delta PT(1a)$ (PASCAL)	$\Delta PT(1b)$ (PASCAL)	$\Delta PT(2a)$ (PASCAL)	$\Delta PT(2b)$ (PASCAL)	$\Delta Pf(1a)$ (PASCAL)	$\Delta P(2a)$ (PASCAL)
A	34.200	48.000	907.38	167.39	517.36	300.33	424.01	240.28	96.43	70.23
ESFERA A100	56.400	46.000	1314.54	821.31	707.07	410.00	517.11	407.17	96.47	104.78
$d_p=0,10\text{cm}$	55.300	44.000	1265.49	821.31	672.00	467.78	513.73	301.57	104.01	96.88
$R0s=2.5g/cm^3$	57.700	41.000	1187.01	821.31	646.13	437.30	475.73	362.13	70.13	90.59
$D=3.21\text{cm}$	78.100	36.000	1010.43	667.91	819.34	430.03	580.37	514.87	30.13	107.96
$L=4.0\text{m}$	44.100	40.000	1120.15	603.97	611.31	357.07	470.47	310.63	5.6.	80.23
$LE=1.8\text{m}$	100.100	40.000	1402.83	748.00	1103.70	739.89	860.71	851.72	101.52	174.37
	100.300	49.000	1236.37	1120.13	1103.63	739.18	870.01	845.61	100.01	82.47
	48.100	43.000	1206.63	712.03	517.51	357.07	456.32	314.31	82.36	84.26
	158.300	51.000	2197.74	1512.65	1776.18	1052.73	0.00	1040.13	140.11	273.60
	76.500	46.000	1401.12	940.30	393.54	553.17	676.77	584.87	70.01	137.46
	100.100	34.000	1693.73	1236.37	1279.03	932.64	0.00	970.01	10.01	163.45
	102.500	42.000	2110.24	1491.93	1540.13	1079.43	0.00	1170.13	10.01	180.73
	77.500	44.000	1363.59	334.65	934.29	631.40	747.77	631.11	111.01	148.10
	101.500	41.000	1380.70	1296.68	1582.89	1161.10	0.00	1000.01	210.10	238.02
	118.400	12.000	1679.10	1052.33	1297.03	1107.20	0.00	1051.01	101.11	207.15
	105.300	40.000	1520.55	975.04	1130.19	852.49	846.50	860.53	182.11	172.28
	68.400	41.000	1275.30	810.55	822.63	510.29	607.10	546.11	100.11	131.81
	91.800	43.000	1587.22	1032.35	1060.37	713.22	801.10	791.83	110.01	175.49
	104.000	39.000	1520.55	1000.60	1117.82	872.52	861.50	830.11	126.23	166.44
	97.400	39.000	1865.86	1077.02	1649.57	660.90	797.76	772.70	91.51	158.48
	52.500	32.000	803.22	356.32	582.59	317.47	435.76	328.36	60.40	78.61
	107.800	40.000	1402.83	907.70	1183.66	835.20	932.40	923.12	117.08	183.84
	104.100	37.000	1353.73	838.84	1003.32	671.27	806.82	781.42	86.30	147.48
	163.300	34.000	1638.27	1032.38	1530.42	890.00	0.00	1206.23	64.66	162.76
	168.300	34.000	1697.13	961.05	1411.61	805.11	0.00	1310.41	60.88	179.26
	126.700	46.000	1863.90	1126.87	1462.01	1074.61	0.00	1232.75	147.01	224.50
	125.900	43.000	1706.64	1010.00	1373.97	1422.10	0.00	1198.45	212.14	237.16
	71.900	40.000	1700.83	934.29	944.92	640.94	762.42	637.66	139.50	157.96
	121.200	46.000	1785.42	1147.44	1412.59	997.24	0.00	1187.98	138.63	242.32
	154.600	45.000	1991.43	1162.88	1744.29	1227.83	0.00	1653.41	136.39	305.78
	58.200	34.000	922.14	650.53	641.34	432.05	479.02	373.69	83.75	87.61
	145.400	31.000	1383.21	897.90	1371.41	944.06	0.00	967.60	74.41	127.45
	180.000	29.000	1520.55	974.66	1661.55	768.75	0.00	1131.37	39.15	116.51

TABELA V.5: CONTINUAÇÃO

MATERIAL	Ws (g/s)	Wf (g/s)	$\Delta PT_{exp}$ (PASCAL)	$\Delta PT_{Aexp}$ (PASCAL)	$\Delta PT(1a)$ (PASCAL)	$\Delta PT(1b)$ (PASCAL)	$\Delta PT(2a)$ (PASCAL)	$\Delta PT(2b)$ (PASCAL)	$\Delta PF(1a)$ (PASCAL)	$\Delta P(2a)$ (PASCAL)
A	59.600	47.400	824.10	679.89	715.93	500.31	524.02	437.15	150.36	137.50
ESFERA AL20	59.300	46.700	892.71	659.51	793.98	679.92	652.04	519.15	132.56	155.53
$d_p=0.12\text{cm}$	65.300	46.200	862.84	754.94	954.16	650.65	591.80	508.02	160.77	169.36
$\rho_S=2.59/\text{cm}^3$	112.600	44.700	1167.39	935.93	1008.56	1000.86	1007.77	1003.56	166.69	248.81
$D=5.21\text{cm}$	76.100	43.500	922.14	716.13	983.00	718.13	700.42	518.07	157.19	171.13
$L=4.0\text{m}$	93.100	44.100	1000.62	804.42	972.31	652.62	700.85	705.64	123.77	176.04
$LE=1.8\text{m}$	72.200	43.100	863.28	677.84	931.73	500.51	676.26	500.00	128.53	163.97
	37.300	42.000	951.57	784.80	989.27	744.87	731.12	705.77	105.57	182.01
	61.200	41.500	745.10	549.76	747.93	411.45	521.11	404.12	103.51	138.70
	86.100	40.100	807.70	716.13	941.17	535.95	700.73	501.50	83.00	169.64
	121.200	39.100	1000.72	843.88	1002.52	527.20	0.00	1000.00	100.00	205.89
	73.600	37.100	911.76	801.63	1047.80	597.01	0.00	501.00	100.00	179.84
	63.200	39.000	705.18	566.58	701.56	535.12	585.73	470.72	101.00	131.37
	97.100	38.300	971.19	576.79	1018.41	703.39	0.00	707.00	100.00	174.69
	100.200	37.700	1000.81	510.12	1034.45	600.69	0.00	800.52	100.00	178.92
	103.200	37.100	1000.62	833.89	1031.50	500.22	0.00	309.88	100.00	131.27
	101.900	34.200	1206.63	589.80	1003.99	953.62	0.00	104.61	50.00	127.71
	166.100	32.100	1167.39	716.13	1017.14	519.40	0.00	990.06	50.00	104.27
	60.300	45.200	720.94	412.02	678.65	370.21	580.06	455.51	50.00	139.23
	92.600	43.600	912.33	687.70	992.62	503.67	0.00	704.87	50.00	173.08
	122.500	42.800	1000.72	755.37	1217.23	717.19	0.00	1015.00	50.00	195.44
	150.300	42.300	1206.63	757.07	1194.45	641.16	0.00	1161.00	50.00	199.05
	40.800	55.300	694.51	519.93	600.40	370.29	475.49	301.50	50.00	110.40
	74.000	42.000	922.20	368.28	988.59	601.62	0.00	698.44	50.00	152.93
	107.100	40.400	1245.87	901.60	1046.20	847.49	0.00	1257.91	50.00	206.17
	30.800	19.500	510.12	412.02	109.80	237.21	310.36	100.91	50.00	62.96
	55.200	10.300	657.27	559.17	636.96	343.39	451.36	368.50	50.00	100.60
	74.700	10.100	791.61	576.79	844.66	512.61	579.94	501.00	50.00	124.38
	115.100	39.500	981.00	706.32	1153.50	640.43	0.00	808.57	50.00	152.32
	147.200	38.600	1230.06	421.83	1402.49	901.52	0.00	1012.60	50.00	158.99
	29.500	39.500	510.12	412.02	386.37	172.05	297.57	173.59	49.42	59.82
	78.200	38.600	781.80	559.17	819.24	378.45	352.03	496.08	10.00	112.46
	111.100	38.000	971.19	657.27	1107.59	485.30	0.00	757.37	40.00	140.19
	146.100	37.100	1110.34	882.90	1412.85	611.09	0.00	996.79	40.00	148.41
	29.700	36.500	470.88	343.35	382.69	229.57	275.70	164.07	66.36	55.15
	77.000	35.500	720.84	580.60	794.17	322.85	513.53	456.87	36.39	95.95
	128.000	34.800	990.63	821.01	1258.08	479.26	776.10	763.00	32.06	108.58
	42.200	35.200	500.31	392.40	486.11	312.80	330.41	227.59	67.63	64.17
	123.500	33.500	892.71	716.13	1212.07	441.91	798.39	704.49	29.43	97.39

TABELA V.5: CONTINUAÇÃO

MATERIAL	Ma	Mf	ΔPTexp (PASCAL)	ΔPTAexp (PASCAL)	ΔPT(1a) (PASCAL)	ΔPTA(1b) (PASCAL)	ΔPT(2a) (PASCAL)	ΔPTA(2b) (PASCAL)	ΔPF(1a) (PASCAL)	ΔP(2a) (PASCAL)
A	38.600	45.200	539.55	451.26	521.74	342.71	494.60	264.91	104.54	85.82
ESFERA A170	71.500	43.100	884.42	667.08	797.87	653.82	572.69	523.89	126.35	133.45
dp=0.17cm	100.900	42.500	922.14	774.97	922.14	774.97	0.00	751.10	97.82	164.65
Ros=2.5g/cm <sup>3</sup>	116.100	42.900	1079.10	745.56	1186.13	695.33	0.00	745.36	76.26	177.25
D=5.21cm	26.700	42.500	529.93	471.07	319.15	192.90	308.61	163.81	65.39	50.76
L=4.8m	62.800	41.700	774.99	588.60	766.86	366.35	584.71	444.79	64.73	128.58
I,E=1.8m	97.000	40.900	941.76	725.94	1003.67	537.70	0.00	697.32	65.26	151.49
	122.900	40.100	1098.72	873.89	1227.41	689.63	0.00	925.59	67.41	174.94
	45.500	38.600	647.96	549.36	531.16	252.92	376.01	281.57	52.55	84.13
	98.800	38.600	892.71	706.32	932.19	517.65	623.86	621.99	63.77	134.38
	115.500	38.300	1039.86	725.94	1147.48	587.55	0.00	814.49	55.55	150.58
	137.700	38.000	1157.58	853.47	1342.74	903.25	0.00	984.64	79.63	160.44
	42.000	37.400	510.12	421.83	493.43	221.70	346.58	243.98	46.58	72.68
	71.200	36.500	716.13	441.45	746.78	373.97	497.48	441.91	56.89	101.91
	122.000	35.500	1216.44	902.52	1194.88	463.38	0.00	785.71	33.16	124.10
	148.800	34.800	1166.89	833.35	1434.77	1382.70	0.00	154.77	107.75	120.64
	41.800	34.200	576.79	461.07	479.62	265.13	321.77	217.01	38.54	59.71
	88.300	33.500	556.84	478.15	896.11	354.82	663.28	627.84	32.96	85.97
	119.600	32.500	1157.58	863.28	1374.44	492.36	622.77	820.55	27.38	44.39
	52.600	30.300	627.64	510.12	587.95	362.56	364.58	248.73	50.79	51.57
	106.500	29.500	970.81	618.23	1117.51	477.36	654.46	522.16	31.22	61.49
	40.700	41.500	725.84	608.22	553.96	380.99	446.69	293.71	48.48	94.78
	102.500	40.600	1079.98	863.28	1082.81	725.99	0.00	833.92	101.94	189.28
	97.500	40.100	1022.24	716.13	1001.31	899.98	0.00	885.29	135.20	169.26
	103.800	37.500	1349.67	789.80	1049.67	784.88	0.00	802.66	75.92	173.58
	27.200	38.300	529.74	461.07	497.74	199.65	336.36	177.57	75.67	59.18
	43.100	38.400	686.70	559.17	548.97	311.91	432.30	343.79	83.69	74.58
	97.500	36.100	697.46	461.07	563.91	323.14	426.08	316.64	75.64	92.62
	43.700	35.500	637.35	549.36	529.91	321.85	397.36	283.57	81.13	84.32
	88.300	34.200	206.91	547.36	629.10	435.93	588.18	536.19	60.1e	129.36
	43.800	33.500	1147.77	765.18	1362.74	708.91	0.00	1213.78	55.23	156.98
	98.800	33.200	902.22	637.35	976.16	804.40	664.18	691.98	104.32	129.20
	59.600	32.100	598.41	500.31	637.10	267.32	440.98	362.66	45.42	92.26
	59.200	31.800	618.93	539.55	634.59	275.19	449.82	362.64	47.49	90.41
	81.200	31.000	551.59	532.93	620.11	346.80	774.99	568.78	46.32	103.71
	109.400	30.300	843.66	667.08	1064.00	564.49	0.00	687.97	52.35	114.72
	60.500	29.500	608.17	353.16	636.76	251.42	424.42	384.42	34.59	81.64
	147.200	29.100	1137.96	706.32	1398.11	623.08	0.00	866.61	39.4.	144.88
	64.900	28.300	637.65	510.93	665.98	276.93	437.12	368.38	36.47	79.24
	99.100	27.100	873.09	626.22	990.89	612.79	609.36	569.15	56.39	87.26
	92.200	27.100	814.23	549.36	925.71	323.70	569.89	500.30	26.68	79.58
	115.700	26.200	951.57	627.27	1153.44	333.96	687.05	609.92	37.32	76.75
	115.500	25.800	951.57	774.99	1155.74	351.53	685.57	608.02	26.89	76.36
	105.000	25.300	673.09	588.60	1048.66	395.44	503.23	630.99	27.86	63.53

TABELA V.5: CONTINUAÇÃO

MATERIAL	Ws (g/s)	Wf (g/s)	$\Delta P_{Texp}$ (PASCAL)	$\Delta P_{TAexp}$ (PASCAL)	$\Delta P_{T(1a)}$ (PASCAL)	$\Delta P_{TA(1b)}$ (PASCAL)	$\Delta P_{T(2a)}$ (PASCAL)	$\Delta P_{TA(2b)}$ (PASCAL)	$\Delta P_f(1a)$ (PASCAL)	$\Delta P(2a)$ (PASCAL)
B	2.100	11.200	0.00	73.83	0.00	415.74	0.00	371.67	70.00	134
COBRE	9.240	17.000	0.00	120.15	0.00	481.30	0.00	281.00	130.40	5.17
$d_p=0.1032$	52.050	11.200	0.00	1615.30	0.00	857.73	0.00	1450.00	25.68	86.73
$\rho_s=8.96g/cm^3$	62.160	17.000	0.00	1654.52	0.00	3030.07	0.00	4165.81	244.00	437.65
$D=0.028m$	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$L=6.2m$	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$LE=1.8m$	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
 C	 4.000	 9.400	 0.00	 30.00	 0.00	 32.95	 0.00	 23.77	 16.10	 1.54
AREIA	21.680	9.400	0.00	60.00	0.00	52.13	0.00	48.83	16.71	4.33
$d_p=0.26cm$	17.040	9.400	0.00	100.00	0.00	115.23	0.00	146.73	16.40	18.91
$\rho_s=2.7g/cm^3$	45.300	9.400	0.00	140.00	0.00	195.62	0.00	405.14	21.48	21.65
$D=0.03m$	38.840	9.400	0.00	110.00	0.00	194.03	0.00	832.73	16.51	57.70
$L=2.8m$	154.520	9.400	0.00	370.00	0.00	813.88	0.00	0.00	16.10	0.00
$LE=1.8m$	201.240	9.400	0.00	1800.00	0.00	2329.71	0.00	0.00	26.81	0.00

VALORES DE POROSIDADE E COMPRIMENTO DE ENTRADA CALCULADOS SEGUNDO:

1. Modelo deste trabalho
2. Modelo de Yang (27)

VALORES DE QUEDA DE PRESSÃO CALCULADAS POR:

- a. Equação (II.13)
- b. Equação (II.17)
- A. Dados deste trabalho
- B. Dados de Shimizu (17)
- C. Dados de Kolpakov (37)

cinco algarismos significativos.

#### V.4. DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES DO COEFICIENTE DE ATRITO DOS SÓLIDOS , $f_s$ , COM A PAREDE.

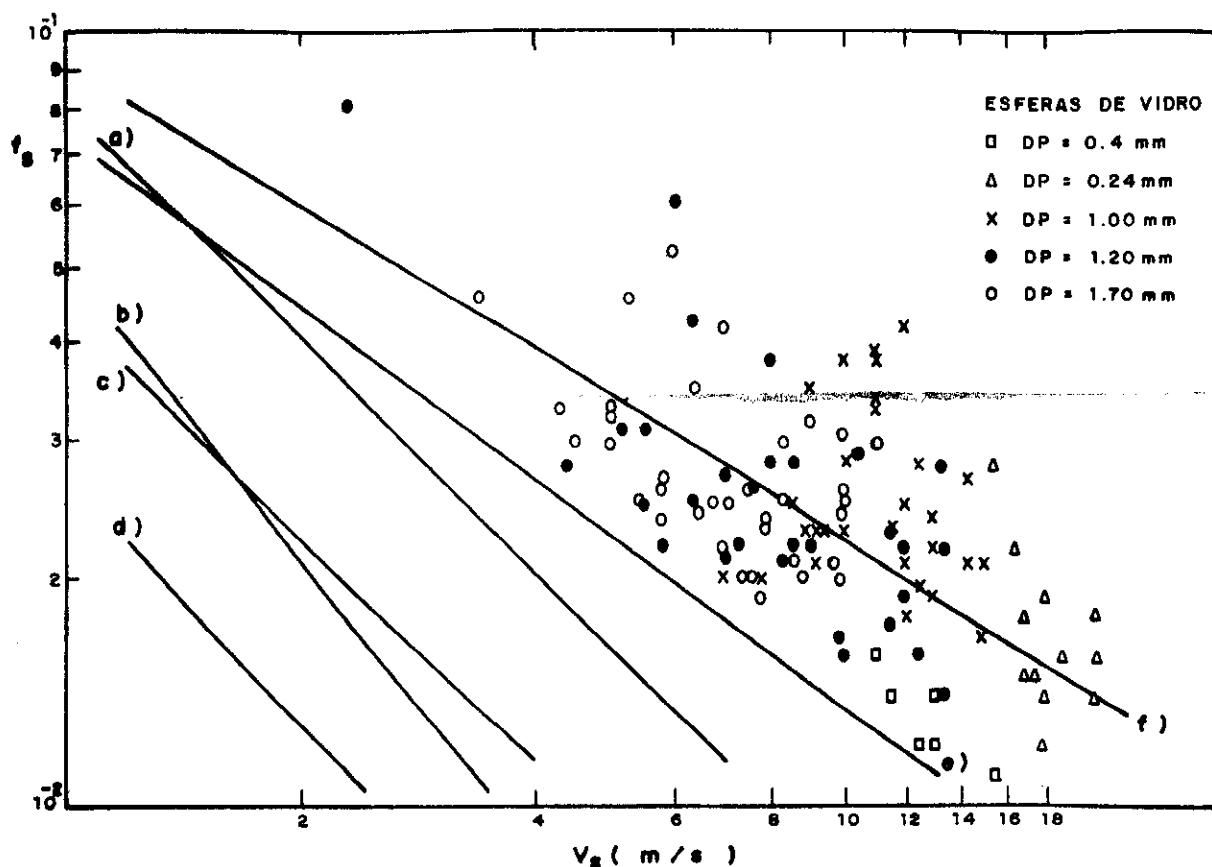
Visando a obtenção dos valores das constantes K e a da correlação proposta por este trabalho.

$$f_s = K \left[ \frac{w_s}{(1-\varepsilon) \rho_s A} \right]^a \quad (\text{III.8}),$$

foram utilizados 173 dados experimentais de  $\Delta P_{st}/L$  pró prios. Através do método dos mínimos quadrados obteve-se K e a , onde a porosidade foi calculada de forma simplificada, de modo a se ter um processo de cálculo da queda de pressão a partir de valores dados das vazões de fluido e sólidos além das características do tubo e propriedades do fluido e das partículas. Com isso, a expressão proposta para  $f_s$  assume a forma adimensionalizada.

$$f_s = 0,080 \left[ \frac{w_s}{\rho_s (1-\varepsilon) A} \right]^{-0,47} \quad (\text{V.1})$$

A figura (V.11) mostra uma análise comparativa da correlação proposta neste estudo com outras existentes na literatura obtidas por diversos autores. Observando-se que mudanças efetuadas nas condições de operações apresentaram comportamento diferente em cada curva.



**FIG.(II-11) CORRELACIONAMENTO DO FATOR DE ATRITO DOS SÓLIDOS NO REGIME ESTABELECIDO**

- a) VAN SWAAY ET AL., b) CAPES - NAKAMURA , c) REDDY E PEI ,
- d) KONNO E SAITO, e) KIMIEC - MIELEZARSKI AND PAJAKOWSKA,
- f) PRESENTE TRABALHO

## CAPÍTULO VI

### ANÁLISE DOS RESULTADOS

## VI.1. INTRODUÇÃO

Com o objetivo de se fazer uma análise envolvendo de forma abrangente os resultados experimentais e calculados, foram traçados gráficos mostrando as dispersões sob forma adimensionalizada e calculados os desvios médios entre estes valores. Para isso foram determinados o valor médio,  $\bar{y}$ , o desvio médio relativo ao calculado, DMR, e o desvio padrão de distribuição deste valor médio, S, para os valores de queda de pressão nos dois regimes distintos e do comprimento de entrada, definido para n pontos experimentais como :

Valor médio

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

onde:

$$y_i = \frac{f_{\text{exp}}}{f_{\text{cal}}}$$

Desvio médio relativo

$$\text{DMR (\%)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\frac{y_{i\text{cal}} - y_{i\text{exp}}}{y_{i\text{cal}}}}{n} \right] \times 100$$

Desvio padrão de distribuição

$$s = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n} \right]^{1/2}$$

Nas tabelas (VI.1) e (VI.2) são apresentados diferentes desvios de queda de pressão no escoamento estabelecido, para dados obtidos neste trabalho e dados de Hariu-molstad (9), respectivamente. Enquanto na tabela (VI.3) constam estes valores apenas para nossos dados obtidos na região de aceleração e ao longo do sistema.

Verifica-se ainda que, tanto para dados próprios quanto para dados da literatura, a dispersão dos valores obtidos pela aplicação do modelo proposto neste trabalho, mantém-se numa faixa de  $\pm 25\%$  a medida que se aumenta a razão entre as quedas de pressões estudadas. Nos casos do modelo de Yang (27) os valores calculados distanciam-se de forma decrescente do experimental, enquanto no modelo simplificado este valores dispersam-se de forma crescente. Com isso pode-se concluir que os dois últimos modelos fornecem bons resultados para valores de queda de pressão baixos, e o modelo deste trabalho mostra-se satisfatório para qualquer valor de queda de pressão.

Os desvios para valores do comprimento de entrada foram calculados em relação ao experimental por quatro modelos diferentes, como listados nas tabelas (VI.4) e (VI.5) com nossos dados e outros existentes na literatura.

TABELA VI.1 : QUEDA DE PRESSÃO NA REGIÃO DE FLUXO ESTABELECIDO PARA DADOS OBTIDOS  
NESTE TRABALHO

REFERÉNCIAS E EQUAÇÕES	MATERIAL (ESPECIFICAÇÃO)	NÚMEROS DE PONTOS ANALISADOS	DESVIO MÉDIO RELATIVO (%)	VALOR MÉDIO DA $f_{exp}/f_{cal}$	DESVIO PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO $f_{exp}/f_{cal}$
ESTE TRABA- LHO (a)	AB	30	10,1	0,97	0,13
	A100	39	18,9	0,85	0,07
FORMA SIM- PLIFICADA (b)	AB	30	30,1	0,69	0,14
	A100	39	78,1	0,57	0,08
YANG (27) (c)	AB	30	10,3	0,96	0,13
	A100	39	24,9	1,13	0,27
KHAN-PEI (1) (*) (a)	AB	30	62,4	2,88	0,77
	A100	39	66,3	3,47	1,24

OBSERVAÇÕES: Cálculo de queda de pressão segundo a eq. (II.16) de LEUNG (21), com valores de  $\epsilon$  e  $v_s$  determinados pelas equações:

(a) (II.18.a,b), (III.1) e (III.2a,b,c)

(b) (II.18.a,b) e (II.19)

(c) (II.18.a,b), (II.23) e (II.24)

(\*) O valor da queda de pressão é calculado pela equação (II.1)

TABELA VI.2 : QUEDA DE PRESSÃO NA REGIÃO DE ESCOAMENTO ESTABELECIDO PARA DADOS DE  
HARIU-MOLSTAD (9)

REFERÊNCIA E EQUAÇÕES	MATERIAL (ESPECIFICAÇÃO)	NÚMEROS DE PONTOS ANALI- SADOS	DESVIO MÉDIO RELATIVO (%)	VALOR MÉDIO DE $f_{exp}/f_{cal.}$	DESVIO PADRÃO DE DISTRIBUI- ÇÃO DE $f_{exp}/f_{cal.}$
ESTE TRABALHO	$S_1$	11	23,6	1,26	0,35
	$S_2$	11	31,9	1,40	0,26
	$S_3$	9	19,1	1,25	0,18
	$S_4$	8	23,9	1,32	0,30
FORMA SIMPLIFICADA	$S_1$	11	31,2	0,95	0,27
	$S_2$	11	31,6	0,98	0,61
	$S_3$	9	25,8	0,90	0,15
	$S_4$	8	49,2	0,42	0,96
YANG (27)	$S_1$	11	50,9	2,13	0,39
	$S_2$	11	51,4	2,02	0,70
	$S_3$	9	64,8	2,87	0,26
	$S_4$	8	53,6	2,34	0,59

TABELA VI.2: QUEDA DE PRESSÃO NA REGIÃO DE ESCOAMENTO ESTABELECIDO PARA DADOS DE HARIU-MOLSTAD (9) - Continuação -

REFERÊNCIA E EQUAÇÕES	MATERIAL (ESPECIFICAÇÃO)	NÚMEROS DE PONTOS ANALISA- DOS	DESVIO MÉDIO RELATIVO (%)	VALOR MÉDIO DE $f_{exp}/f_{cal.}$	DESVIO PADRÃO DE DISTRIBUI- ÇÃO $f_{exp}/f_{cal.}$
KHAN-PEI(1)	$s_1$	11	84,6	9,09	6,43
	$s_2$	11	85,9	6,00	2,66
	$s_3$	9	92,0	13,13	2,96
	$s_4$	8	85,8	11,47	7,48

OBSERVAÇÕES: Cálculo de queda de pressão segundo a equação (II.16) de LEUNG (21), com valores de  $\varepsilon$  e  $v_s$  determinados pelas equações:

- (a) (II.18a,b), (III.1) e (III.2a,b,c)
- (b) (II.18a,b), (II.19)
- (c) (II.18a,b), (II.23) e (II.24)

(\*) O valor da queda de pressão é calculado pela equação (II.1)

$s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$ ,  $s_4$ , especificação B correspondente as apresentadas na Tabela (V.3), respectivamente.

TABELA VI.3 : QUEDA DE PRESSÃO AO LONGO DE TODO SISTEMA E NA REGIÃO DE ACELERAÇÃO PARA DADOS OBTIDOS NESTE TRABALHO

REFERÊNCIA E EQUAÇÕES	MATERIAL (ESPECIFI- CAÇÃO)	REGIÃO DE MEDIDA	NÚMEROS DE PONTOS ANA- LISADOS	DESVIO MÉDIO RELATIVO (%)	VALOR MÉDIO DE $f_{exp}/f_{cal}$	DESVIO PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO $f_{exp}/f_{cal}$
ESTE TRABALHO  (a)	AB	A	21	23,7	1,30	0,29
		B		33,3	1,60	0,86
	AA	A	35	22,8	0,89	0,20
		B		23,1	1,07	0,39
	A100	A	34	26,5	1,45	0,36
		B		24,5	1,34	0,32
	A120	A	39	13,2	0,95	0,14
		B		24,7	1,22	0,36
	A170	A	44	11,9	0,97	0,21
		B		30,8	1,45	0,43
YANG (27)  (b)	AB	A	21	22,7	1,33	0,28
		B		38,5	2,04	1,98
	AA	A	35	13,8	1,22	1,09
		B		29,0	1,08	0,51
	A100	A	34	43,9	1,91	0,46
		B		25,1	1,31	0,45
	A120	A	39	24,5	1,34	0,14
		B		28,9	1,11	0,43
	A170	A	44	30,1	1,39	0,27
		B		22,1	1,29	0,49

OBSERVAÇÕES: Cálculo da queda de pressão segundo equações :

(II.15) e (II.16) de Leung (21) com valores de  $\epsilon$  e  $v_s$  calculados pela solução das equações:

(a) (II.18a,b), (III.1) e (III.2a,b,c)

(b) (II.18a,b), (II.23) e (II.24)

A - Região total de medidas incluindo região de aceleração

B - Região de aceleração

TABELA VI.4 : COMPRIMENTO DE ENTRADA PARA DADOS DESTE TRABALHO

REFERÉNCIAS E EQUAÇÕES	MATERIAL (ESPECIFICAÇÃO)	NÚMEROS DE PONTOS ANALI- SADOS	DESVIO MÉDIO RELATIVO (%)	VALOR MÉDIO DE $f_{exp}/f_{cal.}$	DESVIO PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO $f_{exp}/f_{cal.}$
ESTE TRABALHO (a)	AB	21	75,0	1,73	0,47
	AA	35	44,0	1,44	0,44
	A100	34	36,4	1,34	0,29
	A120	39	59,3	1,59	0,56
	A170	44	83,5	1,82	0,55
YANG (27) (b)	AB	21	265,9	22,90	8,73
	AA	35	71,0	1,59	1,01
	A100	34	25,9	0,92	0,28
	A120	39	28,8	0,90	0,33
	A170	44	29,8	1,20	0,41
SHIMIZU (17) (c)	AB	21	72,9	0,28	0,05
	AA	35	72,5	0,28	0,08
	A100	34	83,3	0,24	0,04
	A120	39	83,6	0,28	0,19
	A170	44	71,1	0,29	0,08

TABELA VI.4 : Continuação

REFERÊNCIAS E EQUAÇÕES	MATERIAL (ESPECIFICAÇÃO)	NÚMERO DE PONTOS ANALI- SADOS	DESVIO MÉDIO RELATIVO (%)	VALOR MÉDIO DE $f_{exp}/f_{cal}$	DESVIO PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO $f_{exp}/f_{cal}$
ROSE-DUCKWORTH (15)	AB	21	72,0	0,23	0,03
	AA	35	79,9	0,20	0,03
	A100	34	76,9	0,23	0,04
	A120	39	84,0	0,25	0,05
	A170	44	73,6	0,34	0,52

OBSERVAÇÕES : Valores de  $\underline{\epsilon}$  e  $v_s$  calculados pela solução da equações:

(a) (II.18a,b) , (III.1) e (III.2a,b,c)

(b) (II.18a,b) , (II.23) e (II.24)

(c) Forma simplificada

E comprimento de entrada determinado pelas equações:

(a) (III.11)

(b) (II.27)

(c) (II.5) e Figura (II.3)

(d) (II.4)

TABELA VI.5 : COMPRIMENTO DE ENTRADA PARA DADOS EXISTENTES NA LITERATURA

REFERÊNCIAS E EQUAÇÕES	MATERIAL (ESPECIFICAÇÃO)	NÚMEROS DE PONTOS ANALI- SADOS	DESVIO MÉDIO RELATIVO (%)	VALOR MÉDIO DE $f_{exp}/f_{cal}$	DESVIO PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO $f_{exp}/f_{cal}$
ESTE TRABALHO (a)	TA	4	584,2	6,50	6,93
	TB	7	83,7	1,59	1,05
YANG (27) (b)	TA	4	-	91,30	-
	TB	7	116,7	0,70	1,01
SHIMIZU (17) (c)	TA	4	0,0	1,00	0,00
	TB	7	86,1	0,19	0,05
ROSE-DUCKWORTH (15) (d)	TA	4	60,7	0,40	0,10
	TB	7	81,0	0,13	0,04

OBSERVAÇÕES: Valores de  $\varepsilon$  e  $v_s$  calculados pela solução das equações:

(a) (II.18a,b), (III.1) e (III.2a,b,c)

(b) (II.18a,b), (II.23) e (II.24)

(c) Forma simplificada

E comprimento de entrada determinado pelas equações:

(a) (III.11)

(b) (II.27)

(c) (II.5) e Figura (II.3)

(d) (II.4)

Material , L(m) ,  $\rho_s$  ( $g/cm^3$ ) , dp (mm) , D (m)

TA: Shimizu (17) , Cobre , 6,2 , 8,96 , 0,1032 , 0,028

TB: Kolpakov (37) , Areia , 2,8 , 2,70 , 0,260 , 0,036

## VI.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### VI.2.1. QUEDA DE PRESSÃO NO REGIME DE ESCOAMENTO ESTALECIDO

Analizando-se os valores apresentados na tabela (VI.1) para dados deste trabalho, pode-se constatar que os resultados de queda de pressão obtidos pela aplicação dos modelos desenvolvidos neste trabalho e por Yang (27) na região de escoamento estabelecido apresentaram desvios menores e aproximados entre si para os dois tipos de partículas testadas. Isso pode ser observado ainda nas figuras (VI. 1) e (VI. 2) cujos pontos foram colocados em gráficos de  $(\frac{\Delta P_o}{\Delta P_f})$  versus  $(\frac{\Delta P_o}{\Delta P_f})$  experimental, apresentando um tipo de dispersão aleatória, onde  $\Delta P_o$  representa a diferença entre a queda de pressão total e queda de pressão devida ao fluido escoando sozinho.

Na tabela (VI.2) e figura (VI.3) apresentam-se os resultados com dados de Hariu-molstad (9) para este estudo, observando-se neste caso que os valores calculados pelos modelos deste trabalho e o simplificado mostraram desvios menores.

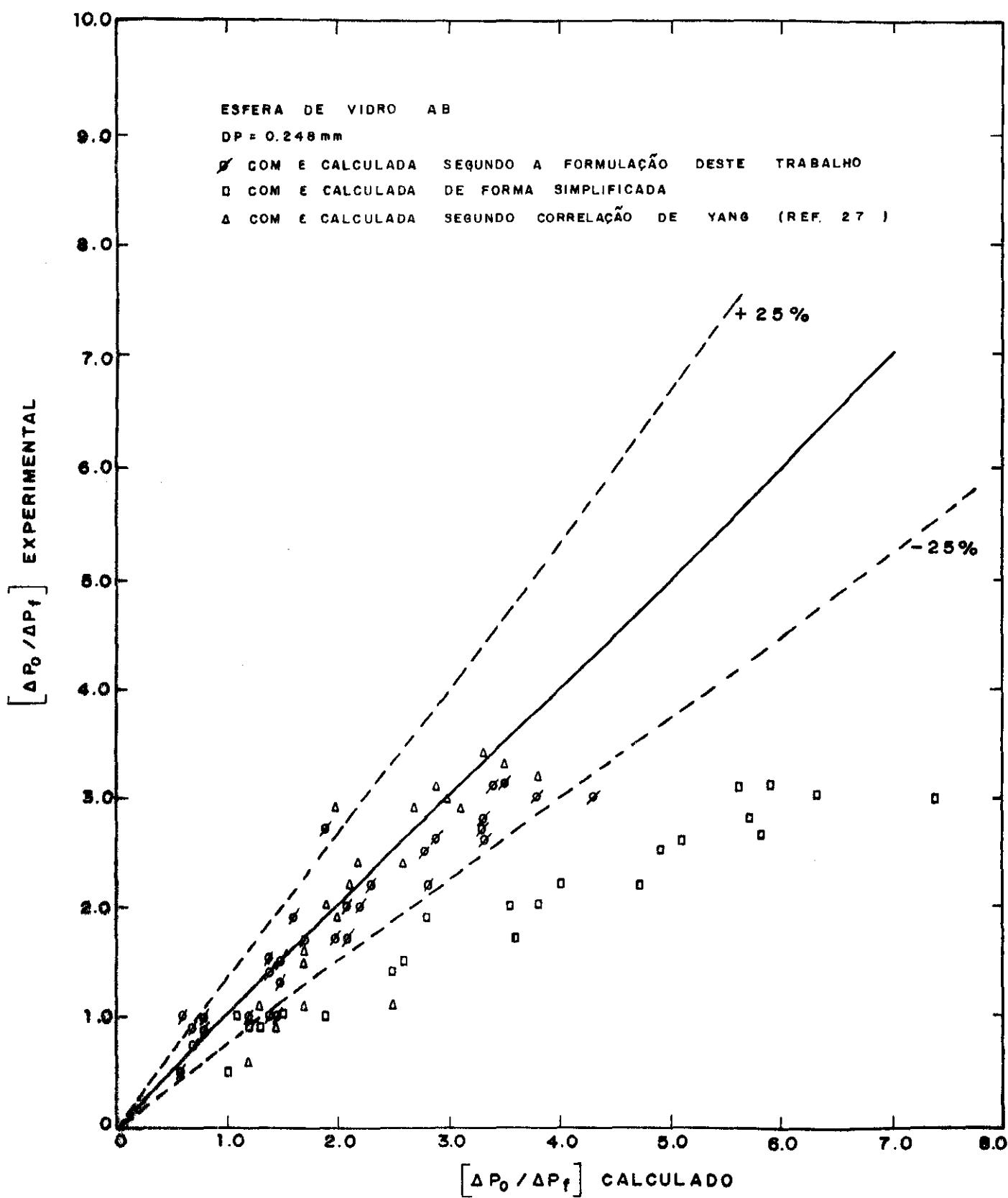


FIG. (II-1) REGIÃO DE FLUXO ESTABELECIDO  
 DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NESTE TRABALHO

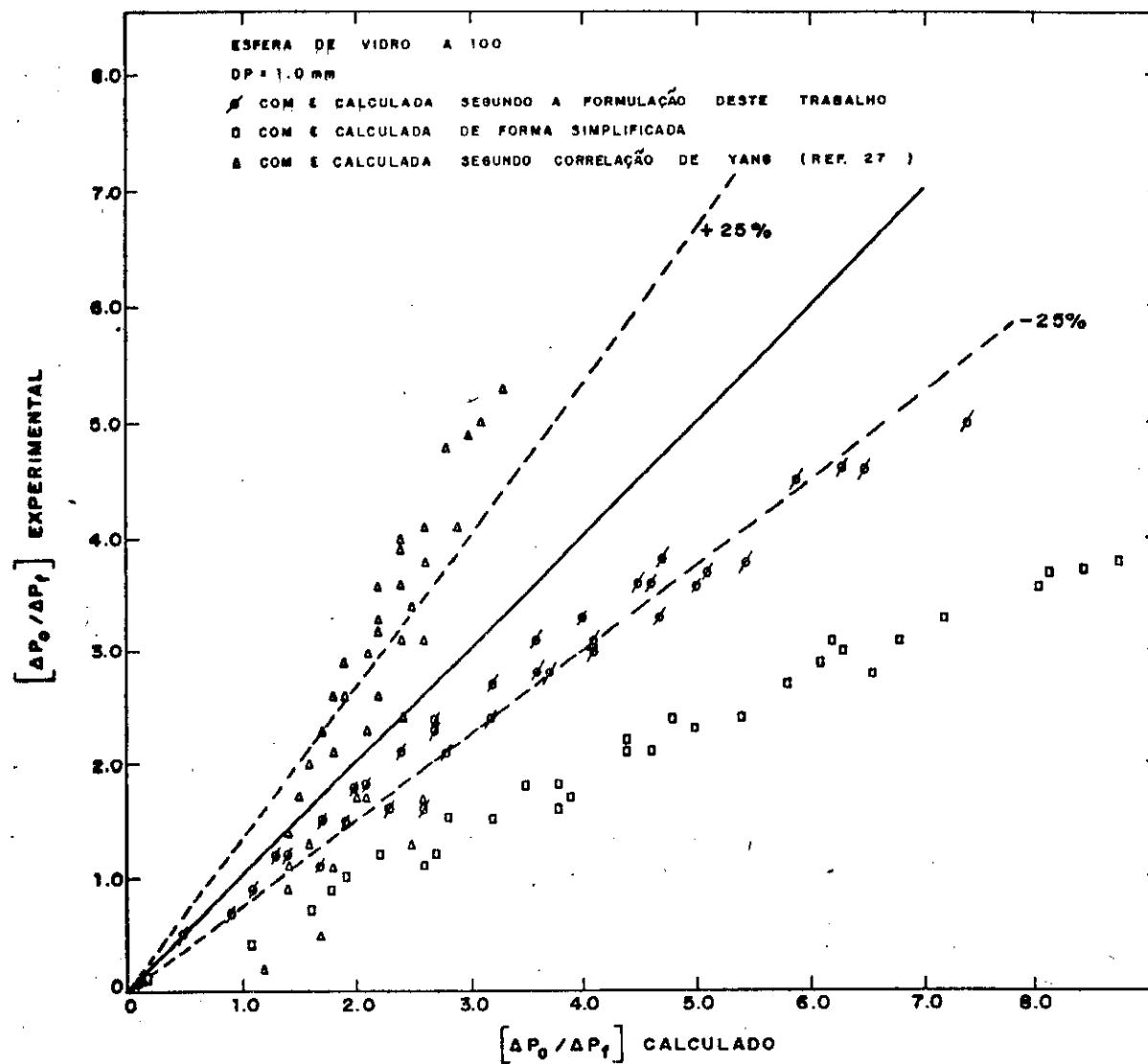


FIG. (VI-2) REGIÃO DE FLUXO ESTABELECIDO  
DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NESTE TRABALHO

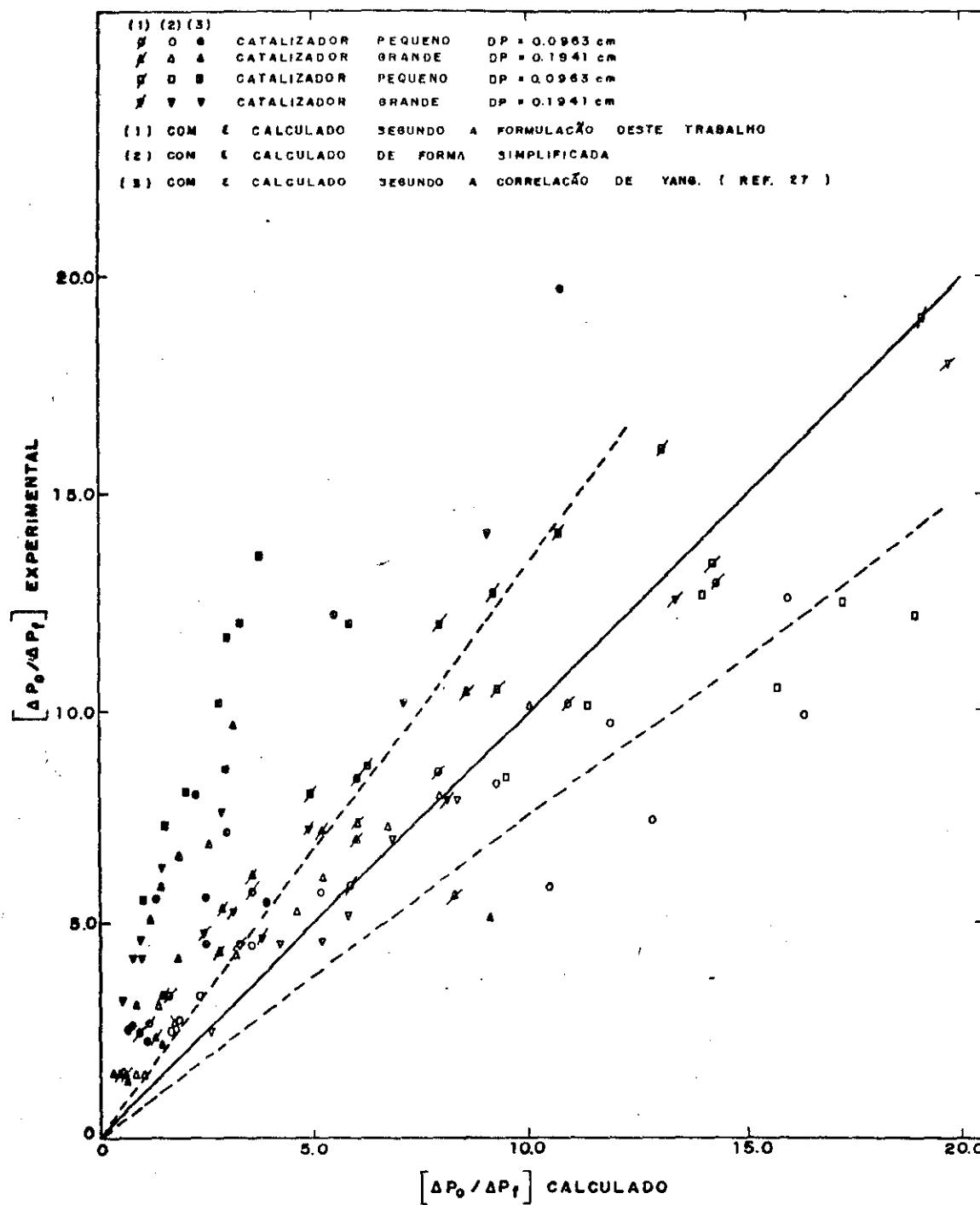


FIG. (III-3) REGIÃO DE FLUXO ESTABELECIDO  
 DADOS EXPERIMENTAIS DE HARIU - MOSLTAD ( REF. 9 )

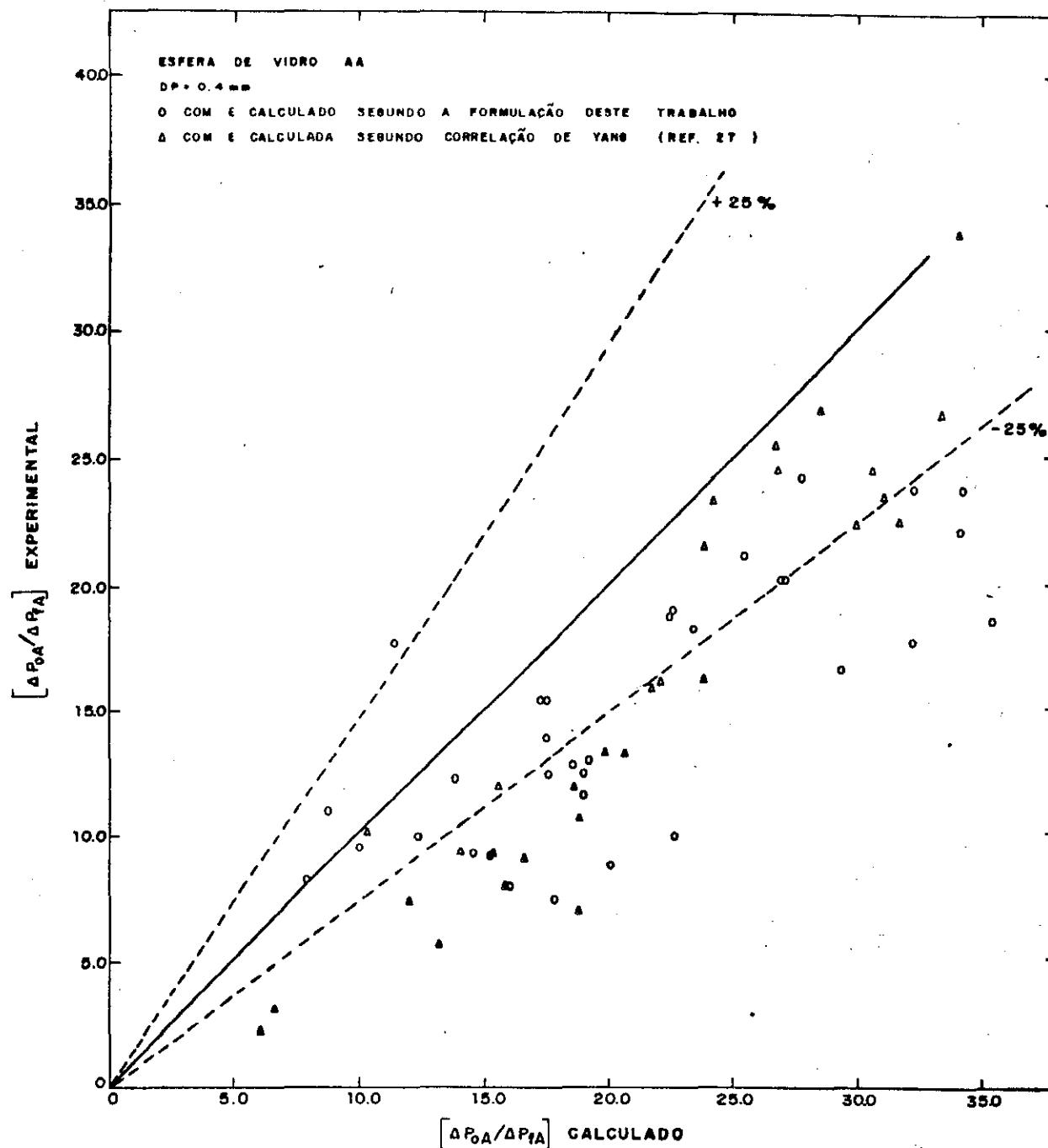


FIG. (VII-4) REGIÃO DE ACELERAÇÃO  
DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NESTE TRABALHO

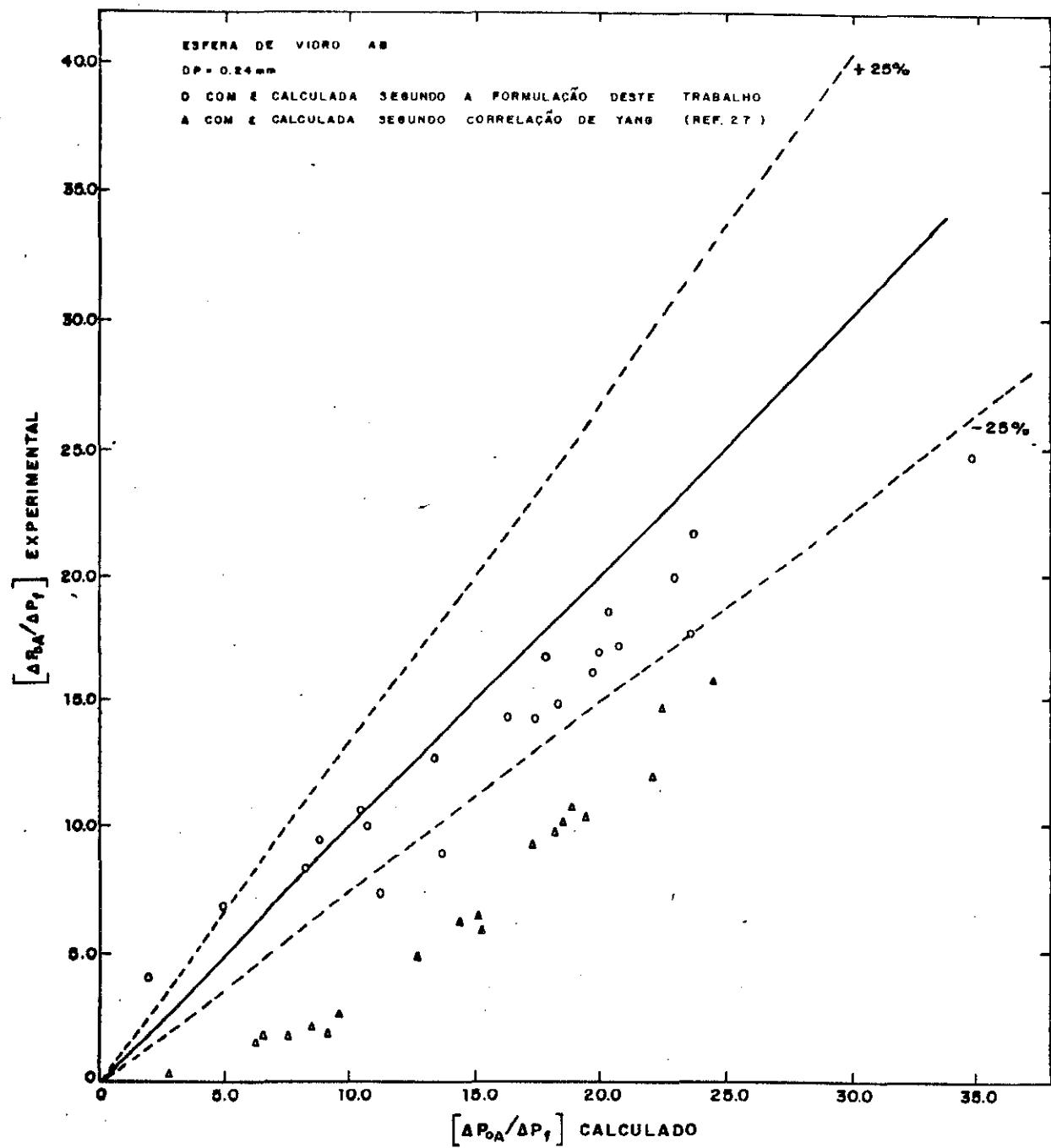


FIG. (III-5) REGIÃO DE ACELERAÇÃO  
DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NESTE TRABALHO

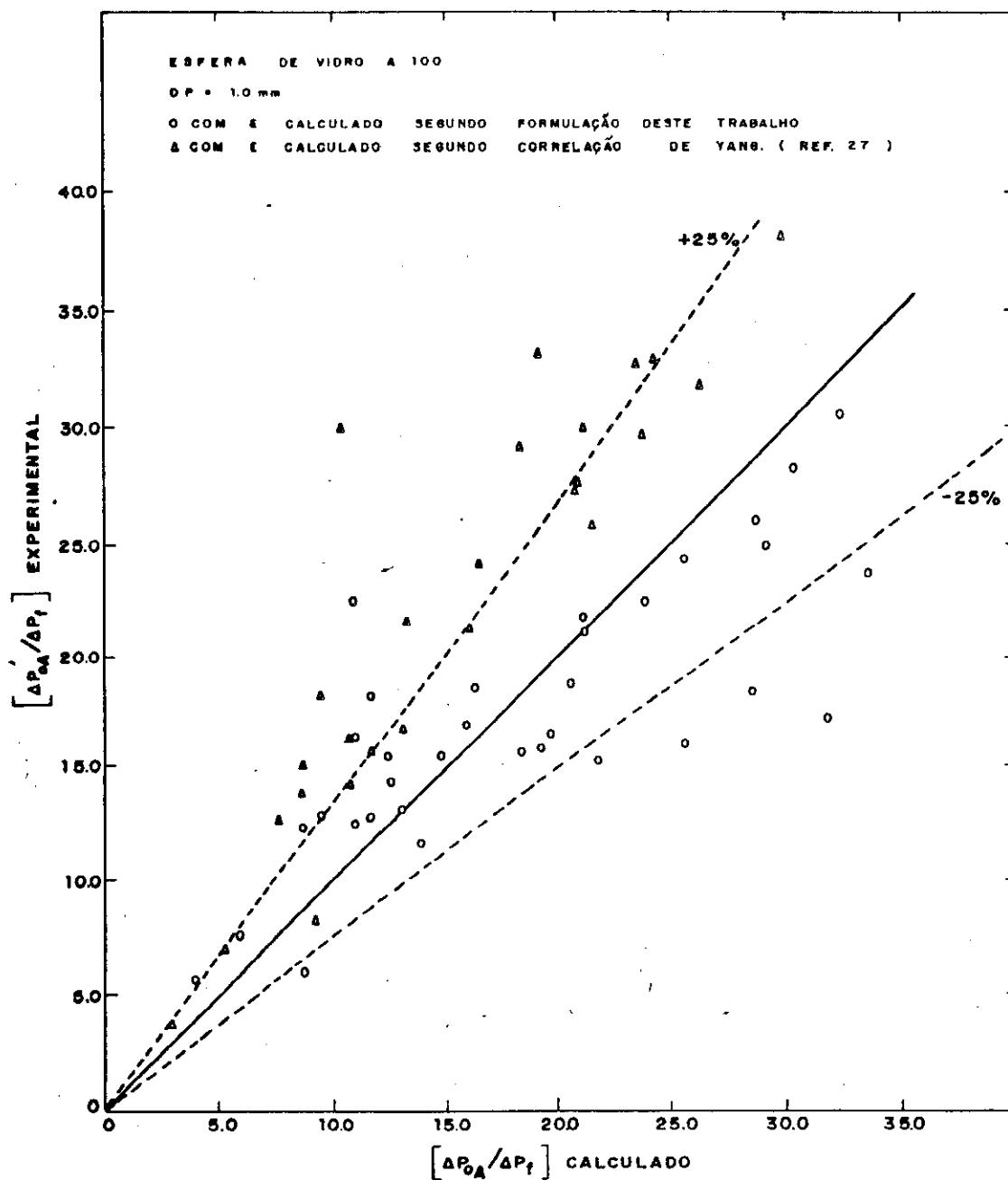


FIG. ( III-6 ) REGIÃO DE ACELERAÇÃO  
DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NESTE TRABALHO

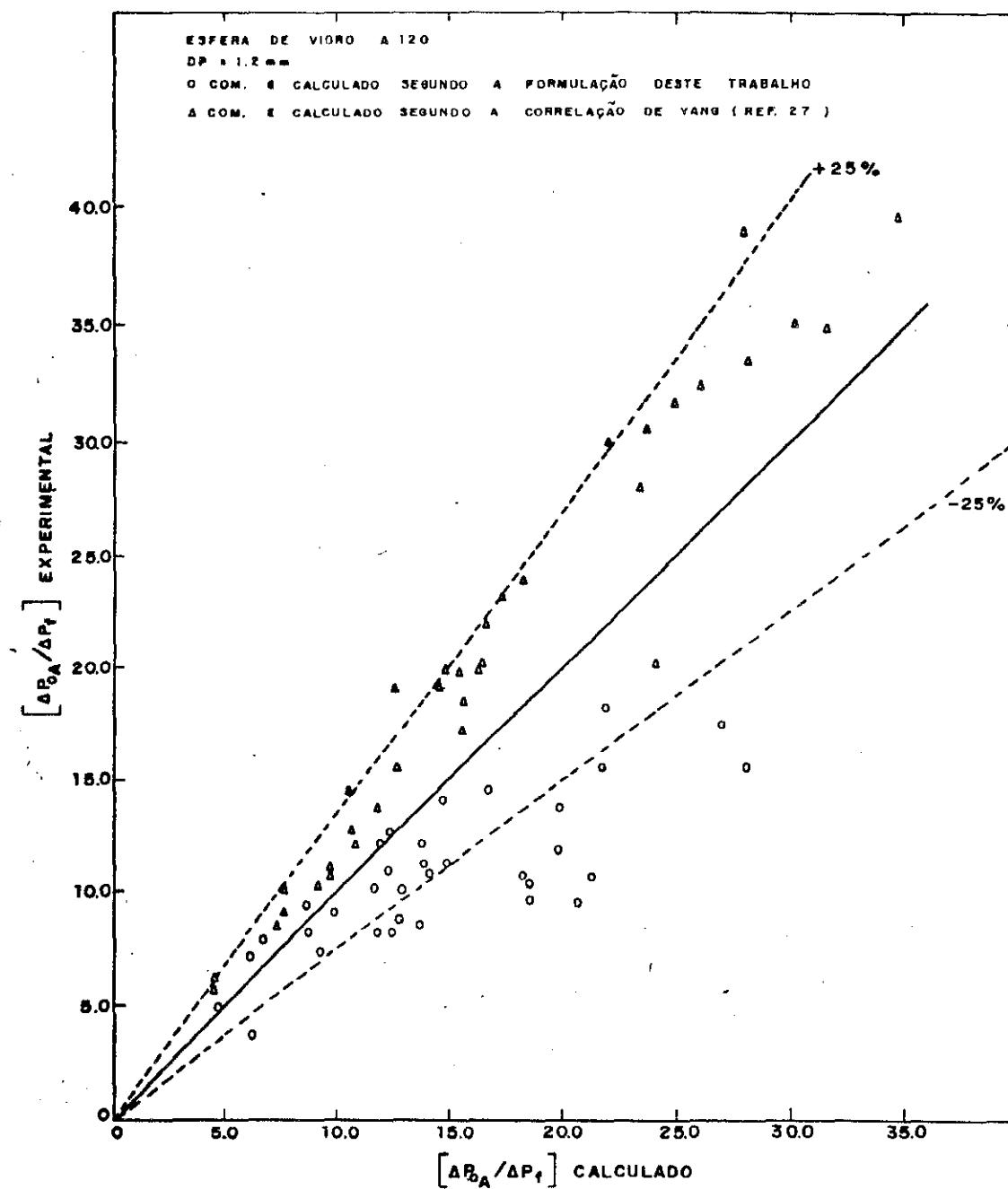


FIG. ( III-7 ) REGIÃO DE ACELERAÇÃO  
DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NESTE TRABALHO

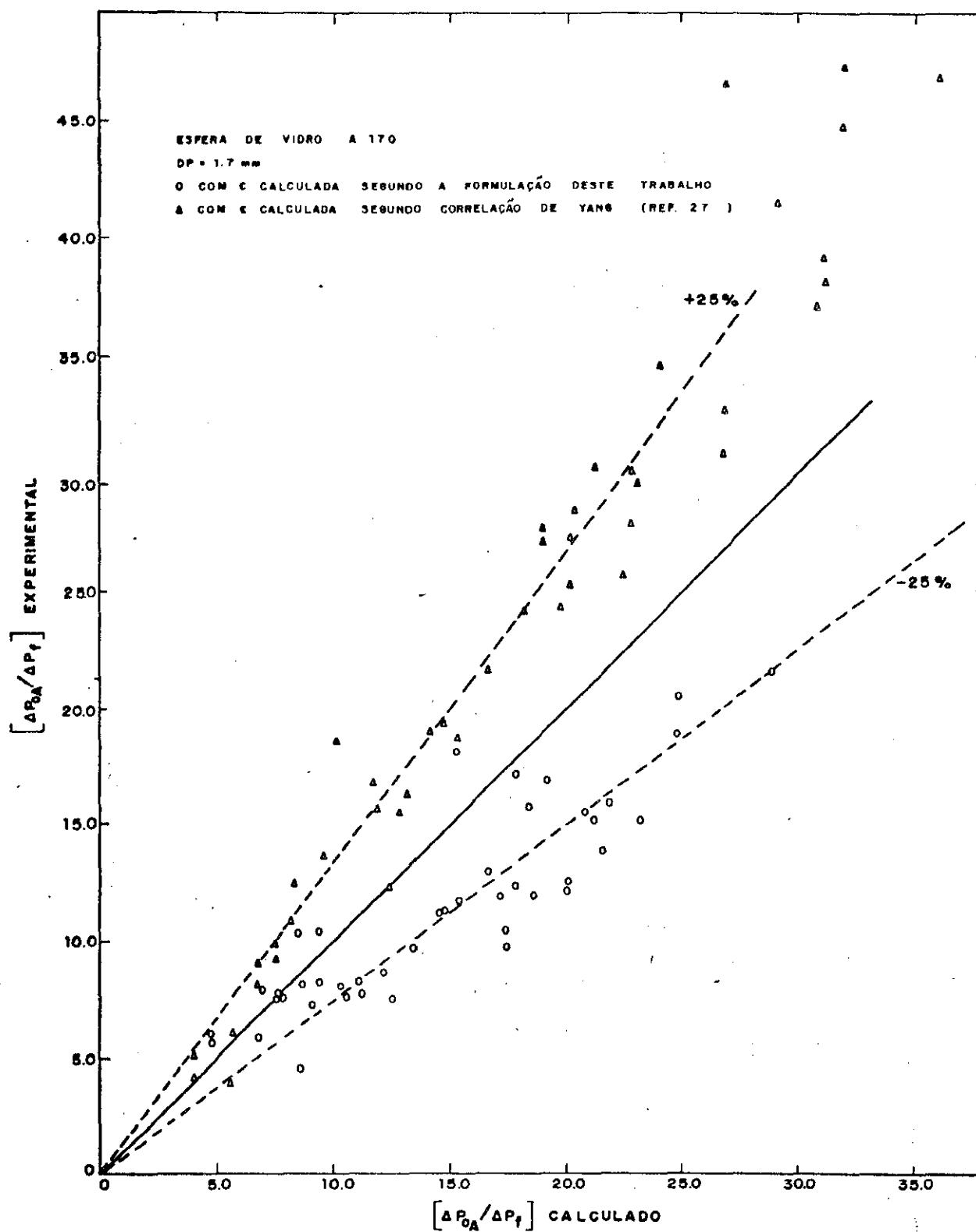


FIG. (VI-8) REGIÃO DE ACELERAÇÃO  
DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NESTE TRABALHO

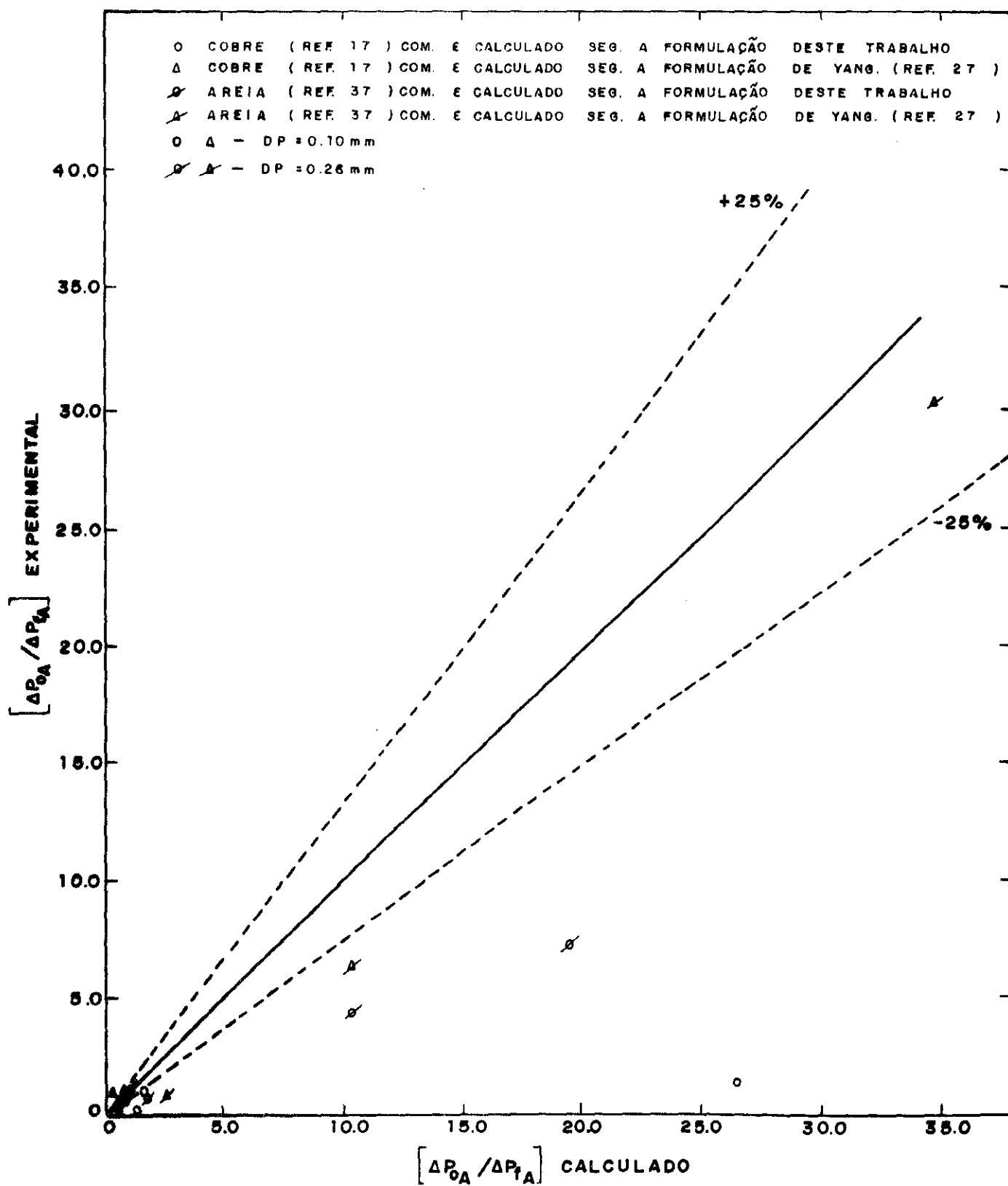


FIG. (VI-9) REGIÃO DE ACELERAÇÃO  
DADOS EXPERIMENTAIS EXISTENTES NA LITERATURA

### VI.2.2. QUEDA DE PRESSÃO NA REGIÃO DE ACELERAÇÃO E AO LONGO DO SISTEMA

Os valores deste parâmetro na região de aceleração e ao longo de todo sistema para partículas testadas neste trabalho, listados na tabela (VI.3) resultaram em menores desvios quando da aplicação do modelo deste trabalho. As figuras (VI.4) a (VI.8) mostram a dispersão destes pontos. Contudo, pode-se observar por esses gráficos que a ordem de grandeza dos desvios não dependem apenas do diâmetro das partículas, sendo necessário se conhecer mais adequadamente outros parâmetros que descrevem a dinâmica do transporte em estudo, tais como: porosidade, velocidade das partículas e fluido, queda de pressão e outros.

A figura (VI.9) corresponde aos valores determinados por Shimizu (17) e Kolpakov (37), contendo um número muito limitado de pontos, varrendo uma faixa de condição de operação muito pequena, com isso não foi possível se fazer um estudo adequado.

### VI.2.3. COMPRIMENTO DE ENTRADA ( $L_a$ )

No confronto entre as várias correlações analisadas na tabela (VI) para valores de comprimento de entrada, observa-se uma melhor concordância entre os valores previstos pela correlação de Yang (27) e os resultados experimentais. Contudo estes resultados não podem ser considerados

confiáveis, pois na determinação deste parâmetro foi necessário adotar-se um valor de restrição para porosidade com a finalidade de evitar a instabilidade da função dada pela equação (II.27), consequentemente o valor da porosidade e as variáveis dependentes da mesma não correspondem ao valor real. Os resultados obtidos pelo modelo desenvolvido neste trabalho mostram-se compatíveis e satisfatórios , permitindo a aplicação segura deste procedimento para o projeto do transporte vertical em uma grande amplitude de faixa de variáveis. Por sua vez, os modelos de Shimizu (17) e Rose Duckworth (15) que se caracterizam pela natureza empírica apresentaram desvios equivalentes, porém seus valores não se mostraram muito satisfatórios, apresentando dispersões muito elevadas em relação aos valores experimentais.

Considerando a grande diversidade nas várias características de construção experimental para dados existentes na literatura, os desvios listados na tabela (VI.5) apresentaram valores bastantes inconsistentes e discrepantes, mostrando que os resultados calculados não correspondem aos valores reais para os quatro tipos de modelos analisados.

Pode-se observar pelos resultados apresentados que o comportamento das variáveis analisadas não depende apenas de um parâmetro ou propriedade da partícula, mas de um conjunto de variáveis características do sistema. Portanto não é lícito afirmar-se que dispersões maiores ou menores são obtidas pela variação dos diâmetros das partículas.

Dispondo destas observações e dos desvios apresentados nas tabelas (VI.1) a (VI.5) e das figuras (VI.1) a (VI.9), constata-se que os cálculos realizados com o modelo desenvolvido por este trabalho utilizando-se a força resistiva,  $m$ , proposta por Massaráhi e Santana (33), forneceram resultados com desvios menores.

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES

## A. CONCLUSÕES

A partir dos resultados experimentais obtidos e das formulações e equações propostas e analisadas nos capítulos precedentes, verificamos que para o escoamento gás-sólido em tubos verticais foi possível propor procedimentos para o cálculo da queda de pressão nas regiões de aceleração e do escoamento estabelecido. Foram também desenvolvidos estudos para a determinação do comprimento de entrada e da porosidade do sistema. Estes procedimentos são resumidos a seguir com alguns comentários referentes a previsões existentes na literatura.

### I. QUEDA DE PRESSÃO NA REGIÃO DE ESCOAMENTO ESTABELECIDO

$$(\Delta P_{TRE})$$

Na previsão da queda de pressão total na região de escoamento estabelecido, obteve-se resultados compatíveis com as melhores previsões da literatura, utilizando-se a expressão:

$$\Delta P_{TRE} = (1-\epsilon) \rho_s g + \frac{2f_s \rho_s (1-\epsilon) v_s^2}{D} + \frac{2f_f \rho u^2}{D}$$

Na expressão acima os valores de  $\epsilon$ ,  $v_s$  e  $u$ , foram calculados pela solução do sistema de equações segundo modelo proposto por este trabalho no capítulo III, sendo  $f_s$  determinado por correlação estabelecida no presente

estudo, apresentando-se sob a forma adimensionalizada:

$$f_s = 0,080 \left[ \frac{\frac{w_s}{(1-\varepsilon)\rho_s A}}{\sqrt{gD}} \right]^{-0,47}$$

A previsão do coeficiente de atrito entre o fluido e a parede do tubo ( $f_f$ ) para uso na expressão acima é obtida facilmente através dos resultados no escoamento monofásico de fluidos em dutos circulares.

Verificou-se também, que as correlações propostas por Yang (27) equações (II.23), (II.24) para o cálculo dos parâmetros envolvidos na determinação da queda de pressão, apresentaram previsões consistentes com os resultados experimentais deste trabalho e com os valores determinados pelo procedimento proposto neste estudo.

## II. COMPRIMENTO DE ENTRADA NA SEÇÃO VERTICAL

Para situações onde ocorrem variações de velocidades dos sólidos e sendo conhecidos os métodos de obtenção da porosidade e velocidades dos constituintes da mistura sólido-gás, pode-se calcular valores de comprimento de entrada  $L_A$ , através de um modelo desenvolvido neste trabalho, cuja equação final é dada por:

$$L_A = \begin{cases} v_{s2} & \frac{v_s dv_s}{(1-\epsilon) \rho_s} \\ & \frac{m}{(1-\epsilon) \rho_s} - g - 2f_s v_s^2 \\ v_{s1} & \end{cases}$$

Neste procedimento, a força de interação gás-sólido  $m$ , foi determinada por correlações propostas por Massarani e Santana (33). Os resultados assim obtidos para  $L_A$  apresentaram-se em relativa concordância com os valores experimentais, apesar de alguns desvios consideráveis. Um procedimento similar foi realizado com a utilização da expressão proposta por Yang (27), apresentada na forma:

$$L_A = \begin{cases} v_{s2} & \frac{v_s dv_s}{(1-\epsilon) \rho_s} \\ & \frac{3}{4} C_{DS} \epsilon^{-4,7} \frac{\rho (u - v_s)^2}{(\rho_s - \rho) d_p} - \frac{2f_s v_s^2}{D} - g \\ v_{s1} & \end{cases}$$

Os resultados encontrados por este último modelo não são confiáveis devido a necessidade de se atribuir restrições para valores de porosidade com a finalidade de evitar a instabilidade da função a ser integrada.

Por outro lado, as correlações empíricas utilizadas para o cálculo de  $L_A$  forneceram resultados com dispersões muito elevadas em relação aos valores experimen-

tais.

### III. QUEDA DE PRESSÃO NA REGIÃO DE ACELERAÇÃO E AO LONGO DO SISTEMA

Com a determinação do comprimento de entrada tornou-se possível prever os valores de queda de pressão nesta região através da equação apresentada de forma integral:

$$\Delta P_{TA} = \int_{v_{s1}}^{v_{s2}} (1-\epsilon) \rho_s v_s dv_s + \int_0^{L_A} (1-\epsilon) \rho_s g dz + \\ + \int_0^{L_A} \frac{2 f_s (1-\epsilon) \rho_s v_s^2}{D} dz + \int_0^{L_A} \frac{2 f_f \epsilon \rho u^2}{D} dz$$

Nesta equação os parametros envolvidos foram calculados através dos vários modelos descritos anteriormente. Os melhores resultados na previsão do  $\Delta P_{TA}$  apresentaram-se quando estes parametros foram determinados segundo os procedimentos delineados no presente estudo.

Os valores da queda de pressão ao longo do sistema, abrangendo as duas regiões de escoamentos da mistura

gás-sólido, foram obtidos pela soma dos valores desta variável para cada região, como segue:

$$\Delta P_T = \Delta P_{TA} + \Delta P_{TRE}$$

Os resultados acima resumidos servem como base para os outros estudos em sistemas particulados, tais como: a transferência de calor no contato gás-sólido e na análise de secadores pneumáticos verticais.

#### B. SUGESTÕES

Para verificação da consistência das equações propostas em faixas mais abrangentes de variáveis, sugerimos estudos a partir de dados obtidos com partículas sólidas com densidades diferentes das utilizadas neste trabalho em sistemas verticais com outros diâmetros e comprimento de tubo, além de obter valores experimentais à concentração mais elevadas.

Necessita-se ainda, conhecer melhor a influência da alimentação dos sólidos sobre a dinâmica do sistema gás-sólido no que se refere à determinação de comprimento de entrada. Para isso sugerimos que o sistema experimental seja dotado de pontos opcionais para a introdução das partículas no escoamento.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Khan, J.I., e Pei, D.C., "Pressure Drop in Vertical Solid-Gas Suspension Flow", Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Develop., vol. 12, n° 4, (1973)
2. Belden, D.H., Kassel, L., Ind. Eng. Chem., vol. 41 pp. 1174, (1949)
3. Boothroud, R.G., Pneumatransport, n° 1, vol.1, (1971)
4. Cramp, W., Priestley, A., Engineer, n° 64, Jan. 18, (1924)
5. Cramp, W., Priestley, A., Engineer, n° 89, Jan. 25, (1924)
6. Jones, H.J., Allendorf, D.H. AIChE J., n° 3, vol. 13,pp. 608 (1967)
7. Farbar L., Ind. Eng. Chem., n° 6, vol.4, pp. 1184, (1949)
8. Ghosh, D.P., Prem Chand, J., Agr. Eng. Res., vol. 13, n° 1, pp. 29, (1968)
9. Hariu, O.H. e Molstad, M.C., "Pressure Drop in Vertical Tubes in Transport of Solids by Gases", Industrial and Engineering Chemistry", vol. 41, n° 6, June, (1949)
10. Metha, N.C., Smith, J.M., Comig, E.W., Ind. Eng. Chem., n° 6, vol. 49, pp. 986, (1957)
11. Razumov, I.M.R., Int. Chem. Eng., n° 4, vol. 2, pp. 539, (1962)
12. Stemerding, S., "The Pneumatic Transport of Cracking Catalyst in Vertical Riser", Chemical Engineering Science, Vol. 17, pp. 599-608, Pergamon. Press Ltd, London, (1962)
13. Voght, E.G., White, R.R., Ind. Eng. Chem., n° 9, vol.40, pp. 1731, (1948)

14. Chandock, S.S., PhD. Thesis, University of Waterloo, (1970)
15. Rose, N.E., e Duckworth, R.A., "Transport of Solid Particules in Liquids and Gases", The Engineer, pp. 392-396, 430 - 483 , Mach, (1969)
16. Hinze, J.O., Appl. Sci. Res., Section A. 11, 33, (1962)
17. Shimizu, A., Echigo, R., Hasegawa, S., e Hishida M., "Experimental Study on the Pressure Drop and the Entry Length of the Gas-Solid Suspension Flow in a Circular Tube", Int. J. Multiphase Flow, vol. 4, pp. 53-64, (1968)
18. Soo, S.L., "Fluid Dynamics of Multiphase Systems", 279 Blaisdell Publishing Co., Waltham, Mass, (1967)
19. Capes, C.E., e Nakamura, K., Can J. Chem. Engineer, vol. 31, pp. 29, (1973)
20. Gidaspow, D., e Solbrig, C.W, "Transient two Phase Flow Models in Energy Production", AIChE 81 st National Meeting April, 11, (1976)
21. Leung, L.S., "The Ups and Downs of Gas-Solid Flow A. Review", Proc. Int. Fluidization Conference, p.25, Plenum Press, (1980)
22. Reddy, K.V.S., e Pei, D.C.T., Ind. Eng. Chem. Fundam., 8 (3), pp. 490, (1969)
23. Van Swaaij, W.P.M., Buurman, C., e Van Breugel, J.W., Chem. Eng. Sci, vol. 25 pp. 490, (1969)
24. Konno, H. e Saito, S., J. Chem. Eng. Japan, vol. 2, pp. 211, (1969)

25. Kmiec, A., Mielczarski, S., e Pajkowska J., "An Experimental Study on Hydrodynamics of a Systems in a Pneumatic Flash Dryer", Powder Technology, vol. 80 pp. 67-74, (1978)
26. Nakamura, K., e Capes, C.E., "Vertical Pneumatic Conveying: An Exp. Study with Particules in the Intermediate and Turbulent Flow Regimes", Can. J. Chem. Eng., vol. 51, pp. 31-38, February, (1973)
27. Yang, W.C., J. Powder Bulk Tecnol.vol.1,pp.89 (1977)
28. Yang, W.C., Int. Powder and Bulk Solids Handling and Proc. Conf. Exposition Chicago, May, 11-14, (1976)
29. Yuan, T., "Solid-Liquid Suspension Flow in Horizontal Pipes", Ph.D Thesis, Syracuse University, January,(1972)
30. Stokes, C.G., Trans. Cambridge Phil. Soc., vol. 9, nº 8 (1850)
31. Schiller, L., Naumann, A., Z. Ver. Deut. Ing., vol. 77 pp. 318, (1933)
32. Wen, C.Y., Yu, Y.H., Chem. Eng. Progr. Symp. Ser. vol. 101, nº 62, (1966)
33. Massarani, G. e Santana, C.C., "Força Resistiva Sólido Fluido em Sistemas Particulados de Porosidade Elevada" Revista Brasileira de Tecnologia, vol. 11, (1980)
34. Massarani, G. e Restini, C.V., "Transporte Vertical de Partículas Sólidas II: Análise Experimental", I Congresso Brasileiro de Eng. Química, São Paulo, (1976)

35. Massarani, C., e d'Avila, J.S., "Transporte Vertical de Partículas Sólidas", Anais do II ENEMP, Rio Claro-SP, (1974)
36. Rocha, S.C.S., "Escoamento Sólido-Fluido em Secção Variável: Medidor Venturi para Misturas Sólido-Fluido", Tese Ms em Eng. Química, UNICAMP/SP, Junho (1983)
37. Kolpakov, V.M., Donat, E.V., "An Investigation of the Pressure Drop in the Acceleration Zone of a Vertical Pipeline for Conveying Solid Particles", Int. Chem. Eng. vol. 10, nº 3, July, (1970)

ANEXO - A

C PROGRAMA DE TRANSPORTES PORESSIMETRICOS - CALCULO DA  
 C QUEDA DE PRESSAO COM VISCOSIDADE REFRIGERADA SEGUNDO AS  
 C CORRELACOES DE FRIEDRICHSON E HAMPTON  
 C PC: PORESSIMETRIA CALCULADA  
 C ATR: COMPRESSIVIMENTO DO TUBO  
 C DP: DIAMETRO DA PARTICULA  
 C D: DIAMETRO DO TUBO  
 C RDS: DENSIDADE DOS SOLIDOS  
 C RDF: DENSIDADE DO FLUIDO  
 C VISE: VISCOSIDADE DO FLUIDO  
 C WS: VAZAO DOS SOLIDOS  
 C WF: VAZAO DO FLUIDO  
 C G: ACCELERACAO DA GRAVIDADE  
 C PRD: POROSIDADE  
 C RE: NÚM. DE REYNOLDS  
 C QPREFX: QUEDA DE PRESSAO EXPERIMENTAL  
 C QPC: QUEDA DE PRESSAO CALCULADA  
 C VF: VELOCIDADE DO FLUIDO COM POROSIDADE CALCULADA  
 C REFX: REYNOLDS DO FLUIDO  
 C FD: COEF. DE ATRITO  
 C QPREF: QUEDA DE PRESSAO DEVIDO AO FLUIDO  
 C FR: FORCA RESTITUTIVA  
 C QPREF1: QUEDA DE PRESSAO EXPERIMENTAL NA ZONA DE ACCELERACAO

DIMENSION IUMR(12)  
 CALL IFILE(22,1M+0)  
 READ(22,10)(IUMR(I),I=1,12)  
 FORMAT(12A5)  
 READ(22,11)D,XB,RDS,DP  
 FORMAT(5G)  
 JY=5  
 AREA = 3.145926\*(D\*\*2)/4.  
 WRITE(JY,20)(IUMR(I),I=1,12)  
 FORMAT(//,,20X,12A5,/) /  
 VISE = 0.0184E-03  
 RDF = 1.185  
 ERFO = 0.  
 ERFO1 = 0.  
 ERA = 0.  
 EMAL = 0.  
 G = 9.81  
 READ(22,12)N  
 FORMAT(G)  
 GAMA = SQRT(1./3.+G\*DP\*\*3.\*RDF\*(RDS-RDF)/VISE\*\*2.)  
 REINF = EXP((-1.38+1.94\*LOG10(GAMA)+8.6E-2\* ALOG10(GAMA)\*\*2.  
 1 +2.5E-2\* ALOG10(GAMA)\*\*3.+9.19E-4\* ALOG10(GAMA)\*\*4.+  
 2.5.35E-4\* ALOG10(GAMA)\*\*5.)\*2.393)  
 UINF = REINF\*VISE/(RDF\*DP)  
 DO 1 I=1,N  
 POR = 0.96  
 READ(22,11)WF,WS,UF,QPREF,L  
 POKO = 1. + WS/(POR\*AREA\*(UINF\*DP))  
 APORO = 1. - POKO  
 VELSS = RS/(RDS\*AREA\*XPOKO)  
 FS = 0.0079/(VELSS\*\*0.473)  
 ES = 0.003  
 APUR = 1.-POR  
 FIA = (1. - XPOKO)\*(1. + (XPOR)\*\*(1./3.))  
 FIA = FIA\*EXP(XPOR)/(0.08\*POR))

```

FIA = FIA/(POR*(DP*DP))
FIA = FIA*VISE
FIB = (44.0*(1.0-POR))/((DP*EXP(1.71*POR)))
FIB = FIB*ROF
FIC = 1.5*XPOP*(POR**1.8)*(VIF*(ROF**4.0)/(DP**6.0))**0.2
VFLF = WF/(ROF*ARCA*PUR)
VELS = WS/(ROS*ARCA*XPOR)
VELR = VELF - VELS
VELR = ABS(VELR)
C1 = FIA*VELR
C2 = FIB*(VELR**2)
C3 = FIC*(VELP**1.8)
C5 = C1+C3
C6 = C2
IF(PUR.GE.1.0) GO TO 100
IF(PUR.LE.0.75) GO TO 110
RFI = VELR*ROF*DP/VISE
IF (RCY.GE.75) GO TO 120
CN = CS
GO TO 130
120
CN = C6
GO TO 130
130
PORC = 1.0 - CN/((ROS*G) + 2.*FS*ROS*(VELS**2)/D)
IF (ABS(POR - PORC).LT.0.00001) GO TO 140
IF (PORC.LT.PDR) GO TO 110
IF (PORC.GT.PDR) GO TO 100
PDR = PUR + 0.000001
GO TO 160
100
POR = PUR - 0.000001
GO TO 160
140
PC = (PORC + POR)/2.
ARITE(JN,93)VFLF,VELS,VELR,UIINF
FORMAT(1X,4G)
VELS = (WS/ROS)/((1.0 - PC)*AR=A)
VF = UF * PC
RFIP = ROF*(VF-VELS)*DP/VISE
RFIP = (VF*D*POR)/VISE
BV = WS/(ROS*VELS*AREA)
FD = 0.3164/(REYF**0.25)
QPRES = 2.*FS*ROS*(1.0-PC)*(VET-S**2)/D
QPREF = (FD*RFIP*(VF**2.0))/(2*D)
FR = (1.0 - PC)*ROS*G
QPRES = QPRES*XL
QPREF = QPREF*XL
FR = FR*XL
CD = (GAMA/REINF)**2.
FF = FD/4.
E = VF**2.0/(G*D)
TETA = WS/VF
C
C          CORRELACAO DE LEUNG-WILES
C
QPRET = FR + QPPEF + QPRES
QPRET = QPRET/2.
QPREF = QPREF/2.
FR = FR/2.
QPRES = QPRES/2.
ERHO = (QPREXL - QPRET)*100./QPREXL
ERTO = ERHO + ABS(ERHO)
C

```

```

C CORRELACAO DE KHAN-PEI
C
C QPRET1 = (1+2.6E*(CD/PF)*(QREF*ZRS)*((DP/0)**2.)*
1 SORT(KEYF/F)*TR/T*)*QPREL
C
C ERRO1 = (QPREXL - QPRET1)*100./QPREXL
40 WRITE(JW,40)QPREL,QPREL,ER,ES
FORMAT(1A,4G,1)
WRITE(JW,60)
60 FORMAT(5X,'QPREXL',9X,'QPRET',12X,'QPRET1',9X,'ERRO',3X,'ERRO1')
WRITE(JW,70)
70 FORMAT(3X,'NEWTON/R2/M1',5X,'NEWTON/R2/M1',5X,'NEWTON/R2/M1',1)
WRITE(JJ,80)QPREL,QPRET,QPRET1,ERR1,ERRO1
FORMAT(2X,F8.2,7X,F8.2,1X,F8.2,7X,F7.2,4X,F7.2,1)
WRITE(JJ,90)PC,RV
FORMAT(4X,'POROSIDADE =',F10.2,5X,'CONC. VOLUMETRICA =',F10.7,1)
ERTO1 = ERT01 + ABS(ERRO1)
EMAX = AMAX1(EMX,ABS(ERRO1))
QPTFC1 = (QPRET1 - QPREF)/QPREF
EMAX1 = AMAX1(FMAX1,ABS(ERRO1))
QPTFF = (QPREXL - QPREF)/QPREF
QPTFC = (QPRET - QPREF)/QPREF
WRITE(JW,200)
200 FORMAT(4X,'QPTFF',9X,'QPTFC',9X,'QPTFC1')1
WRITE(JW,300)QPTFF,QPTFC,QPTFC1
FORMAT(1X,F8.2,5X,F8.2,5X,FS.,1)
WRITE(JJ,90)
FORMAT(1A,00('*'),1)
CONTINUE
1 EME0 = ERT0/N
EME01 = ERT01/N
WRITE(JW,91)EME0,EMX
FORMAT(5X,'ERRO MEDIO =',F8.2,' %',5X,'ERRO MAXIMO =',F8.2,' %')
WRITE(JW,92)EME01,EMX1
FORMAT(5X,'ERRO MEDIO1 =',F8.2,' %',5X,'ERRO MAXIMO1 =',F8.2,' %')
STOP
END

```

```

C
C
C PROGRAMA TRANSPORTE PNEUMATICO - CALCULO DA QUEDA DE
C PRESSAO COM POROSIDADE SIMPLIFICADA SEGUNDO AS
C CORRELACOES DE LEUNG-WILDS E KHAN-PEI
C UNIDADES EXPRESSAS NO SISTEMA MKS
C G : ACCELERACAO DA GRAVIDADE
C VISC : VISCOSIDADE DO FLUIDO
C RHO : DENSIDADE DO FLUIDO
C DT : DIAMETRO DO TUBO
C AL : COMPRIMENTO DO TUBO
C ROS : DENSIDADE DO SOLIDO
C DP : DIAMETRO DA PARTICULA
C WF : VAZAO DO FLUIDO
C WS : VAZAO DO SOLIDO
C UF : VELOCIDADE DO FLUIDO
C QPREX : QUEDA DE PRESSAO, EXPERIMENTAL
C A : AREA
C
C VARIAVEIS CALCULADAS
C
C REINF : REYNOLDS INFINITO
C UINF : VELOCIDADE TERMINAL
C POR : POROSIDADE
C VF : VELOCIDADE DO FLUIDO COM POROSIDADE CALCULADA
C REYF : REYNOLDS DO FLUIDO
C FD : COEFICIENTE DE ATRITO
C QPREF : QUEDA DE PRESSAO DEVIDA AO FLUIDO
C FR : FORCA RESISTIVA
C QPRET : QUEDA DE PRESSAO CALCULADA SEG. LEUNG-WILDS
C QPRET1 : QUEDA DE PRESSAO CALCULADA SEG. KHAN-PEI
C USA : VELOCIDADE DA PARTICULA
C VF : VELOCIDADE DO FLUIDO

```

```

C
C
C CALL IFILE(22,'MEU')
C DIMENSION NOME(12)
C G=9.807
C VISC=0.0184E-3
C RHO=1.185
C ERTO=0.
C ERTO1 = 0.
C READ(22,10) ( NOME(I),I=1,12)
10 FORMAT(12A5)
C READ(22,20)DT,AL,ROS,DP
20 FORMAT(4G)
C READ(22,21)N
21 FORMAT(G)
C WRITE(5,30)(NOME(I),I=1,12)
30 FORMAT(///,3X,12A5,///)
DO 40 I=1,N
40 FORMAT(5G)
C READ(22,23)WF,WS,UF,QPREX,ALA
C A = 3.1416*(DT**2)/4.
C GAMA = SQRT(4./3.*G*DP**3.*RHO*(ROS-RHO)/VISC**2.)
C REINF = EXP((-1.33+1.94* ALOG10(GAMA)+8.6E-2*ALOG10(GAMA)**2.
1 -2.5E-2*ALOG10(GAMA)**3.+9.19E-4*ALOG10(GAMA)**4.+2.535E-4*ALOG10(GAMA)**5.)*2.303)
C UINF = REINF*VISC/(RHO*DP)
C BL = ROS*A*(UINF-UF)
C POR = 1. + WS/BT

```

```

USA = WS/(ROS*A*(1. - POR))
VF = UP*POR
KEYF = VF*DT*RDF/VISF
KEYP = RDF*(VF-USA)*DP/VISF
BV = BS/(ROS*A*DSC)
FD = 10.3164/(KEYF**0.25)
VDRB = ABS(VF-USA)
FS = 0.0679/(USA**0.47)
C FS = 0.003
CPRES = 2*FS*ROS*(1.-POR)*(USA**2)/DT
CPREF = (FD*RDF*(VF**2.))/(2*DT)
FR = (1 - POR)*FD*G
OPREXL = OPREF
WHITE(5,24)UINF,USA,VF,VDRB,FS
FORMAT(5G)
FF = FD/4.
CD = (GAMM/RETREF)**2.
F = VF**2/(G*DT)
ERTA = WS/WF

C CORRELACAO DE LFUNG-WILES -
C
C OPREF = OPREFAL
C OPRES = OPRES*AL
C FR = FR*AL
C OPRES = OPRES/2.
C OPREF = OPREF/2
C FR = FR/2.
C OPRET = FR + OPREF + OPRES
C OPRES = OPRES/2.
C OPREF = OPREF/2
C FR = FR/2.
C ERRO = (OPREXL - OPRET)*100./OPREXL
C ERT0 = ERT01 + ABS(ERRO)

C CORRELACAO DE KHAN-PEI
C
C OPKET1 = (1+2.6E*(CD/FF)*(RDF/ROS)*((DP/DT)**2.)*
1 SORT(KEYF/F)*TETA)*OPREF
C ERT01 = (OPREXL - OPRET1)*100./OPREXL
C ERT01 = ERT01 + ABS(ERT01)
C WRITE(5,40)OPRES,OPKCF,FR
40 FORMAT(1X,3G)
C WRITE(5,50)
50 FORMAT(5X,'OPREXL',9X,'OPRET',12X,'OPRET1',9X,'ERRO1',8X,'ERRO1')
C WRITE(5,60)
60 FORMAT(3X,'NEWTON/M2/R',5X,'NEWTON/12/M',5X,'NEWTON/M2/M',/)
C WRITE(5,70)OPREXL,OPRET,OPRET1,FRRO,ERT01
C FORMAT(2X,F8.2,7X,F8.2,10X,F8.2,7X,F7.2,4X,F7.2,/)
C WRITE(5,110)POR,BV
C FORMAT(5X,'POROSIDADE =',F10.7,5X,'CONC. VOLUMETRICA =',F10.7,/)
C QPTFC = (OPRET - OPREF)/OPREF
C QPTFC1 = (OPRET1 - OPREF)/OPREF
C QPTFE = (OPREXL - OPREF)/OPREF
C WRITE(5,200)
200 FORMAT(4X,'QPTFE',9X,'QPTFC',9X,'QPTFC1',/)
C WRITE(5,300)QPTFE,QPTFC,QPTFC1
300 FORMAT(1X,F8.2,5X,F8.2,5X,F8.2,/)
C WRITE(5,80)
80 FORMAT(1X,b0(''))

```

90 CONTINUE  
CMD0 = ERTO/N  
CMD1 = ERT01/N  
WRITE(5,100)CMD0,CMD1  
100 FORMAT(1X,'FREQ MEDIO =',F8.2,'%',3X,'FREQ MED101 =',F8.2,'%')  
STOP  
END

```

C
C PROGRAMA TRANSPORTE PELUÍSTICO - CÁLCULO DA QUEDA DE
C PRESSÃO COM POROSIDADE SEGUNDO YANG
C UNIDADES EXPRESSAS NO SISTEMA MKS
C
C GR : ACELL. DA GRAVIDADE
C VISC : VISCOSIDADE DO AR
C RHO : DENSIDADE DO AR
C DT : DIÂMETRO DO TUBO
C AL : COMPRIMENTO DO DUTÔ
C RDS : DENSIDADE DO SOLÍDO
C DP : DIÂMETRO DA PARTICULA
C WF : VAZÃO DO FLUIDO
C WS : VAZÃO DOS SOLÍDOS
C UF : VELOCIDADE DO FLUIDO
C WPRES : QUEDA DE PRESSÃO EXPERIMENTAL
C ÁREA : ÁREA
C
C VARIÁVEIS CALCULADAS
C REINF : REYNOLD INFINITO
C UINF : VELOCIDADE TERMINAL
C POR : POROSIDADE
C VF : VELOC. DO FLUIDO COM POR. CALCULADA
C RFIF : REYNOLD DO FLUIDO
C FD : COEF. DE ATRITO
C WPREF : QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO AO FLUIDO
C FR : FORÇA RESISTIVA
C WPRI : QUEDA DE PRESSÃO EXP. NA ZONA DE ACEL.
C W1 : QUEDA DE PRESSÃO NA ZONA DE ACCELERACAO
C WPRET : QUEDA DE PRESSÃO CALCULADA SEG. LEUNG-WILES
C WPRET1 : QUEDA DE PRESSÃO CALCULADA SEG. KHAN-PEI
C WPFXL : QUEDA DE PRESSÃO EXP. / COMPRIMENTO
C
C CALL IFILE (22, 'SEU')
DIMENSION NOME(12)
GR=9.81
VISC=0.0184E-03
RHO=1.185
ERFO=0.
ERF01=0.
EMX=0.
EMX1=0.
FSO=0.019
READ(22,12)(NOME(I),I=1,12)
12 FORMAT(12A5)
READ(22,21)DT,XI,RDS,DP
21 FORMAT(5G)
READ(22,21)N
WRITE(5,13)(NOME(I),I=1,12)
13 FORMAT(///,3X,12A5,///)
POR0 = 0.97
C
TYPE 600
FORMAT(//,7X,'ENTRE COM O VALOR INICIAL DE POROSIDADE')
ACCEPT 21, POR0
DO 1 I=1,N
READ(22,21)WF,WS,UF,WPRES,XLA
ÁREA=3.1416*(DT*DT)/4.
GAMA=SQRT(4./3.*GR*UF**3.*RHO*(RDS-RDF)/VISC**2.)
REINF=EXP((-1.38+1.94*ALUG10(GAMA))-5.6E-02*ALOG10(GAMA)**2.
1 -2.52E-02*ALOG10(GAMA)**3.+0.19E-14*ALUG10(GAMA)**4.+.
2 5.35E-04*ALOG10(GAMA)**5.)*2.303)

```

```

VINF=REINF*VISF/(ROF*IP)
150 APUK = 1. - PORO
A1 = WF/(ROF*AREA)
B = WS/(ROS*AREA)
C = DP*ROF/VISF
ALFA = .0.958
BETA = 0.979
GAM = 3.979
XJ = 0.0032*(C/REINF)**BETA
XA = A1-(A1+B)*PORO
XK = 2*(B**2)/(GR*DT)
G = FS0-XJ*(XPOR**ALFA)*(XA**BETA)/POR0**GAM
XI = ((XPOR**2.1+XK*FS0)
E = XK/(VINF*XPOR*POR0)-(POR0**2.35)*(XI**0.5)/XPOR
AM = (A1*(1.-2.*POR0)-(A1+B)*POR0**2.)/(POR0*XPOR)**2.
AM = XK/VINF
AB = 4.7*(1.+XK*FS0/XPOR**2.)*POR0**3.7+2.*XK*FS0*POR0**4.7/
1.*POR0**3.
AH = AB/2.*SQR((1.*FS0/XPOR**2.)*POR0**4.7)
DFDPO = XM - Xb
DFDFS = -XK*(POR0**2.35)/(2.*XPOR*(XI**0.5))
AN=XJ*(XPOR**ALFA)*(XA**BETA)
AQ=BETA*(XA**-1.)*(A1+B)
AP=ALFA/XPOR
AR=GAM/PORO
DGDP0=XH*(XQ+XP+XR)/(POR0**GAM)
DGDFS = 1.
RJAC = DFDPO*DGFPS - DFDFS*DGP0
F1 = F*DGDP0 - G*DFDFS
F2 = F*DGDPO - G*DFDPO
POR = POR0 - F1/RJAC
FS = FS0 + F2/RJAC
DIF1 = POR - POR0
DIF2 = FS - FS0
IF(ABS(DIF1).LE.0.00001, GO TO 100
POR0 = POR
FS0 = FS
GO TO 150
100 PC = (POR + POR0)/2
VFLF = A1/POR
VELS = B/XPOR
VFLR = VELF - VELS
VELR = ABS(VELR)
RFYP = (VELR*DP)*ROF/VISF
KV = VELF/VINF
WRITE(5,95)VINF,VELE,VELS,VELR,RFYP
FORMAT(1X,5G)
QPREXL = QPREX
BV = WS/(ROS*VELS*AREA)
RFYF = (VELF*DT*RUF)/VISF
FD = 0.3164/(RFYF**0.25)
QPRES = 2.*FS*ROS*(1.-PC)*(VELS**2)/DT
QPREF = (FD*ROF*(VELF**2.))/(2.*DT)
FR = (1 - PC)*ROS*GR
QPRES = QPRES*XL
QPREF = QPREF*XL
FR = FR*XL
VF = UF*PC
CD = (GAM/REINF)**2.
FF = FD/4.

```

```

C
C
C
t = (VFE**2.)/(GPF*DT)
1ETA = WS/NP

CORRELACAO DE LEONG-WILLE
C
C
C
QPRET = FR + QPREF + QPRES
QPRET = QPRET/2.
QPREF = QPREF/2.
QPRES = QPRES/2.
FR = FR/2.
ERRO = (QPREXL - QPRET)*100./QPREXL
ERTO = ERT0 + ABS(ERRO)

CORRELACAO DE KHAN-PEI
C
C
C
QPRET1 = (1. + 2.60*(CD/FF)*(P0F/ROS)*((DP/DT)**2.)*
1 SORT(REYF/F)*TETA)*QPREF
ERRO1 = (QPREXL - QPRET1)*100./QPREXL
WHITE(5,60)
FORMAT(5X,'QPREXL',9X,'QPRET',12X,'QPRET1',9X,'ERRO',8X,'ERRO1')
WHITE(5,70)
FORMAT(3X,'NEWTON/M2/M',9X,'NEWTON/M2/M',5X,'NEWTON/M2/M',/)
WHITE(5,80)QPREXL,QPRET,QPRET1,FRPO,ERRO1
FORMAT(2X,F8.2,7X,F8.2,1X,F8.2,7X,F7.2,4X,F7.2,/)
WHITE(5,99)PC,BV
FORMAT(4X,'POROSIDADE =',F10.6,5X,'CONC. VOLUMETRICA =',F10.7,/)
ERTO1 = ERT0 + ABS(ERRO1)
EMX = AMAX1(EMX,LOG(ERRO))
EMAI = AMAX1(EMX1,ABS(ERRO1))
QPIFE = (QPREXL - QPREF)/QPREF
QPIFC = (QPRET - QPREF)/QPREF
QPIFC1 = (QPRET1 - QPREF)/QPREF
WHITE(5,200)
FORMAT(4X,'QPIFE',9X,'QPIFC',9X,'QPIFC1',)
WHITE(5,300)QPIFE,QPIFC,QPIFC1
FORMAT(1X,F8.2,5X,F8.2,5X,F8.2,/)
WHITE(5,99)
FORMAT(1X,69('*'),/)
CONTINUE
EMED = ERT0/N
EMED1 = ERT01/N
WHITE(5,97)EMED,EMX
FORMAT(5X,'ERRO MEDIO =',F8.2,'%',5X,'ERRO MAXIMO =',F8.2,'%')
WHITE(5,99)EMED1,EMX1
FORMAT(5X,'ERRO MEDIO =',F8.2,'%',5X,'ERRO MAXIMO =',F8.2,'%')
STOP
END

```

C  
C PROGRAMA DE TRANSPORTE PNEUMATICO VERTICAL - CALCULO DA  
C POROSIDADE E DO COMPRIMENTO DE ENTRADA PELA FORCA RESISTIVA  
C MASSARANI E SANTANA

C  
C PARAMETROS LIDOS

C  
C XL: COMPRIMENTO DO TUBO  
C ALA: COMPRIMENTO DE ENTRADA OBTIDO EXPERIMENTALMENTE  
C ALE: COMPRIMENTO DA REGIAO DE FLUXO ESTABELECIDA OBTIDO EXPERI-  
C MENTALMENTE  
C DP: DIAMETRO DA PARTICULA  
C D: DIAMETRO DO TUBO  
C ROS: DENSIDADE DA PARTICULA  
C ROF: DENSIDADE DO FLUIDO  
C VISF: VISCOSIDADE DO FLUIDO  
C WS: VAZAO DAS PARTICULAS  
C WF: VAZAO DO GAS  
C G: ACCELERACAO DA GRAVIDADE  
C QPREX: QUEDA DE PRESSAO EXPERIMENTAL NA REGIAO DE ACCELERACAO  
C QPREXE: QUEDA DE PRESSAO EXPERIMENTAL NA REGIAO DE FLUXO  
C ESTABELECIDA  
C UF: VELOCIDADE DO FLUIDO

C  
C VARIAVEIS CALCULADAS

C  
C REYF: REYNOLD DO FLUIDO  
C REIP: NUM. DE REYNOLD DA PARTICULA  
C UINF: VELOCIDADE TERMINAL DA PARTICULA  
C POKO: POROSIDADE SIMPLIFICADA  
C FS: FATOR DE ATRITO PROPOSTO POR ESTE TRABALHO  
C VFLP: VELOCIDADE DO FLUIDO COM POROSIDADE CALCULADA  
C VELS: VELOCIDADE DA PARTICULA COM POROSIDADE CALCULADA  
C VELSO: VELOCIDADE INICIAL DA PARTICULA  
C VFLP: VELOCIDADE RELATIVA  
C PC: POROSIDADE CALCULADA  
C REM: NUM. DE REYNOLDS MODIFICADO SEGUNDO SHIMIZU  
C LAKD: COMPRIMENTO DE ENTRADA SEGUNDO ROSE-DUCKWORTH  
C BV: CONCENTRACAO VOLUMETRICA  
C FD: COEF. DE ATRITO  
C CD: COEF. DE ARRASTE  
C ALA: COMPRIMENTO DE ENTRADA CALCULADO SEGUNDO ESTE TRABALHO  
C QPREXT: QUEDA DE PRESSAO TOTAL EXPERIMENTAL  
C QPREST: QUEDA DE PRESSAO PARTICULA-TUBO  
C QPREF: QUEDA DE PRESSAO GAS-TUBO  
C FR: QUEDA DE PRESSAO DEVIDO AO ARRASTE DAS PARTICULAS  
C QPREAC: QUEDA DE PRESSAO DEVIDO A ACCELERACAO DAS PARTICULAS

C  
C DIMENSION NOME(12)

```
CALL IFILE(22,'MEUT')
COMMON/A1/WF,WS,ROF,ROS,VISF,ARFA,DP,G,PC,FS,D,REM
READ(22,10)(NOME(I),I=1,12)
FORMAT(12A5)
READ(22,11)D,XL,ROS,DP
FORMAT(9G)
AREA = 3.145926*(D*D)/4.
WRITE(5,20)(NOME(I),I=1,12)
FORMAT(///,20X,12A5,///)
ERIO = 0.
```

```

ERTOE = 0.
ERTOT = 0.
EMX2 = 0.
EMX3 = 0.
ERTO1 = 0.
EMX1 = 0.
eMA = 0.
G = 9.81
READ(22,12)N
12 FORMAT(G)
DO 1 I=1,N
POR = 0.99
READ(22,11)WF,WS,OPREXE,UF,OPREXF,ATA,XLE,VISF,ROF
GAMA = SQRT(4./3.*G*DP**3.*ROF*(ROS-ROF)/VISF**2.)
REINF = EXP((-1.33+1.94*ALOG10(GAMA))-8.6E-2*ALOG10(GAMA)**2.
1 -2.5E-2*ALOG10(GAMA)**3.+9.19E-4*ALOG10(GAMA)**4.+.
2 5.35E-4*ALOG10(GAMA)**5.)*2.303)
UINF = REINF*VISF/(ROF*DP)
POR0 = 1. + WS/(ROS*AREA*(UINF-UF))
XPOR0 = 1. - POR
VELSS = WS/(ROS*AREA*XPOR0)
FS = 0.0673/(VELSS**(+0.47))
150 XPOR = 1.-POR
FIA = (18.*XPOR)*(1.+(XPOR)**(1./3.))
FIA = FIA*EXP(XPOR/(0.6*POR))
FIA = FIA/(POR*(DP*DP))-.
FIA = FIA*VISF
FIB = (44.*((1.-POR))/(DP*EXP(4.74*PUR)))
FIB = FIB*ROF
FIC = 1.5*XPOR*(POR**1.8)*(VISF*(ROF**4.)/(DP**6.))**0.2
VELF = WF/(ROF*AREA*POR)
VELS = WS/(ROS*AREA*XPOR)
VELR = VELF - VELS
VELR = ABS(VELR)
C1 = FIA*VELR
C2 = FIB*(VELR**2)
C3 = FIC*(VELR**1.8)
C5 = C1+C3
C6 = C2
IF(POR.GE.1.0) GO TO 100
IF(POR.LE.0.75) GO TO 110
REY = VELR*ROF*DP/VISF
IF (REY.GE.75) GO TO 120
CN = C5
GO TO 130
120 CN = C6
GO TO 130
130 PORC = 1. - CN/((ROS*G) + 2.*FS*ROS*(VELS**2)/D)
IF (ABS(PUR - PORC).LT.0.00001) GO TO 140
IF (PORC.LT.PUR) GO TO 110
IF (PORC.GT.PUR) GO TO 100
110 POR = POR + 0.000001
GO TO 160
100 POR = POR - 0.000001
GO TO 160
140 PC = (PORC + PUR)/2.
REM = (1. + WS/*F)*ROF*VELF*D/VISF
LARD = 6.*D*((WS/(ROF*(G**0.5)*(D**2.5)))*(D/DP)**0.5)*((ROS/
1 ROF)**0.5)**(1./3.)
WHITE(5,141)REM

```

```

141   FORMAT(1X,F10.2)
      WRITE(5,142)LARD
142   FORMAT(1X,G)
      VELS = (WS/ROS)/((1. - PC)*AREA)
      VELSO = (WS/ROS)/(0.5*AREA)
      WRITE (5,96)
96    FORMAT(5X,'VELF',7X,'VELS',6X,'VELR',6X,'UINF',5X,'VELSO')
      WRITE(5,93)
93    FORMAT(6X,'M/S',4(7X,'M/S'),/)
      WRITE (5,94)VELF,VELS,VELR,UINF,VELSO
94    '4T(5X,F5.2,4(6X,F5.2),/
           WF/(RDF*AREA*PC)
           = WS/(ROS*VELS*AREA)
      REYF = (VE*D*RDF)/VISF
      FD = 0.3164/(REYF**0.25)
      REYP = RDF*VELS*DP/VISF
      CD = (GAMA/REINF)**2
      FF = FD/4.
      AF = VF**2/(G*D)
      TETA = (WS/ROS)/(WF/RDF)

C   CALCULO DO COMPRIMENTO DE ENTRADA
C
      DESVIO = 1E-1
      XH = DESVIO
      CALL RUNGE (XH,VELSO,0.,VELS,YF,DY)
      XLA = YF

C   CALCULO DA QUEDA DE PRESSAO AO LONGO DO SISTEMA.
C
      QPREXT = QPREXE + QPREX
      QPREST = 2.*FS*ROS*(VELS**2)*(1.-PC)/D
      QPREF = (FD*RDF*(VF**2))/(2.*D)
      FR = (1.-PC)*ROS*G
      QPREAC = ROS*(1.-PC)*(VELS**2)/XLA

C   CALCULO DA QUEDA DE PRESSAO POR LEUNG-WILES
C
      QUEDADEPRESSAO NA REGIAO DE ACELERACAO
C
      QPRET = ROS*(1. - PC)*(VELS**2)/XLA + QPREF + FR + QPREST
      QPRET = QPRET*XLA

C   QUEDA DE PRESSAO NA REGIAO DE FLUXO ESTABELECIDO
C
      QPRETE = QPREF + FR + QPREST
      QPRETE = QPRETE*(2.38 - XLA)

C   QUEDA DE PRESSAO TOTAL
C
      QPRETT = QPRETE + QPRET

C   CALCULO DA QUEDA DE PRESSAO POR KHAN-PEI
C
      QPRET1 = 0.1+2.66*(CD/FF)*(RDF/ROS)*((DP/D)**2)*SQRT(REYF/AF)
      7*TETA)*QPRET*(2.38-XLA)

C   QFA = QPREF/XLA
      QFAC = QPREF/XLA
      QFE = QPREF/XDE

```

```

91  FORMAT(5X,'ERRO MÉDIO = ',F8.1,' %',5X,'ERRO MÁXIMO = ',F8.1,' %')
  WRITE(5,82)EMDF,EMX2
82  FORMAT(5X,'ER. MÉDIO L = ',F8.1,' %',5X,'ER. MÁXIMO E = ',F8.1,' %')
  WRITE(5,84)EMDT,EMX3
84  FORMAT(5X,'ER. MÉDIO TOTAL = ',F8.1,' %',5X,'ER. MÁXIMO TOTAL = '
1 ,F8.1,' %')
  WRITE(5,92)EMDT,EMX1
92  FORMAT(5X,'ERRO MÉDIO1 = ',F8.2,' %',5X,'ERRO MÁXIMO1 = ',F8.2,' %')
  STOP
END

C
C          CALCULO DO COMPRIMENTO DE ENTRADA
C
FUNCTION FUN(VEL,Y)
COMMON/A1/NE,WS,R0F,RUS,VISF,AREA,DP,G,PC,FS,D,REM
COMMON/A3/AM,AN,PO,DPC,CVM,DPE
PO = 1. - WS/(RUS*AREA*VEL)
XPO = 1. - PO
U = VEL*(R0F*AREA*PO)
VELR = ABS(U-VEL)
RFIP = VELR*R0F*DP/VISF
AN = RUS*XPO*G + 2.*FS*VEL**2*XPO*R0S/D
AM1 = (18.*VISF*XPO*(1.+(XPO**(.1/3.)))*EXP(XPO/(0.6*PO))*_
8 *(U - VEL))/(PO*DPE**2)
AM2 = (44.*XPO*R0F*(U-VEL)**2)/(DP*EXP(4.74*PO))
AM3 = 1.5*XPO*(PO**1.8)*((VISF*R0F/(DP**6))**0.2)*(VELR**1.8)
IF(PO.GE.0.75) GO TO 7
AM = AM1 + AM2
GO TO 8
7   IF (REXP.GE.70.) GO TO 9
AM = AM1 + AM3
GO TO 8
9   AM = AM2
8   FUN = XPO*R0S*VFL/(AM-AN)
RETURN
END

C
C          SUBROTINA DE INTEGRACAO PELO METODO DE RUNGE-KUTTA
C          DE QUARTA ORDEM
C
SUBROUTINE RUNGF(H,XI,YI,XF,YF,DY)
COMMON/A3/AM,AN,PO,DPC,CVM,DPE
REAL K1,K2,K3,K4
X=XI
Y=YI
5   DY = FUN(X,Y)
K1=H*FUN(X,Y)
X1=X+0.5*H
Y1=Y+0.5*K1
K2=H*FUN(X1,Y1)
X2=X+0.5*H
Y2=Y+0.5*K2
K3=4*FUN(X2,Y2)
X3=X+H
Y3=Y+K3
K4=H*FUN(X3,Y3)
X = X + H
IF (X.GE.XF) GO TO 10
Y=Y+(K1+2.*K2+2.*K3+K4)/6.
GO TO 5
202

```

```

QFEC = QPREF/(2.38)
QFTT = QPREF/2.38
ERRO = (QPRDX - QPRET)*100./QPREX
ERROE = (QPREXE - QPRELT)*100./QPREXE
ERTOF = ERTOF + ABS(ERROE)
EMX2 = AMAX2(EMX2,ABS(ERPO))
ERROT = (QPREXT - QPRELT)*100./QPREXT
ERTOT = ERTOT + ABS(ERROT)
EMX3 = AMAX3(EMX3,ABS(ERROT))
EMX = AMAX1(EMX,ABS(ERRO))
ERRO1 = (QPRDX - QPRET1)*100./QPREX
EMX1 = AMAX1(EMX1,ABS(ERRO1))
ERTO = ERTO + ABS(ERRO)
ERTO1 = ERTO1 + ABS(ERRO1)
QPTAFC = (QPRFT - QFA)/QFAC
QPTFC1 = (QPRFT1 - QFEC)/QFEC
QPTAFC = (QPREX - QFAC)/QFAC
QPTFE = (QPREXF - QFE)/QFE
QPTFFC = (QPRFTF - QFEC)/QFEC
QPTTFF = (QPREXT - QFTT)/QFTT
QPTTFC = (QPRFTT - QFTT)/QFTT
*WRITE(5,97)
97 FORMAT(5X,'QPREST',9X,'QPREF',9X,'FR',9X,'QPREAC')
*WRITE(5,99)
99 FORMAT(3X,'NEWTON/M2/M',5X,'NEWTON/M2/M',6X,'NEWTON/M2/M',5X,
1 'NEWTON/M2/M',/)
*WRITE(5,98)QPREST,QPRLF,FR,QPREAC
98 FORMAT(2X,F8.2,3(7X,F8.2),/)
*WRITE(5,98)
98 FORMAT(5X,'QPREX',9X,'QPREXE',9X,'QPREXT')
*WRITE(5,997)
997 FORMAT(3X,'NEWTON/M2',2(7X,'NEWTON/M2'),/)
*WRITE(5,998)QPREX,QPREXE,QPREXT
998 FORMAT(5X,F8.2,2(9X,F8.2),/)
*WRITE(5,60)
60 FORMAT(5X,'QPRET',9X,'QPRETE',9X,'QPRETT',8X,'QPRET1')
*WRITE(5,99)
99 FORMAT(5X,QPRET,QPRETE,QPRETT,QPRET1
FORMAT(5X,F8.2,4(6X,F8.2),/)
1.5,180)PC,RV
1.0*AT(4X,'POROSIDADE =',F10.7,5X,'CONC. VOLUMETRICA =',F10.7,/)
*WRITE(5,200)
FORMAT(5X,'QPTAFC',4X,'QPTAFC1',4X,'QPTFC1',4X,'QPTFE',4X,'QPTFF
1 C',4X,'QPTTFC',4X,'QPTTFF')
*WRITE(5,300)QPTAFC,QPTAFC1,QPTFE,QPTFFC,QPTTFC,QPTTFF
300 FORMAT(1X,F8.2,6(4X,F5.2),/)
*WRITE(5,75)
75 FORMAT(7X,'ERRO',5X,'ERROE',5X,'ERROT',5X,'ERRO1')
*WRITE(5,76)ERRO,ERROE,ERROT,ERRO1
76 FORMAT(4(5X,F5.1),/)
*WRITE(5,190)XLA
190 FORMAT(5X,'COMPRIMENTO DE ENTRADA =',F8.4,'M')
*WHITE(5,90)
90 FORMAT(1X,70('*'),/)
1 CONTINUE
EMED = ERTO/N
EMEDE = ERTOE/N
EMEDT = ERTOT/N
EMEDI = ERTO1/N
*WRITE(5,91)EMED,EMX

```

10

FFXY  
RE1UPN  
END

**PROGRAMA DE TRANSPORTE PNEUMATICO VERTICAL - CALCULO DA  
POROSIDADE E DO COMPRIMENTO DE ENTRADA PELA CORPELACAO DE  
YANG**

## PARAMETROS LIDOS

**CC** AD: COMPRIMENTO DO TUBO  
**CC** ALA: COMPRIMENTO DE ENTRADA OBTIDO EXPERIMENTALMENTE  
**CC** ALE: COMPRIMENTO DA REGIAO DE FLUXO ESTABELECIDA OBTIDO EXPERI-  
**CC** MENTALMENTE  
**CC** DP: DIAMETRO DA PARTICULA  
**CC** D: DIAMETRO DO TUBO  
**CC** RDS: DENSIDADE DA PARTICULA  
**CC** RUF: DENSIDADE DO FLUIDO  
**CC** VISF: VISCOSIDADE DO FLUIDO  
**CC** WS: VAZAO DAS PARTICULAS  
**CC** WF: VAZAO DO GAS  
**CC** G: ACCELERACAO DA GRAVIDADE  
**CC** UPREX: QUEDA DE PRESSAO EXPERIMENTAL NA REGIAO DE ACCELERACAO  
**CC** UPREXE: QUEDA DE PRESSAO EXPERIMENTAL NA REGIAO DE FLUXO  
**CC** ESTABELECIDA  
**CC** UF: VELOCIDADE DO FLUIDO

### VARIÁVEIS CALCULADAS

**REYF:** REYNOLD DO FLUIDO  
**REYP:** NUM. DE REYNOLD DA PARTICULA  
**VINF:** VELOCIDADE TERMINAL DA PARTICULA  
**POROS:** POROSIDADE SIMPLIFICADA  
**FS:** FATOR DE ATRITO PROPOSTO POR YANG  
**VELF:** VELOCIDADE DO FLUIDO COM POROSIDADE CALCULADA  
**VFLS:** VELOCIDADE DA PARTICULA COM POROSIDADE CALCULADA  
**VELSO:** VELOCIDADE INICIAL DA PARTICULA  
**VELR:** VELOCIDADE RELATIVA  
**PC:** POROSIDADE CALCULADA  
**RHM:** NUM. DE REYNOLDS MODIFICADO SEGUNDO SHIMIZU  
**BV:** CONCENTRACAO VOLUMETRICA  
**FU:** COEF. DE ATRITO  
**CD:** COEF. DE ARRASTE  
**ALA:** COMPRIMENTO DE ENTRADA CALCULADO SEGUNDO ESTE TRABALHO  
**QPREXT:** QUEDA DE PRESSAO TOTAL EXPERIMENTAL  
**QPREST:** QUEDA DE PRESSAO PARTICULA-TUBO  
**QPREF:** QUEDA DE PRESSAO GAS-TUBO  
**PH:** QUEDA DE PRESSAO DEVIDO AO ARRASTE DAS PARTICULAS  
**QPREAC:** QUEDA DE PRESSAO DEVIDO A ACELERACAO DAS PARTICULAS

```

      DIMENSION NMFC(12)
      CALL IFILE(22,'MEUT')
      COMMON/LYROS,POF,JS,WF,A1,B,AREA,VISF,UINF,REINF,D,DP,G,PC
      READ(22,10)(NMFC(I),I=1,12)
10    FORMAT(12A5)
      READ(22,11)D,XL,ROS,DP
11    FORMAT(9G)
      AREA = 3.145926*(D*D)/4.
      WRITE(5,20)(NMFC(I),I=1,12)
20    FORMAT('///,20X,12A9,///')
      ERT0 = 0.
      ERT0E = 0.
      ERT0T = 0.

```

```

EMAX = 0.
EMAX = 0.
ER101 = 0.
EMAT = 0.
EMAT = 10.
G = 9.81
PEAD(22,120)
12
FORMAT(G)
DO 1 I=1,11
DxD(ZZ,11)WF,WS,OPREXE,DF,OPPREX,ALR,ALR,VISF,ROF
GAMA = LOGT(4./3.*G*DPI**3.*PDP*(ROS-ROF)/VTSF**2.)
REINF = EXP((-1.33+1.94*ALOG10(GAMA)-8.6E-2*ALOG10(GAMA)**2.+
1.-2.5E-2*ALOG10(GAMA)**3.+9.19E-4*ALOG10(GAMA)**4.+
2.5.35E-4*ALOG10(GAMA)**5.)*2.313)
UINF = RDI*F*VISF/(ROF*DPI)
A1 = WF/(ROF*ARFA)
B = WS/(ROS*ARFA)
A0 = 0.5
B0 = 0.99999999
TYPE 250,RAIZ,CODIGO
CALL ZERO(A0,B0,RAIZ,VAFUN,CODIGO)
250
FORMAT(1X,'RAIZ = CODIGO = ',2G)
IF(CODIGO.GT.0.) TYPE 101
101
FORMAT(1X,'NAO EXISTE RAIZ ENTRE A0 E B0')
IF (CODIGO.GT.0.) STOP
E = RAIZ
PC = E
XPDR = 1. - E
VLF = A1/E
VELSO = (WS/ROS)/(0.5*AREA)
VELS = B/XPDR
VELR = ABS(VLF - VELSO)
REYP = (VELR*DPI)*ROF/VISF
RV = VLF/UINF
CDS = 24./REYP + 3.6/(REYP**0.313)
FS = 0.00315*(1.-E)/(E**3)
FS = FS*((REYP/((1.-E)*R_INF))**0.979)
FP = 1.*FS
RHM = (1.+4*G/WF)*ROF*VLF*D/VTSF
WHITE(5,9)
FORMAT(5X,'VLF',7X,'VELS',6X,'VELR',6X,'UINF',5X,'VELSO')
WHITE(5,93)
FORMAT(6X,'M/S',4(7X,'M/S'),/)
WRITE(5,94)VLF,VELS,VELR,UINF,VELSO
94
FORMAT(5X,FS.,2,4(6X,FS.,2),/)
VF = WF/(ROF*ARFA*PC)
BV = WS/(ROS*VELS*AREA)
REYF = (VF*D*ROF)/VISF
FD = 0.3164/(REYF**0.25)
REYP = ROF*VELS*Dp/VISF
CD = (GAMA/REINF)**2
FF = FD/4.
AF = VF**2/(G*D)
TETA = (WS/ROS)/(WF/ROF)

C
C          CALCULO DO COMPRIMENTO DE ENTRADA
C
DESVIO = 1E-1
AH = DESVIO
CALL RUNGE(XH,VELSO,0.,VELS,YF,DY)

```

ALA = YE

CALCULO DA QUEDA DE PRESSAO AO LONGO DO SISTEMA

$$\begin{aligned} QPREXT &= QPREXE + QPPEX \\ QPREST &= 2. * FS * FDS * (VELS**2) * (1. - PC) / D \\ QPREF &= (FD * RDP * (VE**2)) / (2. * D) \\ FR &= (1. - PC) * RDS * G \\ QPRFAC &= FDS * (1. - PC) * (VELS**2) / XLA \end{aligned}$$

CALCULO DA QUEDA DE PRESSAO POR LEUNG-WILES

QUEDA DE PRESSAO NA REGIAO DE ACELERACAO

$$\begin{aligned} QPRET &= RDS * (1. - PC) * (VELS**2) / XLA + QPREF + FR + QPREST \\ QPRET &= QPRET * XLA \end{aligned}$$

QUEDA DE PRESSAO NA REGIAO DE FLUXO ESTABELECIDO

$$\begin{aligned} QPRETE &= QPREF + FR + QPREST \\ QPRETE &= QPRETE * (2.38 - XLA) \end{aligned}$$

QUEDA DE PRESSAO TOTAL

$$QPRETT = QPRETE + QPRET$$

CALCULO DA QUEDA DE PRESSAO POR KHAN-PEI

$$QPRET1 = (1 + 2.66 * (CD / FF) * (RDF / RDS) * ((DP / D)**2) * SQRT(REFY / AF) * TETA) * QPREF * (2.38 - XLA)$$

$$\begin{aligned} QPA &= QPREF / ALA \\ QPAC &= QPREF / XLA \\ QPE &= QPREF / XLE \\ QPEC &= QPREF / (2.38 - XLA) \\ QFTT &= QPREF / 2.38 \\ ERHO &= (QPREX - QPRET) * 100. / QPREX \\ ERHOE &= (QPREXE - QPRETE) * 100. / QPREXE \\ ERIGE &= ERTUE + ABS(ERHUE) \\ EMX2 &= AMAX2(EMX2, ABS(ERHOE)) \\ ERROT &= (QPREXT - QPRETT) * 100. / QPREXT \\ ERTOT &= ERTOT + ABS(ERROT) \\ EMX3 &= AMAX3(EMX3, ABS(ERTOT)) \\ EMX &= AMAX1(EMX1, ABS(ERRO1)) \\ ERRO1 &= (QPREX - QPRET1) * 100. / QPREX \\ EMX1 &= AMAX1(EMX1, ABS(ERRO1)) \\ ERTO &= ERTOT + ABS(ERRO1) \\ ERTOT1 &= ERTOT + ABS(ERRO1) \\ QPIAPC &= (QPRET + QPA) / QPA \\ QPIFC1 &= (QPRET1 + QPEC) / QPEC \\ QPIAPD &= (QPREX - QPE) / QPAG \\ QPIEFD &= (QPREXE - QPE) / QFE \\ QPIEFC &= (QPRETF - QPEC) / QPEC \\ QPIITFE &= (QPREXT - QPTF) / QPTF \\ QPIITFC &= (QPRETT - QPREF) / QPREF \\ WRITE(5, 97) \\ 97 &FORMAT(5X, 'QPREST1', 9X, 'QPREF1', 9X, 'FR1', 9X, 'QPRFAC') \\ WRITE(5, 99) \\ 99 &FORMAT(3X, 'NEWTON/HZ', 5X, 'NEWTON/M2', 6X, 'NEWTON/M2', 5X, 'NEWTON/ \\ 1 M2', 1) \end{aligned}$$

```

      *WRIT(S,98)OPRELT,OPRLE,F0,OPREAC
98   FORMAT(2X,F8.2,3(7X,F8.2),/)
      *WRIT(S,984)
      FORMAT(5X,'OPREX1',9X,'OPREXE1',9X,'OPREXT1')
      *WRIT(S,997)
      FORMAT(3X,'NEWTON/21',2(7X,'NEWTON/121'),/)
      *WRIT(S,938)OPRFK,OPRLXL,OPREXT
938  FORMAT(5X,F8.2,2(7X,F8.2),/)
      *WRIT(S,60)
      FORMAT(5X,'OPRET1',9X,'OPRETE1',9X,'OPRET11',8X,'OPRET1')
      *WRIT(S,99)
      *WRIT(S,98),OPRFT,OPRLTE,OPRETT,OPRET1
99   FORMAT(5X,F8.2,4(5X,F8.2),/)
      *WRIT(S,100)PC,PK
100  FORMAT(4X,'POROSIDADE =',F10.7,SX,'CONC. VOLUMETRICA =',F10.7,/)
      *WRIT(S,200)
200  FORMAT(4X,'OPTAFC1',4X,'OPTAFC',4X,'OPTFC1',4X,'OPTFEF',4X,'OPTFF
1-E',4X,'OPTTFC',1X,'OPTTFF')
      *WRIT(S,300)OPTAFC,OPTAFC,OPTFC1,OPTFEF,OPTFC,OPTTFC,OPTTFF
300  FORMAT(1X,F8.2,6(4X,F5.2),/)
      *WRIT(S,75)
75   FORMAT(7X,'ERRD0',SX,'ERRDE',5X,'ERRDT',5X,'ERRD1')
      *WRIT(S,76)ERRD0,ERRDE,ERRDT,ERRD1
76   FORMAT(1(5X,F5.1),/)
      *WRIT(S,100)XLA
100  FORMAT(SX,'COMPRIMENTO DE ENTRADA =',F8.4,'M')
      *WRIT(S,99)
99   FORMAT(1X,79('*'),/)
1   CONTINUE
EMED = ERT0/N
EMEDE = ERT0E/N
EMEDT = ERT0T/N
EMED1 = ERT01/N
      *WRIT(S,91)EMED,EMX
91   FORMAT(SX,'ERRO MEDIO =',F8.1,' %',SX,'ERRO MAXIMO =',F8.1,' %')
      *WRIT(S,82)EMED0F,EMX2
82   FORMAT(SX,'ER. MEDIO E =',F8.1,' %',SX,'ER. MAXIMO E =',F8.1,' %')
      *WRIT(S,83)EMED0T,EMX3
83   FORMAT(SX,'ER. MEDIO TOTAL =',F8.1,' %',SX,'ER. MAXIMO TOTAL ='
1 ,F8.1,' %')
      *WRIT(S,92)EMED1,EMX1
92   FORMAT(SX,'ERRD MEDIO1 =',F8.2,' %',SX,'ERRO MAXIMO1 =',F8.2,' %')
STOP
END

```

### C C CALCULO DA FUNCAO

```

FUNCTION FUN(VEL,Y)
COMMON/A/ROS,POF,WS,WF,A1,B,AREA,VISF,UINF,REINF,D,DP,G,PC
COMMON/A4/AM,AN,PU,DPC,DPE
PO = 1. - B/VEL
I = WS/WF
U = WF/(ROF*AREA*PO)
DPE = PC - PO
APU = 1. - PO
REIP = ROF*(U-VEL)*DP/VISF
CDS1 = 24./REIP + 3.0/(REIP**0.313)
FS1 = 0.0032*(XPO/(PO**3))*((REIP/(REINF*XPO))**0.979)
FP1 = 4*FS1
AM = (3./4.)*CDS1/(PO**0.7)*ROF*((U-VEL)**2)/((ROS-ROF)*DP)

```

```

      AN = (FPI*(VEL**2)/(2.*D) +G)
      FUN = VEL/(AN - H)
      RETURN
      END

C
C      SUBROTINA DE INTEGRACAO PELO METODO DE RUNGE - KUTTA
C      DE QUARTA ORDEM
C
C      SUBROUTINE RUNGE(XI,YI,XF,YF,DY)
COMMON/A4/AN,AN,PU,DPC,DPE
READ K1,K2,K3,K4
X = XI
Y = YI
DY = FUN(X,Y)
IF(DPE.LE.3.5E-4) GO TO 10
K1 = H*FUN(X,Y)
X1 = X+0.5*H
Y1 = Y+0.5*K1
K2 = H*FUN(X1,Y1)
X2 = X+0.5*H
Y2 = Y+0.5*K2
K3 = H*FUN(X2,Y2)
X3 = X+H
Y3 = Y+K3
K4 = H*FUN(X3,Y3)
X = X + H
IF(X.GE.XF) GO TO 10
Y = Y+(K1+2.*K2+2.*K3+K4)/6.
GO TO 5
10   YF = Y
      RETURN
      END
      FUNCTION FUNCAO(E)
C
C      CALCULO DA FUNCAO DE YANG PARA DETERMINACAO DA POROSIDADE
C
COMMON/A/RUS,POF,RS,WF,A1,B,AREA,VISF,UINF,REINF,D,DP,G,PC
UP = B/(1. - E)
UF = A1/E
REP = RUF*(UF-UP)*DP/VISF
FP = 0.0126*(1.-E)/(E**3)
FP = FP*((REP/((1.-E)*REINF))**0.979)
F1 = SQR((1.+(FP*(UP**2))/(2.*G*D))*E**4.7)
FUNCAO = UP - UF + UINF*F1
VTF1 = UF + UINF*F1
      RETURN
      END.

      SUBROUTINE ZERO ( A , B , RAIZ , VAFUN , CODIGO )
C
COMMON/SZERO/XRAIZ,ITESTE
C
      ERRO = 1.00E-07
FA = FUNCAO(A)
CALL TESTE(A)
IF(ITESTE.EQ.1) GO TO 70
FB = FUNCAO(B)
CALL TESTE(B)
IF(ITESTE.EQ.1) GO TO 70

```

```

10 IF((FA*FB).LE.0.0) GO TO 20
TYPE 10
FORMAT(//,5X,'PONTOS INICIAIS DAO FA*FB > 0')
CÓDIGO = 1.0
RETURN
20 C=(A+B)/2.0
FX=FUNCAO(A)
CALL TESTE(A)
IF(ITESTE.EQ.1) GO TO 70
FC=FUNCAO(C)
CALL TESTE(C)
IF(ITESTE.EQ.1) GO TO 70
IF((FA*FC).LE.0.0) GO TO 50
FB=FUNCAO(B)
CALL TESTE(B)
IF(ITESTE.EQ.1) GO TO 70
IF((FB*FC).LE.0.0) GO TO 40
TYPE 30
FORMAT(//,5X,'PONTOS DAO AMBOS OS PRODUTOS POSITIVOS')
CÓDIGO = 2.0
RETURN
40 IF(ABS(C-B).LT.ERR0) GO TO 60
A=C
GO TO 20
50 IF(ABS(C-A).LT.ERR0) GO TO 60
B=C
GO TO 20
60 RAIZ = C
70 IF(ITESTE.NE.1) GO TO 80
RAIZ=XRAIZ
80 VAFUN = FUNCAO(RAIZ)
CÓDIGO = 0.0
C
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE TESTE(X)
C
COMMON/SZERO/XRAIZ,ITESTE
C
FX=FUNCAO(X)
IF(FX.NE.0.0) GO TO 10
XRAIZ=X
ITESTE=1
GO TO 20
10 ITESTE=0
RETURN
END

```

ERRATA

<u>Página</u>	<u>Linha</u>	<u>Onde se lê</u>	<u>Leia-se</u>
v	1 <sup>a</sup>	work experimental	experimental work
	2 <sup>a</sup>	about the	on
	3 <sup>a</sup>	and of	and
8	18 <sup>a</sup>	sólido-gás	sólido-fluido
10	9 <sup>a</sup>	de conservação	de conservação e de
			movimento para os
			constituintes da
			mistura
15	4 <sup>a</sup>	do fluxo	da mistura
19	4 <sup>a</sup>	entrada	entrada adimensional
22	11 <sup>a</sup>	fase fluida	fase-sólida
23	eq.(II.12)	$\left( \frac{dv_s}{dz} \right) +$	$\left( \frac{dv_s}{dz} + \rho \epsilon u \left( \frac{du}{dz} \right) \right) +$
24	3 <sup>a</sup>	$\epsilon \rho \left( \frac{du}{dz} \right)$ correspon- de ao arraste	$\epsilon \rho u \left( \frac{du}{dz} \right)$ correspon- de a aceleração
29	eq.(II.16)	$\Delta P_{TRE}$	$\frac{\Delta P_{TRE}}{L}$
30	3 <sup>a</sup>	no sistema de medidas	no sistema
	15 <sup>a</sup>	fluxo	escoamento
31	eq.(II.19)	$u_\infty = v_s - u$	$u_\infty = u - v_s$
34	4 <sup>a</sup>	(II.1.2.1)	(II.3.1)

ERRATA continua&tilde;o

<u>Página</u>	<u>Linha</u>	<u>Onde se lê</u>	<u>Leia-se</u>
43	eq.(II.16)	$\Delta P_{TRE}$	$\frac{\Delta P_{TRE}}{L}$
47	10 <sup>a</sup>	do medidor	do sistema
48	16 <sup>a</sup>	Newton-Rapson	Runge-Kutta
53	13 <sup>a</sup>	bomba	soprador
	15 <sup>a</sup>	$4,88 \times 10^{-2}$ a $2,53 \times 10^{-2}$	$2,25 \times 10^{-2}$ a $5,3 \times 10^{-2}$
59	6 <sup>a</sup>	h (mma)	h (mmca)
65	1 <sup>a</sup>	PARTÍCULAS	PARTÍCULAS E FAIXAS DE RAZÃO DE CARGA SÓLIDO-FLUIDO
95	ítem b	equação (II.15)	equação (II.17)