

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

ESTUDO DE UMA VÁLVULA L ATRAVÉS DE NÚMEROS ADIMENSIONAIS

GABRIEL CRISTIANO KUHN

Dissertação de Mestrado

**São Leopoldo
2016**

ESTUDO DE UMA VÁLVULA L ATRAVÉS DE NÚMEROS ADIMENSIONAIS

GABRIEL CRISTIANO KUHN

Engenheiro Mecânico

Trabalho submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Maria Luiza Sperb Indrusiak

Coorientador: Dr. Lawrence Shadle

Banca Examinadora:

Prof. Dr Flávia S. F. Zinani

Prof. Dr Paulo Roberto Wander

Prof. Dr. Gabriel Meneghetti Faé Gomes

RESUMO

Válvula L é um tubo em forma de L destinado a conduzir partículas sólidas entre dois reservatórios. Este dispositivo usa injeção de um fluido e a sua geometria para o controle da vazão dos sólidos. A aplicação deste tipo de válvula não mecânica se dá em processos que visam o transporte de partículas, como linhas de transporte pneumático e reatores de leito circulante. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma correlação para a vazão mássica de sólidos através da análise dos números adimensionais, calculados com base em variáveis do processo, e dados experimentais. Com uma correlação mais precisa torna-se mais fácil o controle e o projeto de uma válvula L. Este estudo desconsidera a influência dos reatores, levando em conta apenas a influência da geometria da válvula, a variação da injeção de ar e as propriedades das partículas. A bancada de ensaios foi projetada com duas válvulas L (diâmetros de 34 e 70 mm) feitas de acrílico. Foram utilizadas esferas de vidro (diâmetro Sauter 0,8 mm, massa específica efetiva 1580 kg/m^3 , grupo D da classificação Geldart), conduzidas por ar comprimido. Aplicando-se o teorema de PI de Buckingham às variáveis importantes do processo, três números adimensionais foram obtidos. Após uma bateria de testes, estes números adimensionais foram calculados para várias condições de ensaios. Com base nos dados experimentais, obteve-se uma equação de ajuste e uma correlação para o fluxo de sólidos. Calculou-se seis correlações, porém é possível dizer que apenas três descrevem o processo, mesmo que com alguma incerteza. Para as válvulas de 34 mm foi possível observar a máxima taxa de sólidos, ou seja, qualquer incremento na vazão injetada resulta em uma diminuição do escoamento de sólidos.

Palavras-chave: Válvula L. Análise dimensional. Escoamento granular.

ABSTRACT

L valve is a right angled, L shaped pipe applied to transfer solids between two vessels. The device uses gas injection and pipe geometry for controlling the flow of particulate solids. This kind of non-mechanical valve is used in processes as pneumatic transport lines and circulating fluidized beds. This study aims to develop a new correlation to the solids mass flow rate through dimensional analysis, experimental data and equation fitting. An accurately way to estimate the flow of solids makes easier the valve design and control. This study does not consider the influence of the reactors that an L valve connect, in other words, this approach is limited to the influence of L valve geometry, gas injection and particle properties. A test section was built, comprising two valve diameters (acrylic pipes of 34 and 70 mm). Glass beads will be used as solids (Sauter diameter 0.8 mm, bulk density 1580 kg/m³, group D of Geldart classification) conveyed by air. Dimensionless numbers were calculated (by Buckingham PI theorem) from the variables of the process, then an experimental program was done. Based on experimental data, π_1 , π_2 and π_3 values were calculated for various test conditions. Based on the experimental data, an equation fit and a correlation to the solids mass flow rate were obtained. Six correlation were calculated but only three are able to describe the L valve process with a minimum accuracy. Maximum solids flow were achieved for 34 mm L valve, in other words, if aeration rate is increased beyond this point, solids flow decreases.

Keywords: L valve. Dimensional analysis. Granular flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Válvulas não mecânicas mais comuns.....	14
Figura 1.2 – Representação de uma aplicação das válvulas L.....	15
Figura 2.1 – Representação de uma partícula de forma não regular. Diâmetros equivalentes.	20
Figura 2.2 – Regimes de fluidização, (a) leito fixo; (b) Mínima fluidização; (c) borbulhante; (d) pistonado; (e) turbulenta; (f) transporte pneumático.	23
Figura 2.3 – Diagrama de classificação de partícula para fluidização por ar.....	24
Figura 2.4 – Padrões de escoamento na válvula L. Aeração baixa (a), escoamento através de um canal, aeração média (b), escoamento por dunas e aeração alta (c), escoamento por toda seção.	25
Figura 2.5 – Possibilidades do escoamento do fluido injetado na válvula L.....	26
Figura 3.1 – Dimensões das válvulas L: (a) 34 mm de diâmetro, (b) 70 mm. Sendo: TP tomada de pressão e PA ponto de aeração.....	36
Figura 3.2 – Grampo de metal para o controle de partículas na entrada da válvula L de 34 mm. Sendo: TP tomada de pressão e PA ponto de aeração.....	37
Figura 3.3 – Bancada com as duas válvulas L.....	38
Figura 3.4 – <i>Downcomer</i> da válvula L sendo enchida com partículas de 1,216 mm.....	39
Figura 3.5 – Ordem cronológica do preenchimento do tubo horizontal com partículas de 1,216 mm: (a) momento inicial, (b) momento intermediário e (c) equipamento pronto para os testes.	40
Figura 3.6 – Válvula L de 34 mm em operação com partículas de 1,216 mm: (a) vazão de ar injetado de 30 LPM, (b) 50 LPM e (c) 70LPM.....	41
Figura 4.1 – Resultados dos testes deste estudo comparados com os de Geldart e Jones (1991), mostrando a taxa de massa em relação à vazão volumétrica inserida na válvula (Q_{ext}).....	53
Figura 4.2 – Comparação dos testes para uma válvula de 70 mm utilizando as areias de diâmetro de 0,28 mm, 0,5 mm e 0,79 mm.....	55
Figura 4.3 – Gráfico mostra a relação entre G_s/D em relação a U_{ext}/U_{mf} , fazendo um comparativo com a correlação proposta na equação (2.6).....	56
Figura 4.4 – Números adimensionais π_1 versus π_2 , com suas respectivas curvas que se ajustam para cada grupo de ensaios.....	59
Figura 4.5 – Número adimensional π_3 plotado em relação aos coeficientes a e b	60
Figura 4.6 – Comparativo entre os valores de π_1 calculados e oriundos dos testes.....	62

Figura 4.7 – Comparativo entre os valores de π_1 calculados e oriundos dos testes, para o primeiro grupo de números adimensionais sob a forma exponencial.	63
Figura 4.8 – Números adimensionais π_1 versus π_2 , com suas respectivas curvas que se ajustam aos dados experimentais para o segundo grupo de números adimensionais.....	64
Figura 4.9 – Número adimensional π_3 plotado em relação aos coeficientes a (losango) e b (quadrado) para o segundo grupo de números adimensionais.....	64
Figura 4.10 – Comparativo entre os valores de π_1 calculados e dos testes, para o segundo grupo de números adimensionais sob a forma potencial.	66
Figura 4.11 – Comparativo entre os valores de π_1 calculados e dos testes, para o segundo grupo de números adimensionais sob a forma exponencial.	66
Figura 4.12 – Comparativo entre os valores de π_1 calculados e dos testes, para o terceiro grupo de números adimensionais sob a forma potencial.	68
Figura 4.13 – Comparativo entre os valores de π_1 calculados e dos testes, para o Terceiro grupo de números adimensionais sob a forma exponencial.	68
Figura 4.14 – Comparativo entre as velocidades do ar injetadas para cada conjunto de teste (diâmetro da válvula L e a partícula utilizada).	69
Figura B.1 – Gráfico de π_1 versus π_2 , com suas respectivas curvas que se ajustam para cada grupo de ensaios.	87
Figura B.2 – Número adimensional π_3 plotado em relação aos coeficientes a (losango) e b (quadrado).....	87
Figura B.3 – Gráfico de π_1 versus π_2 , com suas respectivas curvas que se ajustam para cada grupo de ensaios.	89
Figura B.4 – Número adimensional π_3 plotado em relação aos coeficientes a (losango) e b (quadrado).....	89
Figura B.5 – Gráfico de π_1 versus π_2 , com suas respectivas curvas que se ajustam para cada grupo de ensaios.	90
Figura B.6 – Número adimensional π_3 plotado em relação aos coeficientes a (losango) e b (quadrado).....	91
Figura B.7 – Gráfico de π_1 versus π_2 , com suas respectivas curvas que se ajustam para cada grupo de ensaios.	93
Figura B.8 – Número adimensional π_3 plotado em relação aos coeficientes a (losango) e b (quadrado).....	93

Figura B.9 – Gráfico de π_1 versus π_2 , com suas respectivas curvas que se ajustam para cada grupo de ensaios.	95
Figura B.10 – Número adimensional π_3 plotado em relação aos coeficientes a (losango) e b (quadrado).....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Alguns procedimentos de projeto estudados e as dimensões das válvulas L.	29
Tabela 3.1 – Propriedades das partículas utilizadas durante os ensaios.....	35
Tabela 3.2 – Variáveis utilizadas em outros estudos pesquisados.	45
Tabela 3.3 – Variáveis utilizadas em outros estudos pesquisados.	46
Tabela 3.4 – Resumo com os números adimensionais calculados.	51
Tabela 4.1 – Números adimensionais do primeiro grupo, calculados com base nos testes.	58
Tabela 4.2 – Números adimensionais calculados pela equação (4.7) e com base nos testes. ..	61
Tabela 4.3 – Matriz de planejamento para análise fatorial 2^2 para a válvula de 34 mm.	70
Tabela 4.4 – Tabela de coeficiente de contrastes para a válvula de 34 mm.	70
Tabela 4.5 – Matriz de planejamento para análise fatorial 2^2 para o primeiro grupo de números adimensionais.	72
Tabela 4.6 – Matriz de planejamento para análise fatorial 2^2 para o segundo grupo de números adimensionais.	73
Tabela 4.7 – Matriz de planejamento para análise fatorial 2^2 para o terceiro grupo de números adimensionais.	73
Tabela A.1 – Resultados dos testes da válvula de 34 mm com as partículas de 0,8 mm.	80
Tabela A.2 (continuação) – Resultados dos testes da válvula de 34 mm com as partículas de 0,8 mm.	81
Tabela A.3 – Resultados dos testes da válvula de 70 mm com as partículas de 0,8 mm.	82
Tabela A.4 – Resultados dos testes da válvula de 34 mm com as partículas de 1,216 mm.	83
Tabela A.5 – Resultados dos testes da válvula de 70 mm com as partículas de 1,216 mm.	84
Tabela A.6 (continuação) – Resultados dos testes da válvula de 70 mm com as partículas de 1,216 mm.	85
Tabela B.7 – Valores do primeiro grupo de números adimensionais calculados em função dos testes e em função da correlação proposta.....	86
Tabela B.8 – Valores do segundo grupo de números adimensionais (equação potencial) calculados em função dos testes e em função da correlação proposta	88
Tabela B.9 – Valores do segundo grupo de números adimensionais (equação exponencial) calculados em função dos testes e em função da correlação proposta	90

Tabela B.10 – Valores do terceiro grupo de números adimensionais (equação potencial) calculados em função dos testes e em função da correlação proposta	92
Tabela B.11 – Valores do terceiro grupo de números adimensionais (equação exponencial) calculados em função dos testes e em função da correlação proposta	94

LISTA DE SIGLAS

CFBC	<i>Circulating Fluidized Bed Combustion</i>
PVC	Policloreto de Vinila
SATC	Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
SEM	<i>Structural Equation Modeling Method</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

\hat{y}_i	Valor estimado de y_i [-]
\bar{y}	Média das observações [-]
y_i	Valor observado [-]
Δp_{DC}	Queda de pressão no <i>downcomer</i> [Pa]
Δp_{LV}	Queda de pressão no tubo horizontal [Pa]
μ	Viscosidade do ar [kg/(m s) ou N s/m ²]
a	Coefficiente de uma função [-]
A_i	Coefficiente de uma função [-]
Ar	Número de Arquimedes [-]
b	Coefficiente de uma função [-]
B_i	Coefficiente de uma função [-]
C_i	Coefficiente de uma função [-]
C_D	Coefficiente de arrasto [-]
D	Diâmetro do tubo da válvula L [m]
D_i	Diâmetro de peneira [m]
D_L	Diâmetro do leito [m]
d_p	Tamanho de peneira (<i>Sieve size</i>) [m]
D_p	Tamanho médio da partícula [m]
d_{pp}	Diâmetro da partícula [m]
d_{ps}	Diâmetro médio de Sauter [m]
d_s	Diâmetro de superfície (<i>surface diameter</i>) [m]
d_{sv}	Diâmetro superfície-volume (<i>Surface-Volume diameter</i>) [m]
d_v	Diâmetro de volume (<i>Volume diameter</i>) [m]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
G_s	Fluxo de massa [kg/(m ² s)]
L_{DC}	Comprimento vertical da válvula L [m]
L_H	Comprimento do tubo horizontal da válvula L [m]
L_L	Altura do leito ou outra dimensão do leito [m]
L_{LV}	Comprimento horizontal da válvula L [m]
n	Número de observações [-]
Q_{ent}	Vazão de ar que entra pelo topo da válvula [m ³ /s]

Q_{ext}	Vazão de ar externa, aeração [m ³ /s]
Q_{ext}	Vazão volumétrica do fluido injetado na válvula L, [m ³ /s]
Q_{sp}	Porção de ar que desce, ou sobe, pelo <i>standpipe</i> , [m ³ /s]
Q_t	Vazão volumétrica total que sai pela válvula L, [m ³ /s]
R^2	Coefficiente de determinação
$Re_{p,mf}$	Número de Reynolds calculado pelo diâmetro da partícula e velocidade de mínima fluidização [-]
s^2	Erro médio quadrático
U_{ext}	Velocidade superficial do fluido injetado na válvula L [m/s]
U_{mf}	Velocidade de mínima fluidização [m/s]
u_o	Velocidade superficial [m/s]
U_t	Velocidade terminal da partícula [m/s]
X	Matriz com os níveis da análise fatorial
x_1 e x_2	Variáveis independentes de um processo [-]
x_i	Fração de massa [-]
y	Variável dependente de um processo [-]
Y	Vetor com taxa dos sólidos (análise vetorial)
α_1	Coefficiente de uma função
β	Coefficiente de arrasto
β_2	Coefficiente de uma função
ε	Porosidade (<i>voidage</i>) [-]
ε_{mf}	Porosidade (<i>voidage</i>) nas condições de mínima fluidização [-]
π_i	Números adimensionais calculados de acordo com o método de Pi de Buckingham
ρ	Massa específica do fluido inserido na válvula L [kg/m ³]
ρ_B	Massa específica efetiva [kg/m ³]
ρ_f	Massa específica do fluido de fluidização [kg/m ³]
ρ_p	Massa específica da partícula [kg/m ³]
φ	Esfericidade [-]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos Específicos.....	16
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 APLICAÇÕES DA VÁLVULA L.....	18
2.2 SOBRE PARTÍCULAS.....	19
2.1.1 Velocidade de Mínima Fluidização.....	21
2.1.2 Regimes de Fluidização.....	22
2.1.3 Classificação das Partículas.....	23
2.3 OPERAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA VÁLVULA L.....	24
2.4 COMPORTAMENTO DA VÁLVULA L.....	27
2.5 NOTAS SOBRE DIMENSIONAMENTO DE UMA VÁLVULA L.....	29
2.6 PROCEDIMENTO PARA TESTES DAS VÁLVULAS L.....	30
2.7 ANÁLISE DIMENSIONAL	30
2.8 AJUSTE DA CURVA DOS DADOS EXPERIMENTAIS	33
2.9 PLANEJAMENTO FATORIAL.....	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 PARTÍCULAS	35
3.2 SEÇÃO DE ENSAIOS	35
3.3 PROCEDIMENTO DOS TESTES.....	39
3.4 TRATAMENTO DOS DADOS	42
3.5 CÁLCULO DOS NÚMEROS ADIMENSIONAIS.....	45
3.5.1 Variáveis Seleccionadas.....	46
3.5.2 Cálculo do Primeiro Grupo de Números Adimensionais	48
3.5.3 Cálculo do Segundo Grupo de Números Adimensionais.....	49
3.5.4 Cálculo do Terceiro Grupo de Números Adimensionais.....	50
3.6 ANÁLISE FATORIAL DE DOIS NÍVEIS	51
4 RESULTADOS E ANÁLISES.....	53
4.1 CORRELAÇÕES EXISTENTES	56

4.2 PRIMEIRO GRUPO DE NÚMEROS ADIMENSIONAIS.....	57
4.3 SEGUNDO GRUPO DE NÚMEROS ADIMENSIONAIS.....	63
4.4 TERCEIRO GRUPO DE NÚMEROS ADIMENSIONAIS	67
4.5 ANÁLISE FATORIAL DAS VARIÁVEIS.....	69
4.5.1 Análise fatorial para variáveis da válvula de 34 mm.....	70
4.5.2 Análise fatorial para os números adimensionais do primeiro grupo	72
4.5.3 Análise fatorial para os números adimensionais do segundo grupo	72
4.5.4 Análise fatorial para os números adimensionais do terceiro grupo	73
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77

1 INTRODUÇÃO

Válvulas não mecânicas são usadas para controlar o escoamento de partículas sólidas fazendo o uso da injeção de um fluido e da geometria de sua tubulação. (DAOUS; AL-ZAHRANI, 1998). Um ponto positivo deste equipamento é a possibilidade de manipular partículas em ambientes hostis mais facilmente do que com válvulas mecânicas, pelo fato de não haver partes móveis quando em funcionamento. (SMOLDERS; BAEYENS, 1995). Válvulas L pertencem a essa classe de dispositivos para controle. (GELDART; JONES, 1991). Outro dispositivo que pertence a essa categoria é a válvula J, no entanto, a válvula não mecânica mais comum é a válvula L (possui este nome pois sua forma é próxima ao da letra L) pela facilidade em sua construção e por ser ligeiramente mais eficiente que a J. (GRACE et al., 1997). A principal diferença entre estes dispositivos é a direção em que os sólidos são descarregados. A Figura 1.1 apresenta a forma destas válvulas, sendo que em (a) apresenta-se a válvula L, em (b) a válvula J e em (c) a válvula J aproximada. A válvula J aproximada é de mais fácil fabricação devido a sua geometria pois uma curva de 180° lisa apresenta uma dificuldade grande na sua confecção. (GRACE et al., 1997).

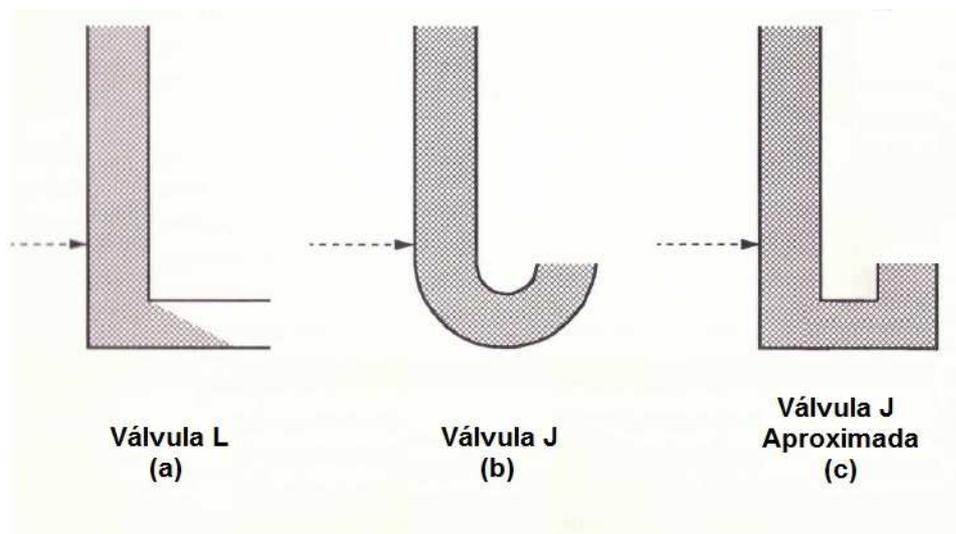


Figura 1.1 – Válvulas não mecânicas mais comuns.

Fonte: Adaptado de Grace et al. (1997).

Grace et al. (1997) explica que os sólidos escoam através de uma válvula não mecânica pela força de arrasto sobre a partícula produzida pelo fluido que é injetado na válvula. Ao ser injetado, o fluido conduz as partículas pela restrição imposta pelo joelho.

Quando esta força de arrasto é maior do que a força necessária para vencer a resistência dos sólidos no joelho, os sólidos escoam através da válvula.

As válvulas não mecânicas podem operar em dois modos diferentes: com a válvula controlando o escoamento das partículas (as descrições feitas até aqui se referem a este modo); ou em um modo automático de escoamento. (GRACE et al., 1997). Um exemplo de dispositivo que opera no modo automático é a *loop-seal*. Este apenas auxilia no redirecionamento dos sólidos e no selamento de pressão e seu escoamento é determinado pelo sistema, ou seja, ele não é responsável pelo controle do escoamento. (GRACE et al., 1997). A válvula L pode operar no modo automático (o termo válvula neste caso não é o mais adequado, pois não há controle do escoamento) sob condições específicas, dependendo do tamanho da coluna no *standpipe*, da vazão volumétrica injetada na válvula L e das partículas utilizadas. (GRACE et al., 1997).

Como exemplo de sua aplicação, a Figura 1.2 mostra uma representação de uma válvula L em um combustor de leito fluidizado circulante - *Circulating fluidized bed combustion* (CFBC).

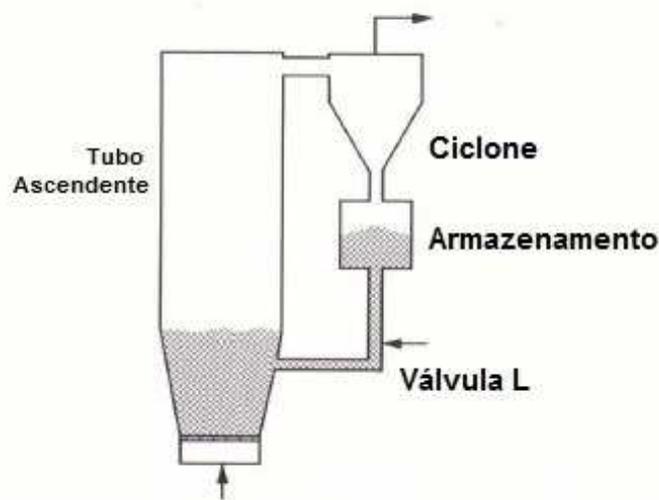


Figura 1.2 – Representação de uma aplicação das válvulas L.

Fonte: Adaptado de Grace et al. (1997).

Neste sentido, este estudo visa contribuir para o melhor entendimento da performance destes dispositivos, desenvolvendo uma correlação para determinar, de forma mais precisa, o fluxo de sólidos desta válvula, combinando dados experimentais e números adimensionais. A literatura corrente apresenta um número significativo de estudos sobre este dispositivo, no

entanto poucos deles fazem uso de números adimensionais, o que torna este o ponto forte do presente trabalho.

Para isso, uma bancada foi construída, contemplando duas válvulas (de diâmetros diferentes) e um tipo de partícula, com dois diâmetros diferentes, foi testada. A vazão de ar injetado na válvula foi a variável independente em cada teste. A influência dos reatores que a válvula L pode conectar não foi considerado neste trabalho. Dessa forma, esta abordagem analisa somente a performance da válvula L de acordo com sua geometria, vazão de ar injetado e as características das partículas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Obter uma correlação empírica para o fluxo de sólidos de uma válvula L, a partir de dados experimentais.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Desenvolver uma bancada para testes;
- b) Calcular os números adimensionais com base nas variáveis envolvidas no processo;
- c) Análise da importância das variáveis;
- d) Comparar resultados experimentais com correlações da literatura.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este tipo de dispositivo já vem sendo estudado há anos, mas, por se tratar de um processo complexo, ainda há incertezas para o seu entendimento pleno. Um número limitado de estudos relaciona números adimensionais e processos que envolvam escoamento granular. Esta é a razão para aplicar uma nova abordagem na caracterização desta válvula, motivada pela sua importância em aplicações industriais. Dentre estas aplicações pode-se citar a área de leitos fluidizados circulantes, mais precisamente na queima de carvão mineral ou biomassa para a geração de energia, um aspecto importante considerando o fato do estado do Rio

Grande do Sul possuir a maior reserva de carvão mineral do país. Uma melhor estimativa do fluxo de sólidos torna mais simples o projeto, controle e escalonamento de uma válvula L.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo seguinte consiste no referencial teórico que fundamenta este estudo. Em seguida, em Materiais e Métodos, serão discutidos os equipamentos utilizados e a metodologia empregada. Depois segue com os Resultados e Análise que desenvolve o estudo baseado nos resultados dos testes. Finaliza-se com a Conclusão e sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dispositivos para o controle de escoamento de partículas sólidas são usados em processos industriais em que sólidos precisam ser manipulados, como por exemplo, transporte pneumático e leitos fluidizados. (YANG; KNOWLTON, 1993). A sua principal função é mover sólidos sem fluxo contrário de gás, uma tarefa difícil, especialmente quando é preciso transferir partículas entre reatores a pressões diferentes. (SMOLDERS; BAEYENS, 1995).

Estes dispositivos são divididos em duas categorias: válvulas mecânicas (e. g. válvulas rotativas, parafuso, borboleta e válvulas de gaveta) e válvulas não mecânicas (e. g. válvula L, válvula J e válvula V). (YANG; KNOWLTON, 1993). Válvulas não mecânicas não possuem partes móveis em contato com os sólidos e, por esta razão, limitações mecânicas, térmicas e químicas são superadas possibilitando o seu uso em ambientes hostis. (SMOLDERS; BAEYENS, 1995).

A principal diferença entre as válvulas mecânicas e não mecânicas é que na primeira o seu controle é feito por uma peça ou dispositivo mecânico móvel enquanto na segunda o controle se dá através da injeção de um fluido. (YANG; KNOWLTON, 1993). O ponto de injeção do fluido em uma válvula L é chamado por alguns autores de ponto de aeração.

Entre as válvulas não mecânicas, a válvula L é a mais popular e tem sido usada em leitos fluidizados pois pode ficar em ambientes de elevada pressão e temperatura. (YANG; KNOWLTON, 1993). Este dispositivo é um tubo de ângulo reto na forma de L que conecta dois reservatórios ou reatores entre os quais há a necessidade de se transportar sólidos. (BASU, 2006). Esta válvula apresenta um projeto simples, de baixo custo, eficiente e mínima manutenção. (YANG; KNOWLTON, 1993). Válvulas L são mais usadas em leitos fluidizados circulantes do que em caldeiras. (BASU, 2006).

Nas seções seguintes alguns tópicos importantes para esse estudo serão abordados, tais como leitos fluidizados, partículas, válvula L e análise dimensional.

2.1 APLICAÇÕES DA VÁLVULA L

A válvula L é empregada, de uma forma geral, em processos industriais que seja necessária a manipulação de sólidos, como linhas de transporte pneumático e leitos fluidizados circulantes. (YANG; KNOWLTON, 1993). O regime de operação de um leito fluidizado circulante é a fluidização do leito rápida (*fast fluidized bed*), que é um regime entre o turbulento e o de transporte pneumático. (BASU, 2006). A diferença em usar uma válvula L

em um leito fluidizado circulante é que a recirculação de sólidos é controlada pela válvula e não feita de forma automática como a *loop seal*, que transfere os sólidos com a mesma taxa que ele recebe. (GRACE et al., 1997).

Em combustão por ciclo químico (*Chemical-looping combustion*) uma válvula L pode ser empregada para controlar a taxa de circulação do oxido metálico (oxygen carrier) entre seus dois reatores. (ADANEZ et al., 2012). Nesse processo de combustão, a transferência do oxigênio do ar para o combustível é feita através de um óxido metálico, evitando o contato direto entre o ar e o combustível. (ADANEZ et al., 2012). Em um reator é feita a oxidação deste óxido e em outro este é reduzido pelo combustível de forma tal, que o resultado das reações deste reator apresente apenas CO₂ (dióxido de carbono) e vapor de água, evitando perdas de energia para a separação do CO₂. (ADANEZ et al., 2012).

2.2 SOBRE PARTÍCULAS

Partículas sólidas tem a sua forma definida, normalmente, como uma esfera, mas a maioria das partículas naturais são não esféricas. (BASU, 2006). Dessa forma, elas são caracterizadas pelo diâmetro equivalente, esfericidade e uma característica de empacotamento conhecida como *voidage* ou porosidade, ϵ .

A Figura 2.1 mostra esquematicamente as quatro definições para diâmetro equivalente mais usadas para uma partícula. O diâmetro de volume (*Volume diameter*), d_v , considera o diâmetro de uma esfera que tem o mesmo volume que a partícula real enquanto o diâmetro de superfície (*surface diameter*), d_s , é o diâmetro de uma esfera que tem a mesma superfície da partícula em questão. O tamanho de peneira (*Sieve size*), d_p , é o diâmetro correspondente à malha mínima de peneira que uma partícula pode passar e o diâmetro superfície-volume (*Surface-Volume diameter*), d_{sv} , é o diâmetro de uma esfera que tem a mesma proporção de superfície e volume que a partícula original. (BASU, 2006).

Define-se ainda o diâmetro médio de Sauter, d_{ps} , como o diâmetro de uma esfera que tem a mesma relação volume/superfície das partículas presentes em uma certa amostra. A equação (2.1) traz uma forma simplificada para este cálculo, parâmetro utilizado em estudos relacionados a fenômenos interfaciais. (CREMASCO, 2012).

$$d_{ps} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{D_i} \right)} \quad (2.1)$$

onde x_i é a fração de massa e o D_i é o diâmetro da peneira.

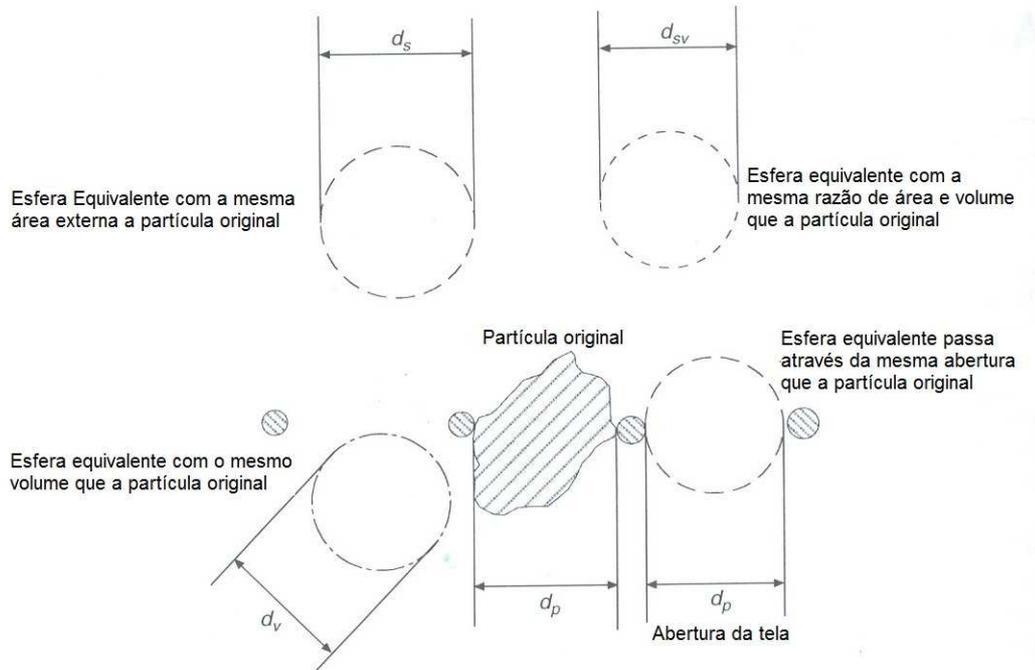


Figura 2.1 – Representação de uma partícula de forma não regular. Diâmetros equivalentes.

Fonte: Basu (2006).

Esfericidade (*Sphericity*, ϕ) é a variável que descreve a diferença entre a forma esférica e a forma da partícula, ou seja, é a razão entre a área da superfície de uma esfera, com o mesmo volume que a partícula, e a área da superfície real da partícula. (BASU, 2006).

De uma forma geral, as partículas se posicionam umas em relação às outras sob ação da gravidade. Alguns espaços entre as partículas permanecem desocupados, dependendo da forma das partículas e das características do leito, para isso é dado o nome de *voidage* (ϵ) ou porosidade. (BASU, 2006).

Creмасco (2012) utiliza o conceito de massa específica de forma convencional, ou massa específica da partícula, como a massa do material dividida pelo seu volume real. Já a massa específica efetiva (*bulk density*) é definido como a massa das partículas de um material dividido pelo volume do recipiente que elas ocupam. (OKA, 2014). Dessa forma, a massa específica efetiva é sempre menor do que a massa específica da partícula pois o volume do recipiente inclui

os vazios das partículas e o seu valor depende do tamanho das partículas, da superfície dos sólidos, massa específica dos sólidos e do modo de empacotamento. (OKA, 2014).

Velocidade terminal é a velocidade máxima de equilíbrio alcançada pela ação da aceleração da gravidade sobre uma partícula, caindo livremente do repouso. (BASU, 2006). Kunii e Levenspiel (1991) propõe a equação (2.2) para estimar a velocidade terminal (U_t) de uma partícula com tamanho d_p que cai através de um fluido.

$$U_t = \frac{4 \cdot d_p \cdot (\rho_p - \rho) \cdot g}{3 \cdot \rho \cdot C_D} \quad (2.2)$$

onde: d_p - Tamanho da partícula; g - Aceleração da gravidade; C_D - Coeficiente de arrasto; ρ_p - Massa específica da partícula; ρ - Massa específica do fluido.

2.1.1 Velocidade de Mínima Fluidização

Velocidade de mínima fluidização é a menor velocidade de um fluido que faz todas as partículas de um leito ficarem suspensas. (GRACE et al., 1997). Isso acontece quando a força de arrasto do fluido sobre a partícula se iguala ao peso da partícula, suspendendo-a, o que transforma o corpo de sólidos em um leito fluidizado. (KUNII; LEVENSPIEL, 1991). Nesta velocidade o corpo de partículas sólidas comporta-se como um líquido. (BASU, 2006).

Uma das correlações utilizadas para calcular a velocidade de mínima fluidização, U_{mf} , segundo Kunii e Levenspiel (1991), é através da equação (2.3) em conjunto com os números adimensionais de Reynolds, $Re_{p,mf}$, e de Arquimedes, Ar , (Equação (2.4) e (2.5), respectivamente).

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \varphi} \cdot Re_{p,mf}^2 + \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \varphi^2} \cdot Re_{p,mf} = Ar \quad (2.3)$$

$$Re_{p,mf} = \frac{d_p \cdot U_{mf} \cdot \rho}{\mu} \quad (2.4)$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \cdot \rho \cdot (\rho_p - \rho) \cdot g}{\mu^2} \quad (2.5)$$

Nas equações 2.1 a 2.3, ε_{mf} é a porosidade (*voidage*) nas condições de mínima fluidização e ρ massa específica do fluido inserido na válvula L

2.1.2 Regimes de Fluidização

Fluidização é uma operação em que pequenas partículas sólidas são transformadas em um estado como de um fluido pelo contato com o escoamento de um gás ou de um líquido. (BASU, 2006). Se um recipiente possui sólidos granulares e um gás se move através desse meio de forma ascendente, com o aumento de velocidade, mudanças acontecem no movimento destas partículas. (BASU, 2006). Em outras palavras, os sólidos se movem de um estado ou regime para outro quando a velocidade do gás é aumentada (BASU, 2006). O termo leito pode ser definido, de acordo com Basu (2006), como um corpo de gás-sólido em um dos modos de contato:

- a) Se uma pequena taxa de um fluido passa através de um leito de finas partículas e não há movimento nessas partículas, este regime é conhecido como leito fixo (Figura 2.2 (a)). (KUNII; LEVENSPIEL, 1991);
- b) Mínima fluidização é alcançada quando a taxa de gás é aumentada até o momento que as partículas ficam suspensas pela ação deste gás (Figura 2.2 (b)), neste momento o peso das partículas é contrabalançado pela força de fricção entre as partículas e o fluido. (KUNII; LEVENSPIEL, 1991);
- c) Um aumento da taxa além da mínima fluidização criará instabilidades como bolhas e canais, o leito não se expande muito mais do que na mínima fluidização, este regime é chamado de borbulhante (Figura 2.2 (c)). (KUNII; LEVENSPIEL, 1991);
- d) O regime pistonado (Figura 2.2 (d)) acontece se a taxa de massa de gás é incrementada e as bolhas se fundem em bolhas maiores à medida que sobem. (KUNII; LEVENSPIEL, 1991);
- e) Quando a taxa de gás excede a velocidade terminal das partículas, a superfície do topo do leito desaparece e as partículas se movimentam de forma turbulenta, observando-se aglomerados de sólidos e vazios de gás, de vários tamanhos e formas. Este regime é chamado de fluidização turbulenta (Figura 2.2 (e)). (KUNII; LEVENSPIEL, 1991);
- f) O último regime é o de transporte pneumático (Figura 2.2 (f)), em que a taxa de massa de gás é alta o suficiente para carregar os sólidos para fora do leito junto com o gás (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

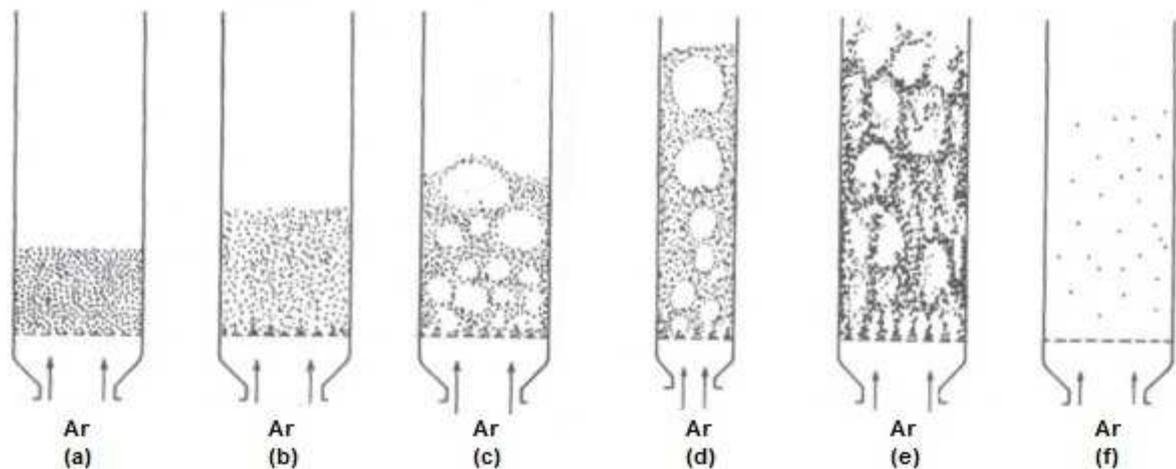


Figura 2.2 – Regimes de fluidização, (a) leito fixo; (b) Mínima fluidização; (c) borbulhante; (d) pistonado; (e) turbulenta; (f) transporte pneumático.

Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991).

2.1.3 Classificação das Partículas

De acordo com o comportamento do sólido particulado quando fluidizado por um gás, as partículas são classificadas em quatro grupos (A, B, C e D). (GELDART, 1973). A Figura 2.3 mostra o diagrama de classificação de partículas para fluidização de ar, em função da diferença da massa específica do sólido e do gás de fluidização ($\rho_p - \rho_f$) e do tamanho médio da partícula (D_p).

Partículas do grupo A estão em uma faixa de 30 a 100 μm e são usadas em muitos sistemas de leitos fluidizados circulantes. (BASU, 2006). Essas partículas expandem-se consideravelmente antes do início do regime borbulhante e, quando a injeção de ar é interrompida, o leito colapsa lentamente. (GELDART, 1973).

No grupo B, as partículas são maiores do que as do grupo A (100 a 500 μm) e fluidizam bem. (BASU, 2006). Bolhas aparecem na velocidade de mínima fluidização (ou ligeiramente acima desta velocidade), a expansão do leito é pequena e, ao interromper a injeção de gás, ele colapsa rapidamente. (GELDART, 1973).

As partículas que pertencem ao grupo C são muito difíceis de fluidizar (canais se formam dentro do leito) e possuem diâmetro pequenos, tipicamente menores do que 30 μm . (BASU, 2006). A fluidização pode ser melhorada com o uso de vibradores para quebrar a estabilidade dos canais ou, em alguns casos, cinza (*fumed silica*) com um tamanho bem pequeno pode ser adicionada. (GELDART, 1973). Finalmente, as partículas do grupo D são

as que possuem os maiores diâmetros entre todos os grupos (>500 μm), este grupo requer grandes velocidades para fluidizar. (BASU, 2006).

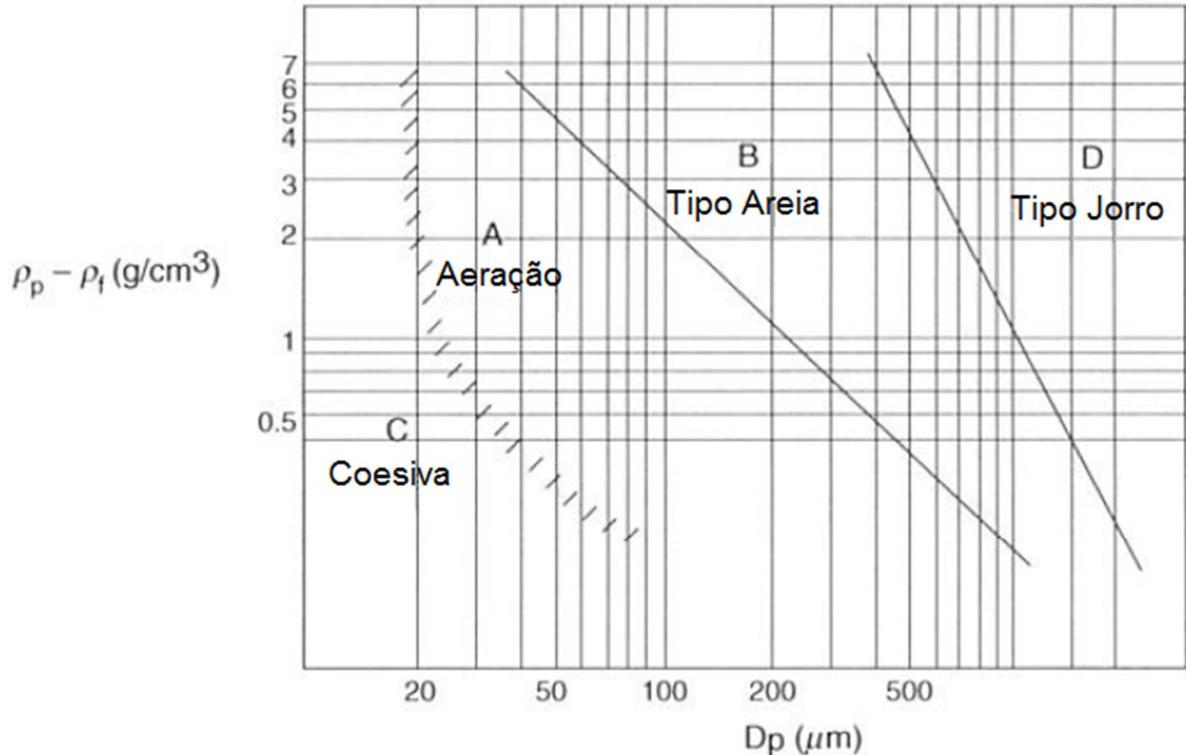


Figura 2.3 – Diagrama de classificação de partícula para fluidização por ar.

Fonte: Adaptado de Basu (2006).

2.3 OPERAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA VÁLVULA L

Apesar da simplicidade do funcionamento de uma válvula L, ela possui particularidades que tornam difícil a previsão do fluxo de sólidos. A seguir são apresentadas algumas características observadas em outros estudos e que foram usados como base para este estudo.

Grace et al. (1997) explica que, quando fluido é injetado na válvula L (ou em uma válvula não mecânica), não haverá escoamento de sólidos imediatamente. A porção inicial de fluido não é suficiente para vencer a força de fricção das partículas para iniciar o escoamento. Acima do limiar de aeração necessária para iniciar o escoamento de sólidos, ou seja, a menor vazão volumétrica de ar injetada na válvula necessária para que os sólidos escoem, incrementando a vazão de fluido injetado, a taxa de sólidos que sai da válvula será

incrementada também e diminuindo esta aeração o escoamento de sólidos será reduzido. Ele ainda complementa que há histerese na curva de aeração versus taxa de sólidos para as válvulas não mecânicas.

De acordo com Yang e Knowlton (1993), os fatores de controle dominantes são o tubo horizontal (e não o tubo vertical) e a velocidade terminal das partículas (e não a velocidade de mínima fluidização das partículas) relacionados com a injeção total de fluido e a abertura da válvula. Estes autores ainda explicam que, quanto maior o diâmetro do tubo horizontal, maior será a aeração necessária para iniciar o escoamento de sólidos. Por outro lado, o tubo vertical não pode ser um fator de controle porque seu escoamento depende da gravidade.

Para uma taxa de aeração externa muito pequena, a taxa de sólidos será zero, o tubo horizontal e o vertical estarão no regime de leito fixo. (YANG; KNOWLTON, 1993). O escoamento de sólidos iniciará a partir de uma mínima taxa de fluido externo inserida e então, somente em uma pequena porção no topo do tubo horizontal, haverá escoamento de sólidos, como mostrado na Figura 2.4 (a). (YANG; KNOWLTON, 1993). Para esse tipo de escoamento, Geldart e Jones (1991) observaram que não havia movimento no tubo vertical (ou *standpipe*) e que a seção do canal aumenta quando o tamanho das partículas de areia é maior. A Figura 2.4 (b) mostra um padrão de escoamento de sólidos maior, no tubo horizontal, quando a taxa de aeração é incrementada. (YANG; KNOWLTON, 1993). Geldart e Jones (1991) descrevem isto como dunas ou ondulações que se movem sobre a superfície de sólidos no topo do tubo com frequências de 4 Hz, aproximadamente. A flutuação na pressão é produzida por estas dunas. (SMOLDERS; BAEYENS, 1995).

Para uma taxa de aeração externa alta, toda a seção do tubo torna-se ativa, como pode ser visto na Figura 2.4 (c). (YANG; KNOWLTON, 1993). Se a máxima taxa de sólidos é alcançada, qualquer aumento na injeção de fluido causa uma redução significativa na taxa de sólidos. (GELDART; JONES, 1991).

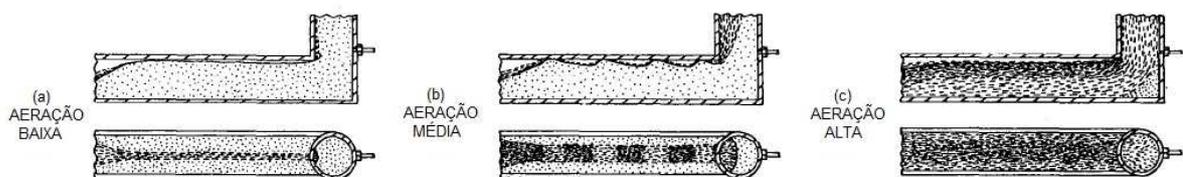


Figura 2.4 – Padrões de escoamento na válvula L. Aeração baixa (a), escoamento através de um canal, aeração média (b), escoamento por dunas e aeração alta (c), escoamento por toda seção.

Fonte: Adaptado de Geldart e Jones (1991).

Este fenômeno não é muito diferente de uma válvula gaveta (dispositivo mecânico), mas a abertura da válvula é atuada por meios mecânicos enquanto uma válvula L é atuada pela aeração externa. (YANG; KNOWLTON, 1993). Geldart e Jones (1991) concluíram que a mínima aeração de fluido necessária para produzir o mínimo escoamento de sólidos é calculada pelo produto da mínima velocidade de fluidização da partícula pela área da seção da válvula L ortogonal ao escoamento.

De acordo com Grace et al. (1997), o escoamento total de fluido na válvula L, que é o responsável pelo escoamento das partículas, não é apenas aquela porção que é injetada pela aeração. A Figura 2.5 (a) ilustra o comportamento do fluido em uma válvula L na maioria dos casos, sendo que a vazão volumétrica total que sai pela válvula, Q_T , é a soma da porção que desce pelo *standpipe*, Q_{sp} , e o fluido que é injetado na válvula L, Q_{ext} . No entanto, pode ocorrer que uma porção de fluido suba pelo *standpipe* fazendo com que a vazão total de fluido que sai pela válvula seja a diferença entre a vazão injetada e a porção que subiu pelo *standpipe*. Este caso está representado na Figura 2.5 (b) e esta situação ocorre quando o escoamento de sólidos no *standpipe* é baixo e/ou com o uso de partículas maiores.

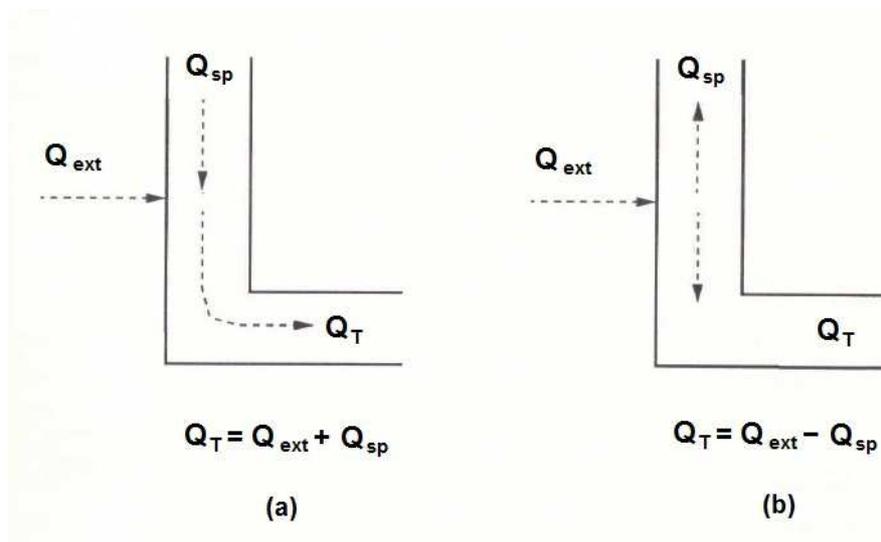


Figura 2.5 – Possibilidades do escoamento do fluido injetado na válvula L.

Fonte: Adaptado de Grace et al. (1997).

Grace et al. (1997) aconselham que o ponto de aeração seja o mais baixo possível no tubo vertical, para maximizar o comprimento do *standpipe* e minimizar a queda de pressão na válvula L, pois ambos aumentam o escoamento de sólidos na válvula. Porém, se o ponto de injeção do fluido for muito baixo pode afetar o controle da taxa de sólidos pois o fluido

injetado segue diretamente para o topo da perna horizontal da válvula e dessa forma não ajuda os sólidos a vencerem a restrição imposta pelo joelho. Para assegurar uma boa operação, o ponto de injeção de fluido deve ser colocado no tubo vertical em uma posição de 1,5 diâmetros de tubo a partir da linha de centro do tubo horizontal da válvula L.

2.4 COMPORTAMENTO DA VÁLVULA L

Grace et al. (1997) resume alguns fatores que influenciam no comportamento da aeração e da queda de pressão em uma válvula L. A vazão volumétrica do fluido injetado na válvula precisa ser aumentada quando aumentar o diâmetro do tubo vertical; o tamanho da partícula ou a massa específica das partículas. A queda de pressão na válvula L aumenta quando a taxa de sólidos ou a massa específica das partículas são incrementadas ou o diâmetro do tubo horizontal é diminuído. Geldart e Jones (1991) concordam que, se o tamanho de partícula for aumentado, é necessário inserir uma quantidade maior de fluido para atingir a mesma taxa de massa de sólidos e complementam que o diâmetro do tubo acompanha esta mesma relação.

O escoamento de sólidos é afetado pelo raio do joelho da válvula L, o número de pontos de aeração e a inclinação do tubo horizontal. (YANG; KNOWLTON, 1993 e DAOUS; AL-ZAHRANI, 1998).

Sobre o raio do joelho, um estudo de Geldart e Jones (1991) sugere que uma quantidade menor de fluido é necessária para transportar a mesma taxa de sólidos quando o joelho possui uma curva mais suave, ou seja, a taxa de sólidos aumenta quando o raio do joelho aumenta. Quando um joelho suave é usado, a sensibilidade e o controle são melhorados perto da condição de descarregamento mínimo de sólidos.

No que diz respeito à inclinação, quando o ângulo entre as seções antes e após o joelho é maior do que 90 graus a taxa de sólidos é aumentada (para qualquer aeração) e aumenta o controle no descarregamento para taxas pequenas. (GELDART; JONES, 1991). De acordo com o estudo de Geldart e Jones (1991), para ângulos a partir de 106° entre as seções antes e após o joelho, o escoamento fica incontrolável. Os autores acreditam que, para ângulos maiores, uma quantidade grande de ar entra pelo topo do tubo gerando esta instabilidade. Na maioria dos testes de Geldart e Jones (1991) foi usado somente um ponto de injeção de ar, no entanto, quando se atingiu velocidades sônicas (*sonic velocity*) no tubo de alimentação de fluido com um ponto, usou-se três pontos de aeração e com essa configuração conseguiu-se a máxima taxa de ar e de sólidos. Outra observação destes autores foi que o escoamento total de

ar na válvula L é maior do que o ar injetado pois uma porção de ar entra pelo topo do tubo vertical, aproveitando-se dos espaços vazios entre as partículas.

As válvulas L funcionam melhor com um tamanho de partícula médio variando entre 0,2 mm e 5 mm (classificação Geldart para estas partículas são os grupos B e D). (GRACE et al., 1997). No entanto, não funcionam bem com o grupo A e apresentam muitas dificuldades com o grupo C de partículas. (BASU, 2006). Para partículas com tamanho maior do que 2 mm é preciso uma grande quantidade de ar para gerar uma força de arrasto suficiente para vencer a restrição do joelho da válvula. (GRACE et al., 1997). Uma alternativa para melhorar o escoamento destas partículas é misturando partículas menores, fazendo com que estas preencham os vazios entre as partículas maiores. (GRACE et al., 1997).

Geldart e Jones (1991) determinaram o fluxo de massa de sólidos (G_s) em função da velocidade superficial (U_{ext}) e obtiveram que, se fluxo de massa de sólidos é dividido pelo diâmetro do tubo (D) os dados podem ser modelados e representados por uma única curva. Os mesmos autores observaram que a mínima velocidade superficial do fluido injetado (U_{ext}) foi similar à velocidade de mínima fluidização (U_{mf}) para as areias testadas, então, com base nestes dados experimentais, a correlação mostrada na equação (2.6) foi criada.

$$\frac{G_s}{D} = 3354 \cdot \frac{U_{ext}}{U_{mf}} - 2965 \quad (2.6)$$

Smolders e Baeyens (1995) apresenta a equação (2.7) e comentam que a esta equação e a equação anterior (2.6) superestimam os dados para baixas velocidade. Eles não consideram a influência do tamanho das partículas, d_p , e chegam na equação (2.8) para diâmetros de válvula maiores que 25 mm.

$$\frac{G_s}{D} = 780 \cdot \left(\frac{U_{ext}}{U_{mf}} \right)^2 \quad (2.7)$$

$$\frac{G_s}{D} = 79600 \cdot \left(\frac{U_{ext}}{U_{mf}} \right)^{2,2} \cdot d_p^{0,6} \quad (2.8)$$

Daous e Al-Zahrani (1998) representaram o fluxo de massa (G_s) dividido pelo diâmetro da válvula L (D) em função da velocidade do ar injetado na válvula L (U_{ext}) dividida

pelo diâmetro da partícula (d_p). De acordo com seus dados, concluíram que eles se ajustam por uma reta descrita pela equação (2.9).

$$\frac{G_s}{D} = -5450 + 1,08 \cdot \frac{U_{ext}}{d_p} \quad (2.9)$$

2.5 NOTAS SOBRE DIMENSIONAMENTO DE UMA VÁLVULA L

A Tabela 2.1 resume alguns procedimentos para dimensionamento estudados e mostra as dimensões encontradas pelos respectivos autores. A maior parte dos estudos visa encontrar o fluxo de massa da válvula L.

Tabela 2.1 – Alguns procedimentos de projeto estudados e as dimensões das válvulas L.

		Válvulas L estudadas						Válvulas L estudadas			
		Diâmetro [mm]	40	40	70			100	Diâmetro [mm]	76	
GELDART e JONES (1991)	Tubo horizontal [mm]	555	555	555	555	YANG e KNOWLTON (1993)	Diâmetro do tubo horizontal [mm]	38, 51, 76, 51, 76, 152			
	Tubo vertical [mm]	3810	3810	3520	3520		Tubo horizontal [mm]	610, 457, 762, 1067			
	Ponto de aeração [mm]	50	100	50	50		Procedimento para dimensionamento				
	Procedimento para dimensionamento				Procedimento para dimensionamento						
	<ul style="list-style-type: none"> - Propriedades das partículas e fluxo de massa precisam ser identificados; - Diâmetro, velocidade de mínima fluidização, vazão de ar máxima a ser injetada e queda de pressão são calculadas; - As velocidades são analisadas e o comprimento do tubo vertical (downcomer) é escolhido. 				<ul style="list-style-type: none"> - Propriedades das partículas e queda de pressão precisam ser identificadas; - Calcular a velocidade terminal, diâmetro e comprimento da válvula L; - Analisar a abertura da válvula L, aeração e vazão de gás externo para achar fluxo de sólidos. 						
DAOUS e AL-ZAHRANI (1998)	Válvulas L estudadas				SMOLDERS e BAEYENS (1995)	Válvulas L estudadas					
	Diâmetro [mm]	25	36	50		Diâmetro [mm]	20	25	30	40	
	Tubo horizontal [mm]	190 ou 290				Tubo horizontal [mm]	200; 400	200; 300; 400	200	200	
	Tubo vertical [mm]	3000				Tubo vertical [mm]	820	790	880	820	
	Ponto de aeração [mm]	150				Ponto de aeração [mm]	120	120	120	120	
Procedimento para dimensionamento				Procedimento para dimensionamento							
<ul style="list-style-type: none"> - Velocidade de escorregamento do gás, queda de pressão e velocidade superficial do gás injetado são calculados; - fluxo de sólidos é achado através de correlações. 				<ul style="list-style-type: none"> - Propriedades das partículas e taxa de massa máximo precisam ser identificados; - Diâmetro, velocidade de mínima fluidização, taxa de sólidos, vazão de gás a ser injetado e queda de pressão são calculados. 							

2.6 PROCEDIMENTO PARA TESTES DAS VÁLVULAS L

Geldart e Jones (1991) enchem o seu sistema com sólidos e inseriam ar para produzir uma alta taxa de sólidos por alguns minutos. A válvula era reiniciada com uma baixa vazão de ar de forma que apenas algumas partículas sólidas fossem observadas saindo do equipamento. Então, a taxa de aeração era aumentada em estágios até a sua máxima vazão. A taxa de escoamento de sólidos era medida cinco vezes para cada estágio de aeração e uma média calculada, a vazão de ar e a queda de pressão no tubo descendente (*standpipe*) eram registradas.

Daous e Al-Zahrani (1998) alimentavam o sistema continuamente com sólidos. O teste iniciava ao inserir ar no ponto de aeração com uma vazão tal que poucas partículas escoavam. Então, a taxa de aeração e a queda de pressão na válvula L eram anotadas. As partículas eram coletadas em um recipiente e a taxa de sólidos era determinada pesando-se os sólidos e cronometrando-se o tempo. A injeção de ar era aumentada em estágios até a máxima taxa de sólidos, e em cada teste os parâmetros citados eram anotados. A queda de pressão foi medida por um manômetro de coluna de água e o escoamento do ar foi determinado por uma placa de orifício.

Smolders e Baeyens (1995) inseriam ar no ponto de aeração e, após o sistema atingir um escoamento constante, a taxa de sólidos era medida por um determinado tempo junto com a queda de pressão. O teste era repetido 10 vezes e uma média calculada. No mínimo 15 vazões de ar diferentes foram testadas para um determinado sólido e uma determinada válvula L. Na maior parte dos testes o fluido utilizado para conduzir as partículas foi ar comprimido, mas em um teste foi usado CO₂.

Yang e Knowlton (1993) não descreveram o procedimento dos seus testes.

2.7 ANÁLISE DIMENSIONAL

Análise dimensional é um método utilizado para obter um grupo de números adimensionais que descrevem um fenômeno físico, sendo este fenômeno muito complicado para obter-se suas equações governantes a partir de leis gerais. Este método pode ser empregado para identificar um grupo de variáveis para descrever o fenômeno. (NAKAYAMA; BOUCHER, 2000). Exemplos da aplicação deste método são o cálculo da perda de carga em tubulações, o cálculo de flutuações atmosféricas provocadas por obstáculos, os números adimensionais para análise de escala em máquinas de fluxo.

Teorema de Pi (π) de Buckingham é um procedimento para a dedução de um grupo de números adimensionais para um dado problema de engenharia, isso permite desenvolver de forma fácil os parâmetros adimensionais governantes. (PRITCHARD, 2011). O teorema não estabelece uma relação funcional entre seus parâmetros adimensionais, o que deve ser provado experimentalmente. (FOX et al., 2010). Este teorema considera um fenômeno físico que possui n variáveis e r dimensões básicas (ex. massa, comprimento e tempo), expressando o fenômeno pela relação entre $n-m$ grupos adimensionais $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}$. Cada grupo de números adimensionais é determinado algebricamente pela condição de que a soma das potências de cada dimensão básica deve ser zero. (NAKAYAMA; BOUCHER, 2000).

Fox et al. (2010) recomendam o procedimento abaixo para a determinação dos Pi's de Buckingham.

- 1) Listar todas as variáveis envolvidas no fenômeno físico. O total de variáveis determina o valor de n (parâmetros dimensionais);
- 2) Selecionar um conjunto de dimensões fundamentais (ou primárias, e. g. MLt ou FLt);
- 3) Listar as unidades de todas as variáveis em termos das dimensões primárias e observar o número de dimensões primárias (r);
- 4) Selecionar o conjunto de m parâmetros dimensionais que apresentem todas as dimensões primárias. Estes parâmetros são chamados de parâmetros repetentes e normalmente $m=r$;
- 5) Definir as equações dimensionais combinando os parâmetros repetentes, selecionados no passo 4, com os parâmetros remanescentes (demais variáveis definidas na etapa 1), uma de cada vez, formando um parâmetro adimensional. O número de parâmetros adimensionais é definido por $n-m$;
- 6) Checar se cada grupo obtido é realmente adimensional.
- 7) Finalmente é necessário montar a relação $f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}) = 0$, que é a solução do problema.

Glicksman (1984) desenvolveu um grupo de números adimensionais que podem ser usados para caracterizar o regime de escoamento e o comportamento dinâmico do fluido, para projetar leitos em ambientes em elevada pressão e temperatura. Os fatores adimensionais de controle proposto pelo autor são mostrados nas equações (2.9) a (2.12). Neste estudo, os grupos de números adimensionais a serem utilizados variam conforme o número de Reynolds

da partícula. A equação (2.10) representa a razão entre o arrasto da partícula e a força de inércia.

$$\frac{\beta \cdot d_{pp}}{\rho_p \cdot u_o} \quad (2.10)$$

onde: β - Coeficiente de arrasto; d_{pp} - Diâmetro da partícula; u_o - Velocidade superficial.

A equação (2.11) representa a razão entre a força da gravidade agindo na partícula e a força de inércia da partícula.

$$\frac{g \cdot d_{pp}}{u_o^2} \quad (2.11)$$

A equação (2.12) mostra outros três números adimensionais citados pelo autor, sendo que outras razões entre dimensões geométricas do leito também podem ser utilizadas junto com um número adimensional referente à distribuição do tamanho de partícula (se estas não forem do mesmo tamanho). Em alguns casos a esfericidade também foi incluída ou o número de Arquimedes (mostrado na equação (2.13)).

$$\frac{L_L}{d_{pp}}; \frac{D_L}{d_{pp}}; \frac{\rho_f}{\rho_p} \quad (2.12)$$

$$Ar = \frac{\rho_p \cdot \rho_f \cdot d_{pp}^3 \cdot g}{\mu^2} \quad (2.13)$$

onde: L_L - Altura do leito ou outra dimensão do leito; D_L - Diâmetro do leito; ρ_f - Massa específica do fluido de fluidização; μ - Viscosidade do ar.

Glicksman (1984) conclui que a força eletrostática é importante quando as partículas dos leitos são muito pequenas e que é possível encontrar uma correspondência entre leitos similares operando com fluidos diferentes ajustando-se o comprimento, a massa específica da partícula e a velocidade superficial.

Nicastro e Glicksman (1984) testaram os parâmetros de escala (números adimensionais citados anteriormente) para comparar o comportamento de um leito fluidizado com combustão, operando a 1050 K, com um modelo deste leito à temperatura ambiente.

Neste estudo a comparação apresentou uma boa concordância das características fluidodinâmicas entre os dois testes. Desta forma, estes grupos de números adimensionais podem servir para construir um modelo em escala de um leito fluidizado.

2.8 AJUSTE DA CURVA DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Em alguns casos de engenharia existe a necessidade de encontrar uma equação que se ajusta aos dados experimentais para representar as características ou a performance de um sistema, simplesmente por ser mais fácil manipular uma equação do que uma grande tabela com resultados ou para descrever o comportamento de processos e propriedades termodinâmica de substâncias. (STOECKER, 1989).

Stoecker (1989) propõe um procedimento para obter uma equação única para uma variável de interesse, que é função de duas outras variáveis independentes. Os dados experimentais correlacionam a variável de interesse com as variáveis independentes mantendo uma fixa enquanto a outra é variada. Isto é feito sucessivamente para vários valores da primeira variável. O procedimento proposto consiste em obter equações de ajuste da variável de interesse em relação à segunda variável para cada um dos valores da primeira variável. O segundo passo consiste em correlacionar os coeficientes de ajuste das equações para os valores da primeira variável, obtendo-se assim uma equação única. Este processo pode ser realizado também para um maior número de variáveis, embora torne-se exponencialmente mais complexo.

Outra forma de resolver este problema é através da equação (2.14), supondo que o fenômeno se comporte sob a forma de uma equação de segundo grau. É preciso de nove ternos (y ; x_1 ; x_2), oriundos de testes, para que sejam substituídos na equação (2.14) e, ao resolver o sistema, as nove constantes A_i , B_i e C_i podem ser encontradas, gerando uma equação que descreve y em função de x_1 e x_2 .

$$y = A_0 + A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_1^2 + (B_0 + B_1 \cdot x_1 + B_2 \cdot x_1^2) \cdot x_2 + (C_0 + C_1 \cdot x_1 + C_2 \cdot x_1^2) \cdot x_2^2 \quad (2.14)$$

onde y é a variável dependente, x_1 e x_2 são as duas variáveis independentes do processo.

2.9 PLANEJAMENTO FATORIAL

Para se determinar a importância de cada variável e a influência conjunta destas variáveis, pode-se usar o planejamento fatorial. (BARROS NETO et al., 2001). Em outras palavras, pode-se determinar o quanto a variável dependente é afetada por cada um dos fatores (ou variáveis independentes) do problema. Em geral, tem-se um intervalo dentro do qual se escolhe vários valores (ou níveis) para cada variável e, para um planejamento fatorial completo, seria necessário realizar ensaios para todas as possíveis combinações de variáveis. Uma alternativa mais simples e, no entanto, efetiva, é realizar o planejamento fatorial 2^k , sendo k o número de fatores ou variáveis independentes. (BARROS NETO et al., 2001). Neste planejamento, seleciona-se apenas dois valores para cada variável e, portanto, faz-se apenas 2^k ensaios. Barros Neto et al., (2001), propõe um algoritmo baseado em uma análise matricial k -dimensional para a realização deste planejamento. O resultado que se obtém é um panorama completo da influência de cada variável e da influência conjunta de 2 a k variáveis sobre a variável dependente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Como mencionado anteriormente, este estudo visa desenvolver uma correlação para determinar o fluxo de sólidos das válvulas L. Neste capítulo é explicada a maneira pela qual se chegou a esta equação. Dessa forma, serão descritos os materiais disponíveis (sólidos granulares e equipamentos usados) e a metodologia (testes e ferramentas para tratar os dados experimentais).

3.1 PARTÍCULAS

Esferas de vidro foram usadas como sólidos granulares e foram transportadas por ar comprimido. Dois diâmetros diferentes de partículas foram testados. A Tabela 3.1 mostra as propriedades dos dois diâmetros de esferas de vidro utilizadas. A caracterização destes sólidos está detalhada em Bianchi e Aquino (2014).

Tabela 3.1 – Propriedades das partículas utilizadas durante os ensaios.

	Esfera de Vidro 01	Esfera de Vidro 02
Diâmetro médio de Sauter	0.8 mm	1.216 mm
Massa específica efetiva (<i>bulk density</i>)	1580 kg/m ³	1540 kg/m ³
Massa específica da partícula	2490 kg/m ³	2490 kg/m ³
Velocidade de mínima fluidização	0.547 m/s	0.843 m/s
Esfericidade	0.872	0.865

3.2 SEÇÃO DE ENSAIOS

As válvulas L foram confeccionadas de tubo acrílico (para permitir a observação do escoamento de partículas) conectados por um joelho em policloreto de vinila (PVC), acessório comercial de tubulações. Dois diâmetros de tubo foram estudados, 34 mm e 70 mm de diâmetro interno. Para a válvula de 70 mm, todas as dimensões foram baseadas na bancada a frio da Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC), possibilitando em um trabalho futuro a comparação do desempenho da válvula L isolada, objeto do presente trabalho, em relação ao seu funcionamento dentro de um sistema. A válvula de 34 mm foi o diâmetro mais próximo da metade de 70 mm, tendo em vista os joelhos comerciais existentes. A válvula de tubo de 70 mm possui 456 mm de comprimento de seção horizontal e 742 mm, vertical. As seções horizontal e vertical da válvula de 34 mm têm 303 mm e 410 mm de comprimento, respectivamente.

A Figura 3.1 mostra as dimensões das válvulas L, incluindo as distâncias entre o topo da válvula e o centro do tubo horizontal e as principais dimensões do reservatório. As partículas são conduzidas do reservatório, através de uma mangueira de borracha, até um funil localizada no topo da válvula L, evitando perdas de sólidos do reservatório para a válvula. Durante os testes, a altura de partículas no tubo descendente da válvula L precisa permanecer constante, para este controle um grampo de metal é utilizado para estrangular a passagem de partículas na mangueira de borracha. A abertura deste grampo é regulada por meio de um parafuso. A Figura 3.2 mostra o grampo na válvula de 34 mm.

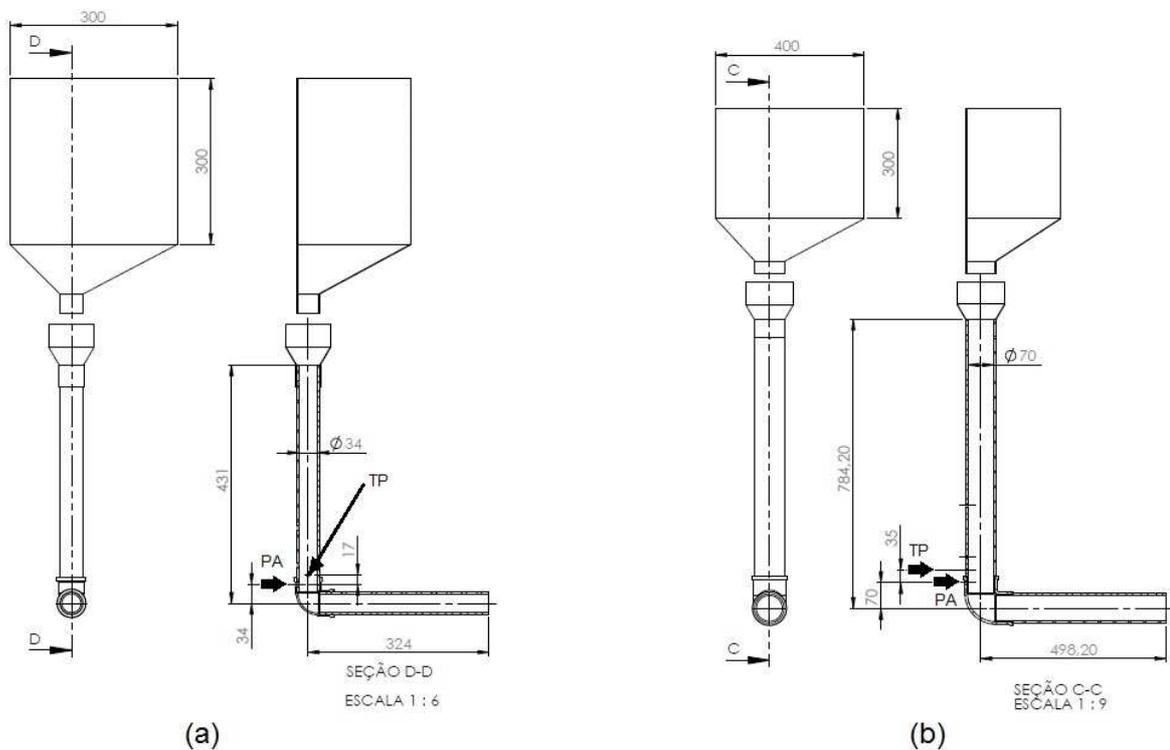


Figura 3.1 – Dimensões das válvulas L: (a) 34 mm de diâmetro, (b) 70 mm. Sendo: TP tomada de pressão e PA ponto de aeração.

No que diz respeito à nomenclatura em inglês para o tubo descendente, *downcomer* e *standpipe*, dependendo do autor denomina-se o tubo vertical da válvula L através de um desses dois termos. *Downcomer* é um elemento crucial em sistemas de circulação pneumática de sólidos, sendo que sua função é transferir sólidos de uma zona no topo de baixa pressão para uma zona mais baixa com uma pressão maior, promovendo um selo entre dois reservatórios que ele conecta. (KUNII; LEVENSPIEL, 1991). Por outro lado, *standpipe* é essencialmente um tubo em que as partículas escoam, podendo ser conduzidas pela gravidade contra um gradiente de pressão. (GRACE et al., 1997). Basu (2006) usa esse termo para se

referir a uma câmara de armazenamento de um componente denominada *loop-seal*. De acordo com Grace et al. (1997), *loop-seal* não é uma válvula pois não controla o escoamento de sólidos, e sim um dispositivo que transfere sólidos na mesma taxa de entrada no *standpipe*.



Figura 3.2 – Grampo de metal para o controle de partículas na entrada da válvula L de 34 mm. Sendo: TP tomada de pressão e PA ponto de aeração.

Uma estrutura de aço foi construída para acomodar as válvulas L de diâmetro interno de 34 mm e de 70 mm, junto com seus reservatórios (silos) posicionados a montante e os acessórios para o controle de vazão volumétrica e pressão do ar a ser injetado nas válvulas. A jusante das válvulas há espaço para acomodar os recipientes para coletar os sólidos, possibilitando a sua medição. As válvulas L foram posicionadas de forma a permitir que sejam feitos testes em uma válvula de cada vez, no entanto, é preciso apenas carregar os reservatórios com as partículas desejadas e conectar a mangueira de ar no ponto de aeração desejado. Há quatro pontos possíveis para injeção de ar, um no cotovelo da válvula, a um, dois e quatro diâmetros acima da linha de centro do tubo horizontal. No que diz respeito aos pontos de tomada de pressão, há dois pontos, um a 1,5 diâmetros acima do tubo horizontal e

outro no topo da válvula. Não foram utilizados todos os pontos de injeção de ar nem as tomadas de pressão no presente trabalho, mas a bancada permite que sejam feitos outros estudos com este recurso. Esta estrutura é mostrada na Figura 3.3, pode-se observar que, na saída da válvula, um recipiente foi colocado para coletar as partículas.

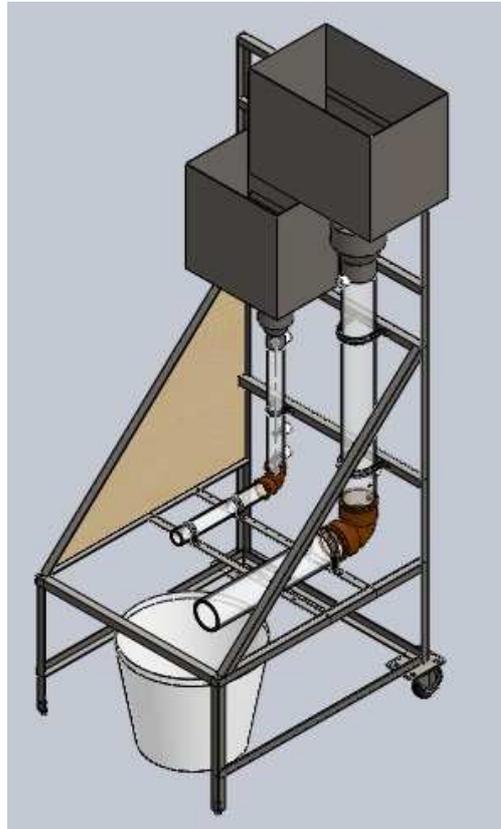


Figura 3.3 – Bancada com as duas válvulas L.

O ponto de aeração, ou seja, o local no qual será injetado o ar comprimido, foi posicionado no tubo vertical a uma distância de um diâmetro acima do centro do tubo horizontal. Outros estudos usam uma dimensão fixa para todas as válvulas (independente das dimensões da válvula) mas considerou-se que dessa forma, utilizando um ponto de aeração proporcional ao seu tamanho, a comparação entre os resultados seja mais fácil.

As válvulas possuem um ponto para tomada de pressão próxima ao ponto de injeção de ar. A queda de pressão é medida entre este ponto e a atmosfera, dessa forma pode-se assumir que a queda de pressão é em relação à entrada da válvula (topo do tubo vertical) ou em relação à saída (tubo horizontal). Para a válvula L de 70 mm a tomada de pressão está localizado a 35 mm acima do ponto de aeração e, para a válvula de 34 mm, está a 17 mm acima do ponto de aeração. Tanto para o ponto de aeração quanto para a tomada de pressão,

um suporte de acrílico foi colado no tubo para poder fixar uma conexão. Porém, para inserir ar na válvula foi feito um furo de diâmetro 4 mm enquanto para medir a pressão o furo possui 1 mm, para não haver recirculação de ar (efeito de cavidade) que prejudicasse a medição.

A vazão volumétrica de ar inserida é medida através de dois rotômetros. Um deles de marca Luft, possui uma faixa de medição de 0,25 a 2,5 m³/h com resolução de 0,125 m³/h (incerteza de $\pm 5\%$ de fundo de escala), enquanto o outro é do fabricante AppliTech e possui uma faixa de 30 a 450 LPM (1,8 a 27 m³/h) com uma resolução de 10 LPM (0,6 m³/h). Todas as escalas são para as condições normais, ou seja, 101 kPa e 0 °C. Para medição da queda de pressão foi usado um manômetro do tipo coluna de água com uma faixa de medição de 670 mm e resolução de 1 mm, porém, devido às instabilidades durante as medições, a resolução medida foi de 5 mm, ou seja, devido a oscilação da coluna de água durante os ensaios, cada valor foi medido com um intervalo de 5 mm.

3.3 PROCEDIMENTO DOS TESTES

Antes de iniciar os testes, os sólidos granulares são colocados no reservatório, o grampo é aberto para que a válvula L seja preenchida. A Figura 3.4 ilustra o momento em que as partículas ocupam o *downcomer*. É possível observar que apenas algumas partículas ocuparam o tubo horizontal e, para preencher este tubo, o ar é injetado na válvula com uma vazão volumétrica qualquer para que a válvula esteja pronta para os testes.



Figura 3.4 – *Downcomer* da válvula L sendo enchida com partículas de 1,216 mm.

A Figura 3.5 possui três imagens que mostram a evolução deste procedimento. Os passos descritos até aqui são realizados apenas quando as partículas são colocadas na válvula para iniciar os testes. As ilustrações foram feitas para a válvula de 70 mm e com as partículas de 1,216 mm, para a válvula de 34 mm, o procedimento é o mesmo.

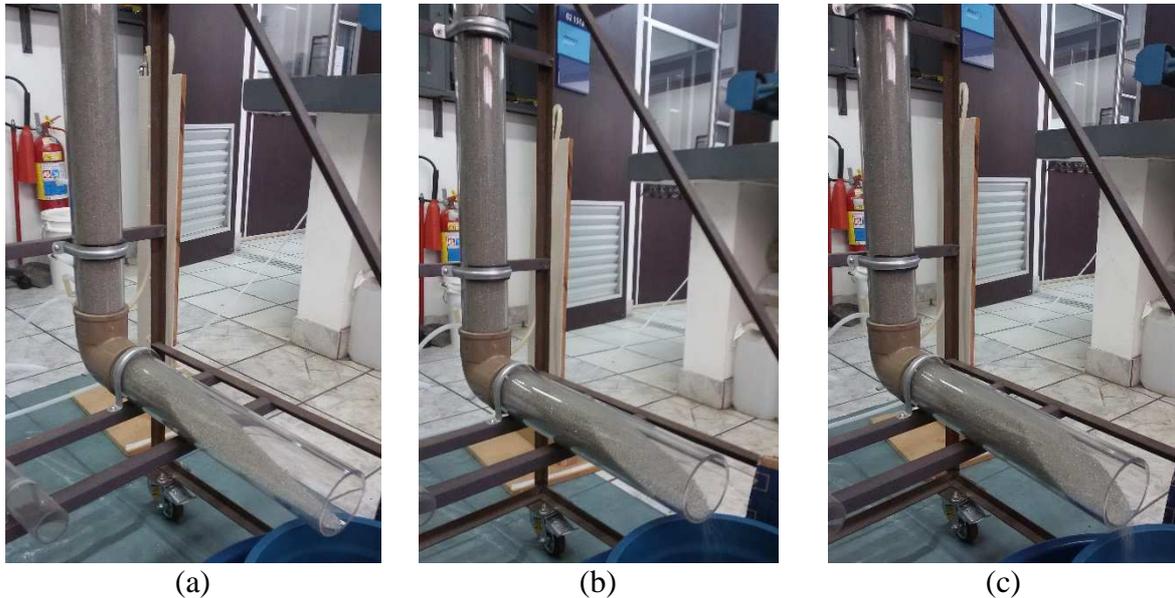


Figura 3.5 – Ordem cronológica do preenchimento do tubo horizontal com partículas de 1,216 mm: (a) momento inicial, (b) momento intermediário e (c) equipamento pronto para os testes.

O teste é iniciado regulando-se a mínima vazão de ar a ser inserido na válvula, ou seja, uma injeção de ar suficiente para que apenas algumas partículas de sólidos escoem dentro da válvula. Depois de ajustada a vazão de ar, a abertura do grampo de metal é ajustada para que a taxa de partículas que estão entrando na válvula para a vazão selecionada seja a mesma que está saindo, para manter constante a altura da coluna de partículas no *downcomer*. Acredita-se que a taxa de sólidos que sai da válvula não seja constante, ela oscila conforme as quedas de pressão geradas pelas ondas no tubo horizontal, dessa forma, essa tarefa exige alguns minutos para que, em média, a taxa de sólidos que entra na válvula L seja a mesma que esteja saindo, o que ocorre ao se observar que a coluna de sólidos apresenta pouca variação em seu nível no tubo vertical. Como esse ajuste é feito de forma visual, este nível precisa ser monitorado durante os testes e, as vezes, é preciso ajustar o grampo durante o ensaio. A Figura 3.6 mostra três situações diferentes da válvula de 34 mm em operação, variando a injeção de ar, com partículas de 1,216 mm. É possível notar que, mesmo com um incremento de injeção de ar constante, a vazão de sólidos tem um aumento muito maior e não linear.

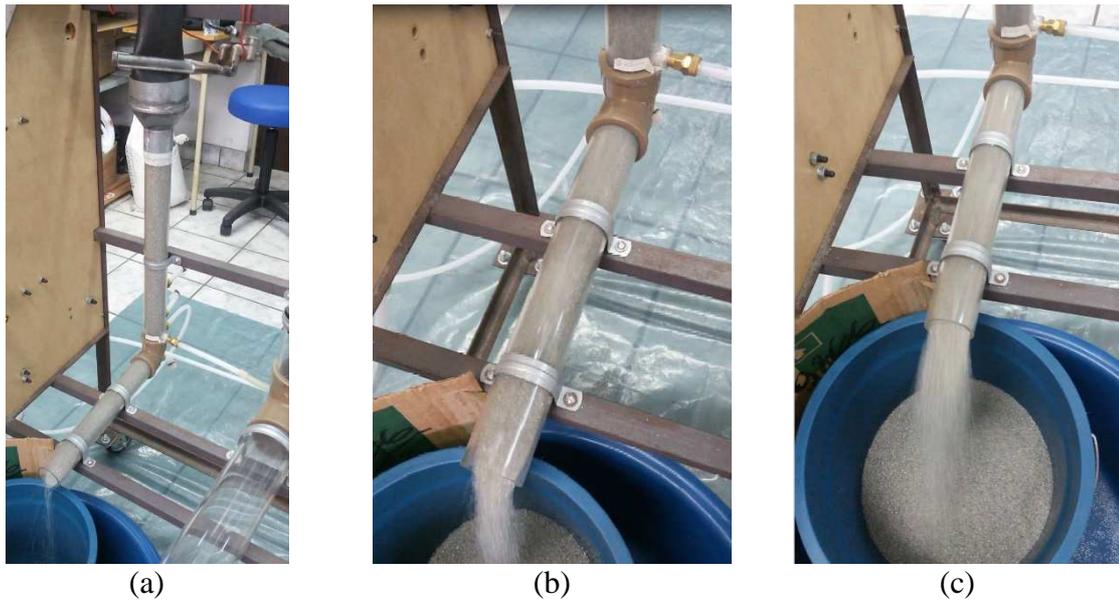


Figura 3.6 – Válvula L de 34 mm em operação com partículas de 1,216 mm: (a) vazão de ar injetado de 30 LPM, (b) 50 LPM e (c) 70LPM.

A taxa de sólidos é determinada coletando-se os sólidos na saída da válvula, medindo-se o intervalo de tempo e pesando-se as partículas desse período. A balança utilizada é produzida pela Bel Engineering e o seu modelo é MARK KL16001, possuindo uma faixa de medição de 0 a 16 kg e com resolução de 0,1 kg. A vazão de ar injetada e a queda de pressão no *downcomer* são anotadas junto com o tempo de medição e a massa de sólidos. Este procedimento é repetido cinco vezes e uma média é feita para cada valor de aeração, procedimento similar ao adotado por Geldart e Jones (1991). Feito isso, a injeção de ar é incrementada em estágios até o máximo valor possível para cada válvula. Este limite foi determinado em função da quantidade de partículas disponíveis pois, para aerações muito altas, não se tem um volume de sólidos suficiente para realizar os testes. Nestas aerações, ao ajustar a vazão, o escoamento de sólidos é tão intenso que, ao se iniciar a contagem de tempo, já não há mais partículas no reservatório nem na válvula, tornando impossível a medição. Outro limite foi a máxima vazão disponível do sistema de ar comprimido utilizado, pois para vazões altas o sistema fica muito instável e não há como garantir que a vazão selecionada permaneça constante.

O intervalo de tempo a ser cronometrado foi de cinco minutos. Considera-se que este tempo é suficiente para minimizar os erros durante os testes. Há perdas de sólidos tanto ao iniciar o teste quanto ao finalizar, principalmente pela dificuldade de sincronismo ao se colocar o recipiente na saída da válvula e iniciar a contagem do cronômetro. Porém, fazendo a medição com um intervalo de tempo de cinco minutos, essas perdas são minimizadas pois o

volume de sólidos é maior. Este tempo foi observado para as menores vazões, porém para as vazões mais altas não foi possível manter este período pois não se tinha a quantidade de sólidos suficiente. O critério de parada para estes casos foi pela capacidade do recipiente em que os sólidos são coletados, independentemente do tempo, pois não havia disponibilidade de partículas nem o reservatório era grande o suficiente para alimentar as válvulas sob estas condições. No entanto, sabe-se que há uma maior incerteza nestas medições.

3.4 TRATAMENTO DOS DADOS

O método descrito na seção 2.7 desenvolve uma equação relacionando três variáveis. O procedimento descrito a seguir é similar a este, e as três variáveis são números adimensionais. Este procedimento pode ser feito para mais do que três números adimensionais, no entanto, visando reduzir a complexidade das análises optou-se por manter apenas duas variáveis independentes e uma variável dependente.

Com os dois números adimensionais calculados com base nos resultados dos testes em um gráfico (por exemplo, os números adimensionais de Reynolds e Arquimedes são calculados com resultados dos testes e são plotados em um gráfico um em relação ao outro), pode-se obter uma equação que descreva estes pontos, mas a forma desta equação não precisa ser uma equação de segundo grau como descrito anteriormente, o critério utilizado será aquela equação que apresentar o menor valor para o R^2 em cada conjunto de pontos. O coeficiente de determinação, ou R^2 , indica o quanto o modelo consegue se ajustar à amostra de dados, este coeficiente varia de 0 a 1 e quanto maior o seu valor, mais o modelo consegue explicar os valores observados. O R^2 é calculado pela razão entre a soma dos quadrados da flutuação dos valores propostos pelo modelo e a soma dos quadrados da flutuação dos valores observados, ambas em relação à média das observações, como é mostrado na equação (3.1).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.1)$$

onde: y_i é o valor observado, \hat{y}_i é o valor estimado de y_i , \bar{y} é a média das observações.

Se houver dois grupos de testes (variando o diâmetro da válvula L e os demais parâmetros iguais, por exemplo) tem-se duas curvas no gráfico. Supondo que a forma da

curva seja próxima de uma equação como a (3.2), então as equações (3.3) e (3.4) mostram, de forma genérica, as duas equações encontradas para as duas curvas e os coeficientes α_1 , α_2 , β_1 e β_2 , são os coeficientes destas curvas.

$$\pi_1 = a \cdot \pi_2^b \quad (3.2)$$

$$\pi_1 = \alpha_1 \cdot \pi_2^{\beta_1} \quad (3.3)$$

$$\pi_1 = \alpha_2 \cdot \pi_2^{\beta_2} \quad (3.4)$$

A equação final, para descrever este escoamento, será obtida ao elencar os coeficientes da equação (3.3) e (3.4) em relação a um terceiro número adimensional. Este número adimensional também é calculado com base nos testes e precisa ter um valor fixo para todos os testes de cada grupo pois é relacionado com todos os testes de uma válvula com uma mesma partícula, sendo uma constante para esta situação. O fluxo de sólidos e a vazão volumétrica injetada na válvula variam em todos os testes de um mesmo conjunto, dessa forma estas variáveis não podem estar neste número adimensional. Como aqui a classificação adotada foi em relação às duas válvulas, se este número adimensional for a divisão do comprimento do tubo horizontal pelo diâmetro da válvula, para cada grupo, este será uma constante.

Para este ajuste, os coeficientes α_1 , α_2 , são plotados pelos seus respectivos valores de π_3 e a equação que descreva esta curva é substituída pelo coeficiente a da equação (3.2). O mesmo procedimento é feito para os coeficientes β_1 e β_2 em relação a π_3 e, após encontrar a equação para a curva descrita por estes pontos, ela é substituída para o coeficiente b na equação (3.2). As equações (3.5) e (3.6) representam as equações, de forma genérica para este caso, que ajusta os coeficientes a e b . Nota-se que pelo fato de haver apenas dois grupos, a equação encontrada por α_1 , α_2 e β_1 , β_2 será uma reta. No entanto, se houver mais variações das variáveis, resultará em mais coeficientes α e β fazendo com que as equações (3.5) e (3.6) não sejam uma equação de primeiro grau. Por exemplo, se houver duas válvulas e dois tamanhos de partículas, haverá quatro pontos e a equação que melhor se ajusta aos pontos pode ser uma equação de segundo grau.

$$a = A_1 \cdot \pi_3 + A_2 \quad (3.5)$$

$$b = B_1 \cdot \pi_3 + B_2 \quad (3.6)$$

Substituindo as equações (3.5) e (3.6) pelos seus respectivos coeficientes na equação (3.2), tem-se uma equação final que representa os valores de π_1 em função de π_2 e π_3 , ou seja, uma equação que contempla os dados experimentais. A equação (3.7) mostra a forma geral desta equação. O fluxo de massa, G_s , deve estar em π_1 , portanto, substituindo os números adimensionais pelas suas respectivas variáveis e isolando o fluxo de massa, tem-se uma correlação genérica para esta variável.

$$\pi_1 = a \cdot \pi_2^b = (A_1 \cdot \pi_3 + A_2) \cdot \pi_2^{(B_1 \cdot \pi_3 + B_2)} \quad (3.7)$$

Para que este procedimento resulte em uma equação que represente os dados experimentais, é preciso que as variáveis selecionadas para calcular os números adimensionais sejam realmente importantes para o processo. Se as variáveis não são aquelas que descrevem o processo, o cruzamento dos números adimensionais obtidos não irá ter relação com o fenômeno entre si e, por consequência, a equação final não terá sensibilidade para descrever o fluxo de massa, G_s .

Após o cálculo das correlações, os valores calculados por intermédio da correlação proposta e aqueles oriundos dos testes serão analisados utilizando o erro médio quadrático (s^2), de forma que seja possível avaliar qual correlação possui um melhor coeficiente de ajuste em relação aos dados experimentais. O erro médio quadrático é a média dos quadrados da flutuação do valor observado em torno do valor estimado, como é mostrado na equação (3.8). Quanto menor este parâmetro mais próximo os valores estimados estarão dos valores observados.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)^2}{n} \quad (3.8)$$

onde: y_i é o valor observado, \hat{y}_i é o valor estimado de y_i , e n é o número de observações.

Santoyo et al. (2010) realizaram um estudo similar para achar a equação do fluxo de massa de uma válvula S. Os autores calcularam três números adimensionais considerando o diâmetro dos sólidos, massa específica dos sólidos, diâmetro horizontal da válvula S, pressão

do sistema e a velocidade superficial do fluido injetado. Então, conforme seus dados experimentais e seus números adimensionais foi aplicado um método algébrico (*Structural Equation Modeling Method* - SEM) para que fosse encontrada uma expressão para o cálculo do fluxo de sólidos. Válvula S é um dispositivo similar à válvula L, também utilizada para transportar sólidos granulares, como cereais, com o auxílio de um fluido, em um ambiente com pressão controlada. (SANTOYO et al., 2010).

3.5 CÁLCULO DOS NÚMEROS ADIMENSIONAIS

A Tabela 3.2 faz um levantamento das variáveis utilizadas em outros estudos sobre o tema. Observa-se que não há unanimidade entre os pesquisadores na seleção das variáveis, devido à complexidade do processo.

Tabela 3.2 – Variáveis utilizadas em outros estudos pesquisados.

(continua)

Variável			Autor
Δp_{DC}	Queda de pressão no tubo vertical	Pa	(SMOLDERS; BAEYENS, 1995)
Δp_{LV}	Queda de pressão no tubo horizontal	Pa	(DAOUS; AL-ZAHRANI, 1998); (SMOLDERS; BAEYENS, 1995)
μ	Viscosidade do ar	N s/m ²	(GELDART; JONES, 1991); (SMOLDERS; BAEYENS, 1995)
A_o	Abertura da válvula	m ²	(YANG; KNOWLTON, 1993)
D	Diâmetro da válvula L	m	(DAOUS; AL-ZAHRANI, 1998); (GELDART; JONES, 1991); (YANG; KNOWLTON, 1993); (SMOLDERS; BAEYENS, 1995)
dp	Diâmetro da partícula	m	(DAOUS; AL-ZAHRANI, 1998); (GELDART; JONES, 1991); (SMOLDERS; BAEYENS, 1995)
d_{sv}	Média da relação superfície/volume do diâmetro das partículas	m	(SMOLDERS; BAEYENS, 1995)
G_s	Fluxo de massa de sólidos	kg/(m ² s)	(DAOUS; AL-ZAHRANI, 1998); (GELDART; JONES, 1991); (YANG; KNOWLTON, 1993); (SMOLDERS; BAEYENS, 1995)
L_{DC}	Comprimento vertical da válvula L	m	(SMOLDERS; BAEYENS, 1995)
L_{LV}	Comprimento horizontal da válvula L	m	(DAOUS; AL-ZAHRANI, 1998); (YANG; KNOWLTON, 1993); (SMOLDERS; BAEYENS, 1995)
Q_{ent}	Vazão de ar que entra pelo topo da válvula	m ³ /s	(YANG; KNOWLTON, 1993)
Q_{ext}	Vazão volumétrica de ar injetado	m ³ /s	(GELDART; JONES, 1991); (YANG; KNOWLTON, 1993); (SMOLDERS; BAEYENS, 1995)

Tabela 3.3 – Variáveis utilizadas em outros estudos pesquisados.

(conclusão)

U_{ext}	Velocidade superficial externa	m/s	(DAOUS; AL-ZAHRANI, 1998); (GELDART; JONES, 1991)
U_{mf}	Velocidade mínima fluidização	m/s	(GELDART; JONES, 1991); (SMOLDERS; BAEYENS, 1995)
U_t	Velocidade terminal da partícula	m/s	(YANG; KNOWLTON, 1993)
V_r	Velocidade relativa entre os sólidos e o gás no <i>downcomer</i>	m/s	(SMOLDERS; BAEYENS, 1995)
ρ	Massa específica do ar	kg/m ³	(GELDART; JONES, 1991); (SMOLDERS; BAEYENS, 1995)
ρ_B	Massa específica efetiva	kg/m ³	(GELDART; JONES, 1991)
ρ_P	Massa específica da partícula	kg/m ³	(GELDART; JONES, 1991); (YANG; KNOWLTON, 1993)

Seguindo a forma de tratar os dados descrita na seção 3.4, observa-se a necessidade de haver três números adimensionais, sendo que um número adimensional é constante, ou seja, ele deve depender apenas de variáveis que não variem a cada teste, mas apenas em cada grupo de experimentos. Uma possibilidade é a massa específica e o diâmetro da partícula, as quais, para cada conjunto de testes com uma mesma partícula, são constantes (essa condição é necessária para relacionar os coeficientes a e b , da equação (3.2), com o terceiro número adimensional).

Dessa forma, na seção 3.5.1 são discutidas as variáveis selecionadas e nas seções posteriores, são apresentados os cálculos propriamente ditos.

3.5.1 Variáveis Selecionadas

São necessários três números adimensionais, de um total de seis parâmetros dimensionais, ou seja, seis variáveis do processo. Fox et al. (2010) advertem para que não seja selecionada uma variável potência de outra, como um comprimento (m) e uma área (m²), nos parâmetros repetentes. O teorema de Buckingham estabelece que, para calcular um parâmetro adimensional, são necessárias quatro variáveis, sendo que três variáveis são mantidas em todos os grupos de números adimensionais, chamadas de parâmetros repetentes, e a outra variável a ser combinada, que varia em cada cálculo, é chamada de parâmetro remanescente. Portanto, não é possível utilizar-se todas as variáveis que os outros autores pesquisaram, é preciso selecionar algumas. Dessa forma, em um primeiro momento, selecionou-se as seguintes variáveis do processo como parâmetros repetentes para compor o primeiro grupo de números adimensionais:

- a) D – Diâmetro da válvula L (m);
- b) Δp_{DC} – Queda de pressão no tubo descendente (Pa);
- c) Q_{ext} – vazão de ar externa, aeração, (m³/s).

E as demais variáveis escolhidas foram:

- a) L_H – Comprimento do tubo horizontal da válvula L (m);
- b) G_S – fluxo de massa (kg/(m² s));
- c) U_{mf} – velocidade de mínima fluidização (m/s).

Porém, foram omitidas algumas variáveis importantes do processo, com base nos outros estudos sobre o tema, tais como o diâmetro da partícula (d_p), massa específica da partícula e do ar (ρ_p e ρ) e viscosidade do ar (μ). O cálculo da velocidade de mínima fluidização, mostrado anteriormente (Equações 2.1 a 2.3) faz uso de dois números adimensionais conhecidos, de Reynolds e de Arquimedes. Por esse fato, aliado ao uso destes números adimensionais associados à mecânica dos fluidos, espera-se com essas variáveis conseguir bons resultados para descrever o fluxo de massa de uma válvula L. Dessa forma, para que esses números adimensionais possam ser calculados é preciso acrescentar as seguintes variáveis: aceleração da gravidade (g), viscosidade do ar (μ) e massa específica do ar (ρ). A escolha da aceleração da gravidade justifica-se, de acordo com Yang e Knowlton (1993), pelo fato do escoamento do tubo vertical depender desta variável e não de seu comprimento.

Assumindo que a velocidade de mínima fluidização está relacionada com a massa específica, diâmetro da partícula e viscosidade do ar (variáveis que estão presentes no estudo), essa variável foi desconsiderada. A vazão volumétrica inserida foi convertida em velocidade superficial inserida na válvula (U_{ext}), culminando em um segundo grupo de variáveis, onde os parâmetros repetentes são:

- a) D – Diâmetro da válvula L (m);
- b) ρ – Massa específica do ar (kg/m³);
- c) μ – Viscosidade do ar (N s/m²).

As demais variáveis escolhidas foram:

- a) L_H – Comprimento do tubo horizontal da válvula L (m);
- b) G_s – fluxo de massa ($\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$);
- c) U_{ext} – velocidade do ar inserida na válvula L (m/s);
- d) g – aceleração da gravidade (m/s^2).

Em uma terceira tentativa de seleção de variáveis, acrescentou-se o diâmetro da partícula (d_p), a massa específica da partícula (ρ_p) e manteve-se a velocidade do ar inserido na válvula. Dessa forma, os parâmetros repetentes do terceiro grupo de números adimensionais são:

- a) d_p – Diâmetro da partícula (m);
- b) ρ_p – Massa específica da partícula (kg/m^3);
- c) U_{ext} – velocidade do ar inserido na válvula L (m/s).

As demais variáveis escolhidas foram:

- a) G_s – fluxo de massa ($\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$);
- b) g – aceleração da gravidade (m/s^2).
- c) D – Diâmetro da válvula L (m).

3.5.2 Cálculo do Primeiro Grupo de Números Adimensionais

Após a definição dos parâmetros, foi utilizado o teorema de PI de Buckingham para o cálculo dos números adimensionais. A equação (3.9) mostra as variáveis repetidas junto com o parâmetro dimensional G_s (fluxo de massa) para achar o primeiro número adimensional. A equação (3.10) traz a mesma equação (3.9) mas na forma de suas unidades fundamentais. Dessa forma, separando os expoentes de M , L e t em seguida os igualando a zero, tem-se que $a=-2$, $b=1$ e $c=-1$.

$$\pi_1 = D^a \cdot Q_{ext}^b \cdot \Delta p_{DC}^c \cdot G_s \quad (3.9)$$

$$\pi_1 = (L)^a \cdot \left(\frac{L^3}{t}\right)^b \cdot \left(\frac{M}{L \cdot t^2}\right)^c \cdot \left(\frac{M}{t \cdot L^2}\right) = M^0 \cdot L^0 \cdot t^0 \quad (3.10)$$

Substituindo os expoentes e reorganizando a equação (3.9), o primeiro número adimensional é encontrado (equação (3.11)).

$$\pi_1 = \frac{Q_{ext} \cdot Gs}{\Delta p_{DC} \cdot D^2} \quad (3.11)$$

Realizando o mesmo método para L_H e U_{mf} encontrou-se os outros dois números adimensionais como é mostrado nas equações (3.12) e (3.13).

$$\pi_2 = \frac{D^2 \cdot U_{mf}}{Q_{ext}} \quad (3.12)$$

$$\pi_3 = \frac{L_h}{D} \quad (3.13)$$

3.5.3 Cálculo do Segundo Grupo de Números Adimensionais

Através do mesmo procedimento da seção anterior, porém levando em consideração o segundo grupo de variáveis, encontrou-se os números adimensionais mostrados nas equações (3.14) a (3.17).

$$\pi_1 = \frac{D \cdot Gs}{\mu} \quad (3.14)$$

$$\pi_2 = \frac{U_{ext} \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad (3.15)$$

$$\pi_4 = \frac{g \cdot D^3 \cdot \rho^2}{\mu^2} \quad (3.16)$$

$$\pi_5 = \frac{L_h}{D} \quad (3.17)$$

É fácil notar que o π_2 é o número de Reynolds e, não tão intuitivo, que o π_4 é o número de Arquimedes. O π_1 também pode ser interpretado como sendo o número de Reynolds pois o fluxo de massa ($\text{kg/m}^2 \text{ s}$) possui a mesma unidade que a multiplicação da massa específica (kg/m^3) e a velocidade (m/s). Em π_4 a massa específica ao quadrado pode ser escrita pelo produto da massa específica do ar pela diferença entre a massa específica da

partícula e a do ar, conforme a equação (3.18). Finalmente, substituindo o diâmetro da válvula pelo diâmetro da partícula, para que o estudo contemple essa variável também, temos a equação (3.19) que é o número de Arquimedes.

$$\pi_4 = \frac{g \cdot D^3 \cdot \rho \cdot (\rho_p - \rho)}{\mu^2} \quad (3.18)$$

$$\pi_4 = \frac{g \cdot dp^3 \cdot \rho \cdot (\rho_p - \rho)}{\mu^2} \quad (3.19)$$

Ainda há um número adimensional extra, lembrando que a metodologia proposta para tratar os dados experimentais precisa de três números adimensionais. Optou-se por dividir o π_5 pelo π_4 . O resultado dessa divisão resultará em outro número adimensional, π_3 , mostrado na equação (3.20).

$$\pi_3 = \frac{L_h}{D} \cdot \frac{\mu^2}{g \cdot dp^3 \cdot \rho \cdot (\rho_p - \rho)} \quad (3.20)$$

3.5.4 Cálculo do Terceiro Grupo de Números Adimensionais

Com as variáveis do terceiro grupo de números adimensionais, calculando conforme seções anteriores, tem-se os números mostrados nas equações (3.21 a 3.23).

$$\pi_1 = \frac{Gs}{\rho_p \cdot U_{ext}} \quad (3.21)$$

$$\pi_2 = \frac{g \cdot d_p}{U_{ext}^2} \quad (3.22)$$

$$\pi_3 = \frac{D}{d_p} \quad (3.23)$$

O π_2 vem a ser um dos parâmetros proposto por Glicksman (1984) e é o inverso do número de Froude. Este número adimensional é significativo para escoamentos com efeitos de superfície livre e pode ser interpretado como a razão entre as forças de inércia e as forças de

gravidade. (FOX et al., 2010). O π_3 é o inverso de um número adimensional usado por Glicksman (1984).

A Tabela 3.4 traz um resumo com os números adimensionais que serão utilizados nas análises deste estudo.

Tabela 3.4 – Resumo com os números adimensionais calculados.

Primeiro grupo de números adimensionais	Segundo grupo de números adimensionais	Terceiro grupo de números adimensionais
$\pi_1 = \frac{Q_{ext} \cdot G_s}{\Delta p_{DC} \cdot D^2}$	$\pi_1 = \frac{D \cdot G_s}{\mu}$	$\pi_1 = \frac{G_s}{\rho_p \cdot U_{ext}}$
$\pi_2 = \frac{D^2 \cdot U_{mf}}{Q_{ext}}$	$\pi_2 = \frac{U_{ext} \cdot D \cdot \rho}{\mu}$	$\pi_2 = \frac{g \cdot d_p}{U_{ext}^2}$
$\pi_3 = \frac{L_h}{D}$	$\pi_3 = \frac{L_h}{D} \cdot \frac{\mu^2}{g \cdot dp^3 \cdot \rho \cdot (\rho_p - \rho)}$	$\pi_3 = \frac{D}{d_p}$

3.6 ANÁLISE FATORIAL DE DOIS NÍVEIS

Uma planilha foi criada com o procedimento proposto por Barros Neto et al. (2001), de maneira tal que, ao se completar a matriz de planejamento com os dados dos testes, os efeitos principais e o efeito combinado das variáveis sobre o fluxo de sólidos G_s possam ser calculados rapidamente.

Apesar da grande quantidade de testes realizados, não é possível analisar todas as variáveis da válvula L por meio deste procedimento pois, para analisar o comprimento horizontal da válvula, por exemplo, devem ser realizados testes com a mesma válvula com dois comprimentos diferentes. As variáveis que apresentaram variação conforme descrito foram o diâmetro da partícula, a vazão volumétrica de ar injetado na válvula e o diâmetro da válvula L, a variável resultante destes parâmetros é a taxa de massa. A vazão de ar é substituída pela velocidade do ar injetado, que é calculado em função do diâmetro da válvula, com o intuito de tornar a comparação deste parâmetro mais real.

Pelo fato de haver apenas três fatores de entrada (velocidade do ar, diâmetro da partícula e diâmetro da válvula) e um de saída (taxa de massa), a análise fatorial de dois níveis deve ser estendida para uma análise fatorial de três níveis e, como resultado, a matriz baseada na tabela de níveis ao invés de ser 4x4 torna-se 8x8 pois, por haver mais uma variável, é preciso calcular a relação entre cada variável isolada, entre cada duas variáveis e entre as três variáveis.

Como este estudo visa uma análise através dos números adimensionais, uma análise destes números será feita pelo mesmo método, substituindo as variáveis, como a velocidade e diâmetro da partícula pelos três grupos adimensionais utilizados para o cálculo da correlação.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

A Figura 4.1 mostra um gráfico com os resultados dos testes para as duas válvulas L e os dois tamanhos de partículas, junto com os resultados encontrados em Geldart e Jones (1991). A legenda da figura segue o código: L seguido pelo diâmetro da válvula e entre parênteses o diâmetro da partícula. Os dados do estudo de Geldart e Jones (1991) foram obtidos através de um gráfico na bibliografia consultada e por intermédio do programa *GetData Graph Digitizer*. A figura do gráfico é importada para este software, a escala dos eixos x e y são informadas, em seguida é selecionada a curva (ou pontos) e o programa informa as coordenadas. Estas foram as coordenadas colocadas no gráfico junto com os resultados dos testes do presente trabalho. Alguns resultados para a válvula de 70 mm deste estudo foram omitidos para melhorar a visualização do gráfico, a maior taxa de massa que estes autores acharam foi de 2,76 kg/s para uma vazão $0,92 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ para essa válvula. Geldart e Jones (1991) usaram uma válvula com diâmetro interno de 40 mm e outra de 70 mm, ambas utilizaram como partícula areia com diâmetro de 0,28 mm.

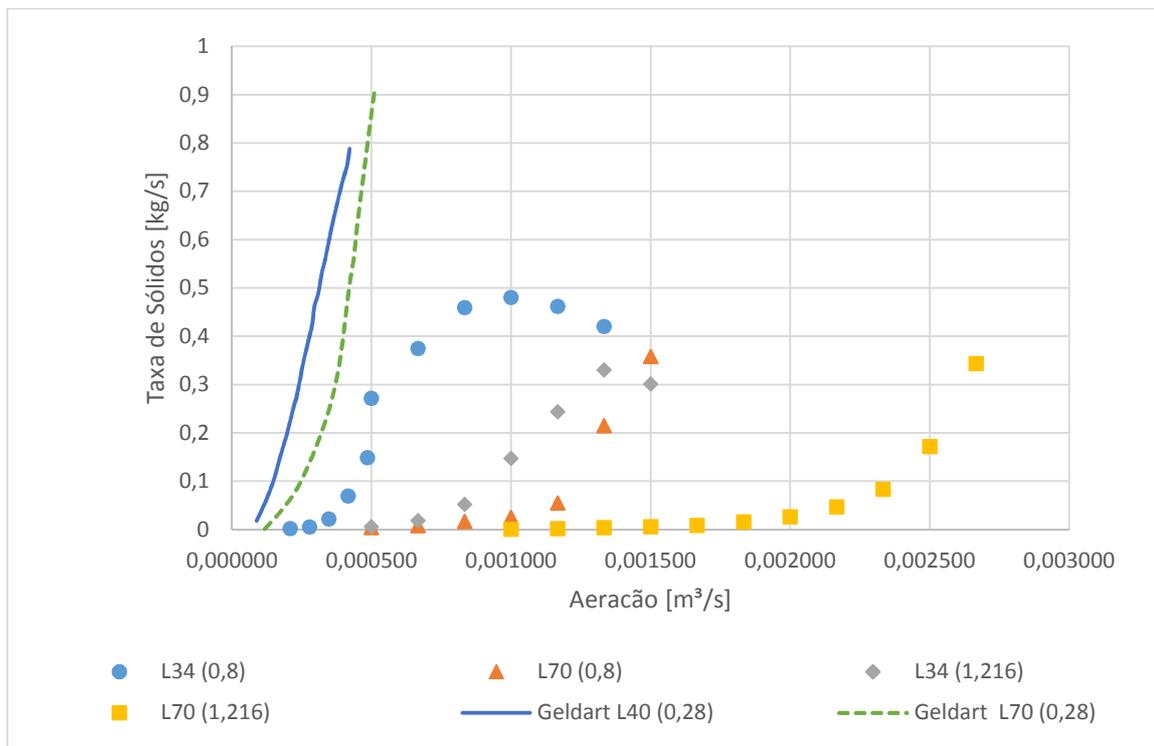


Figura 4.1 – Resultados dos testes deste estudo comparados com os de Geldart e Jones (1991), mostrando a taxa de massa em relação à vazão volumétrica inserida na válvula (Q_{ext}).

No que diz respeito à relação entre taxa de massa de partículas e vazão volumétrica de ar injetado na válvula, nos testes deste estudo foi necessária uma vazão maior de ar para atingir as mesmas taxas de sólidos para uma partícula com diâmetro maior (conduzindo as curvas para a direita no gráfico). Como citado anteriormente, Grace et al. (1997) e Geldart e Jones (1991) observaram a mesma relação. Geldart e Jones (1991) complementaram dizendo que, ao aumentar o diâmetro da válvula L, é necessária uma vazão de ar maior para manter a mesma taxa de sólidos. As quatro curvas que representam os testes deste trabalho respeitaram esta relação.

Para os testes na válvula de 34 mm, com as duas partículas, é possível observar uma aeração que corresponde à máxima taxa de sólidos e, ao ser incrementada a aeração, obteve-se uma diminuição na taxa de sólidos. Geldart e Jones (1991) já haviam observado este fenômeno. Grace et al. (1997) explicam que, ao ocorrer bolhas no *standpipe*, estas impedem o escoamento dos sólidos e causam uma redução na taxa de sólidos. As bolhas ocorrem devido à velocidade do ar no *standpipe* estar próxima à velocidade de mínima fluidização. A velocidade de ar em que ocorreu a queda na taxa de sólidos, calculada em relação ao diâmetro interno do tubo da válvula, foi 2,7 vezes maior do que a velocidade de mínima fluidização. No entanto, é possível que a porção de ar que subiu pelo *standpipe* (conforme esquema apresentado na Figura 2.4) estivesse próximo da velocidade de mínima fluidização da partícula. Porém, durante os testes não se observou bolhas de ar geradas pela injeção de ar, nem que o *standpipe* estivesse fluidizado.

Supõe-se que a válvula de 70 mm deve apresentar uma queda na taxa de sólidos com o aumento da aeração. No entanto, as vazões de ar injetadas nesta válvula não foram suficientes para atingir tal comportamento. Acredita-se que a faixa de vazões necessária para atingir esta queda da taxa de sólidos para a válvula de 70 mm seja bem maior que a aqui apresentada pois, comparando com os gráficos da válvula de 34 mm, a válvula de 70 mm está apenas se afastando do abcissa, patamar que foi atingido pela válvula de 34 mm no segundo ou terceiro ponto de seu gráfico e a aeração foi incrementada bastante até atingir a queda de sólidos a partir deste ponto.

Os resultados deste trabalho, comparados aos de Geldart e Jones, apresentaram um comportamento diferente quanto à taxa de sólidos em função da aeração, pois em Geldart e Jones se atingiu taxas de sólidos mais altas para as mesmas vazões volumétricas de ar do presente estudo. No entanto, uma explicação para este comportamento pode ser a diferença de diâmetro e material da partícula e também o ponto de injeção de ar. Conforme sugerido por Geldart e Jones (1991) e Grace et al. (1997), ao aumentar o tamanho das partículas deve-se

inserir uma quantidade maior de fluido na válvula para se atingir a mesma taxa de sólidos. Geldart e Jones injetaram o ar 50 mm acima do centro do tubo, o que representa 1,25 diâmetros da válvula L acima do centro do tubo horizontal para a válvula de 40 mm, 0,71 para válvula de 70 mm, enquanto neste estudo esta relação foi de 1). Em um outro gráfico do estudo do Geldart e Jones (1991) é mostrada a influência dos pontos de injeção de fluido na válvula L , porém neste gráfico fica claro que, ao se aumentar o tamanho da partícula, é preciso aumentar a vazão do fluido injetado na válvula para manter a taxa de sólidos. Este gráfico é mostrado na Figura 4.2. É possível observar uma semelhança qualitativa das curvas ao aumentar o diâmetro das partículas com os resultados deste trabalho e os dados de Geldart e Jones (1991).

Os padrões de escoamento observados no tubo horizontal da válvula L foram próximos aos que Yang e Knowlton (1993), Geldart e Jones (1991), Smolders e Baeyens (1995) visualizaram. Porém, não foi possível medir a frequência das dunas para classificar a aeração (em baixa, média e alta) como Geldart e Jones (1991) sugere. Os apêndices A mostram tabelas com todos os resultados dos testes realizados.

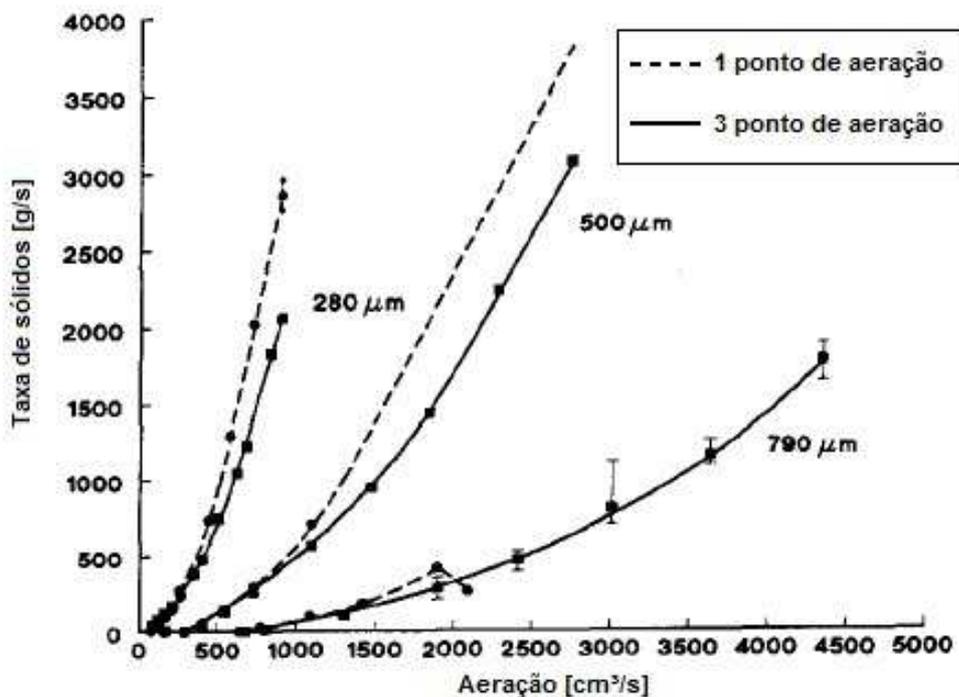


Figura 4.2 – Comparação dos testes para uma válvula de 70 mm utilizando as areias de diâmetro de 0,28 mm, 0,5 mm e 0,79 mm.

Fonte: Adaptado de Geldart e Jones (1991).

Nas próximas seções, são apresentados os resultados da aplicação das correlações existentes aos resultados dos testes deste trabalho. O resultado da análise fatorial de dois níveis é também apresentado e os números adimensionais são calculados conforme a metodologia proposta, para os dois grupos de variáveis.

4.1 CORRELAÇÕES EXISTENTES

As correlações propostas por outros autores (equações (2.5) a (2.8)) foram verificadas com os dados obtidos nos testes deste estudo, porém, nenhum conjunto de dados apresentou um resultado próximo ao que as correlações sugerem. A Figura 4.3 mostra os resultados obtidos neste estudo os obtidos pela correlação da equação (2.6). Observa-se uma semelhança com os dados quando a velocidade do ar injetada na válvula é mais baixa. Para a válvula de 34 mm, representada pelos círculos e pelos losangos, nota-se a queda de sólidos com o aumento da aeração.

Alguns autores não disponibilizaram com clareza os seus resultados. No entanto, as vazões máximas de ar injetadas nas válvulas de Geldart e Jones (1991) foram inferiores às do presente estudo. Já foi citado anteriormente que a taxa de sólidos do estudo consultado foi maior quando comparado com a aeração. Fato que pode ser a origem das diferenças desta correlação, mas mesmo assim não explica a razão da diferença entre as outras correlações.

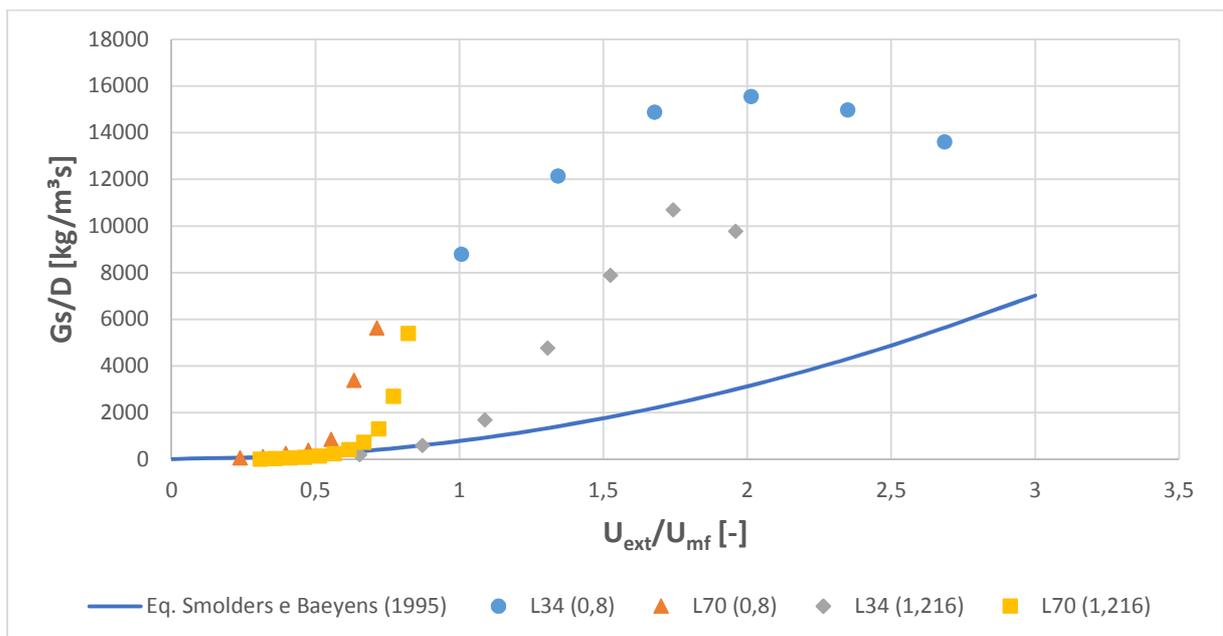


Figura 4.3 – Gráfico mostra a relação entre G_s/D em relação a U_{ext}/U_{mf} , fazendo um comparativo com a correlação proposta na equação (2.6).

Um fato que não parece ter sido encontrado pelos outros estudos foi a máxima taxa de sólidos, ou seja, evidência de que houve uma determinada vazão de ar injetada na válvula, acima da qual ocorreu uma diminuição de sua taxa de sólidos. Esta situação foi observada na Figura 4.1 em que houve uma queda na taxa de sólidos da válvula de 34 mm para os dois diâmetros de partículas. Este decréscimo da taxa não parece ser observado em nenhuma correlação da literatura, pois as suas respectivas curvas resultantes não descrevem a forma de “sino” que representa esta diminuição da taxa de sólidos. No entanto, observou-se que as correlações não descrevem com precisão. Os dados são apresentados em um gráfico e a correlação apresenta um valor médio de uma faixa. Entende-se que, mesmo a curva tendendo a um “sino”, os resultados deste estudo deveriam ficar próximos destas correlações. Uma possível razão para explicar esta diferença é o uso de diferentes materiais e diâmetros das partículas. De uma forma geral, os outros estudos utilizaram na maior parte dos testes areia com diâmetros médios menores do que no presente estudo.

Smolders e Baeyens (1995) comentam que a equação (2.6) superestima os dados para velocidades baixas e omite a influência do tamanho da partícula. Foi observado pelo seu estudo que, para uma mesma razão de velocidades, a relação Gs/D aumenta com o tamanho da partícula. Então é sugerida, por Smolders e Baeyens (1995) a correlação da equação (2.7) em que o diâmetro da partícula foi considerado. No entanto, nem com esta variável, foi possível validar os dados dos testes deste trabalho por meio de uma correlação de um outro estudo.

4.2 PRIMEIRO GRUPO DE NÚMEROS ADIMENSIONAIS

O primeiro grupo de números adimensionais foi calculado com os resultados dos testes (Tabela 4.1). Conforme citado, o π_3 é uma constante para os testes da válvula L de 34 mm, o mesmo ocorre com a válvula de 70 mm (independe da partícula), pois é a divisão do comprimento do tubo horizontal pelo diâmetro da válvula.

Tabela 4.1 – Números adimensionais do primeiro grupo, calculados com base nos testes.

Válvula L 34 mm, Partícula 0,8 mm			
Aeração	π_1	π_2	π_3
[m3/s]	[-]	[-]	[-]
0.00021	0.000426	3.035194	9.529412
0.00028	0.000800	2.276395	9.529412
0.00035	0.003498	1.821116	9.529412
0.00042	0.012270	1.517597	9.529412
0.00049	0.028184	1.300797	9.529412
0.00050	0.048880	1.264664	9.529412
0.00067	0.083798	0.948498	9.529412
0.00083	0.120050	0.758798	9.529412
0.00100	0.155597	0.632332	9.529412
0.00117	0.174763	0.541999	9.529412
0.00133	0.201669	0.474249	9.529412

Válvula L 70 mm, Partícula 0,8 mm			
Aeração	π_1	π_2	π_3
[m3/s]	[-]	[-]	[-]
0.00050	0.000432	5.360600	7.117143
0.00067	0.000822	4.020450	7.117143
0.00083	0.001741	3.216360	7.117143
0.00100	0.002509	2.680300	7.117143
0.00117	0.005269	2.297400	7.117143
0.00133	0.020574	2.010225	7.117143
0.00150	0.035202	1.786867	7.117143

Válvula L 34 mm, Partícula 1,216 mm			
Aeração	π_1	π_2	π_3
[m3/s]	[-]	[-]	[-]
0.00050	0.002056	1.949016	9.529412
0.00067	0.006500	1.461762	9.529412
0.00083	0.020163	1.169410	9.529412
0.00100	0.059765	0.974508	9.529412
0.00117	0.110608	0.835293	9.529412
0.00133	0.171287	0.730881	9.529412
0.00150	0.183350	0.649672	9.529412

Válvula L 70 mm, Partícula 1,216 mm			
Aeração	π_1	π_2	π_3
[m3/s]	[-]	[-]	[-]
0.00100	0.000582	4.130700	7.117143
0.00117	0.000913	3.540600	7.117143
0.00133	0.001520	3.098025	7.117143
0.00150	0.002027	2.753800	7.117143
0.00167	0.002719	2.478420	7.117143
0.00183	0.004198	2.253109	7.117143
0.00200	0.006528	2.065350	7.117143
0.00217	0.010153	1.906477	7.117143
0.00233	0.016914	1.770300	7.117143
0.00250	0.033470	1.652280	7.117143
0.00267	0.068891	1.549013	7.117143

Plotando-se os dados de π_1 e π_2 , da tabela 4.1 para os números adimensionais calculados em função dos testes, tem-se a Figura 4.4. Traçando-se a curva que se ajusta aos pontos, na forma da equação (3.1), obtém-se as equações (4.1) a (4.4) para os ensaios utilizando a partícula com diâmetro de 0,8 mm para as válvulas de 34 mm e de 70 mm, e com a partícula de 1,216 mm também para as duas válvulas. O R^2 destas curvas ficou ligeiramente melhor do que para uma função exponencial. A forma da equação (3.1) vem a ser a equação principal pois o que se faz em seguida é encontrar os coeficientes a e b .

$$\pi_{1 \rightarrow L34(0,8)} = a_1 \cdot \pi_2^{b_1} = 0,0352 \cdot \pi_2^{-3,477} \left(R^2 = 0,9032 \right) \quad (4.1)$$

$$\pi_{1 \rightarrow L70(0,8)} = a_2 \cdot \pi_2^{b_2} = 0,2236 \cdot \pi_2^{-3,979} \left(R^2 = 0,9291 \right) \quad (4.2)$$

$$\pi_{1 \rightarrow L34(1,216)} = a_3 \cdot \pi_2^{b_3} = 0,0402 \cdot \pi_2^{-4,386} (R^2 = 0,9833) \quad (4.3)$$

$$\pi_{1L70(1,216)} = a_4 \cdot \pi_2^{b_4} = 0,2485 \cdot \pi_2^{-4,558} (R^2 = 0,9432) \quad (4.4)$$

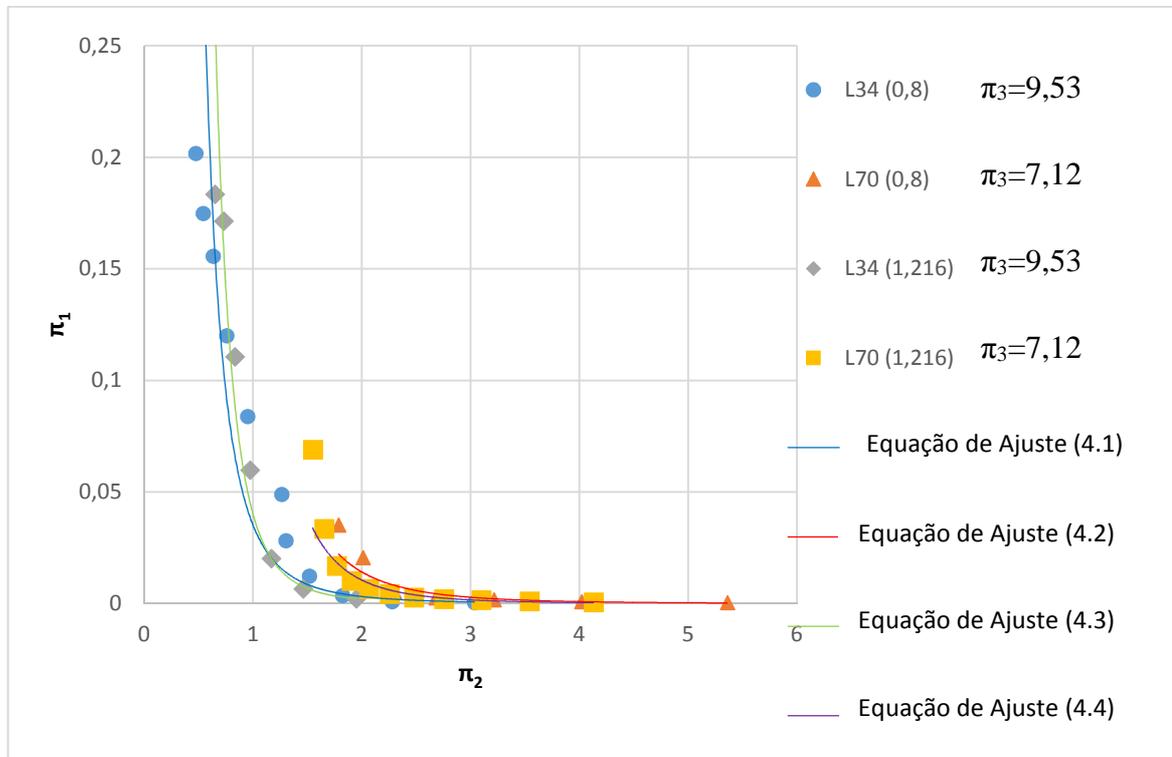


Figura 4.4 – Números adimensionais π_1 versus π_2 , com suas respectivas curvas que se ajustam para cada grupo de ensaios.

Com os coeficientes a_i e b_i das equações (4.1) a (4.4), foram plotados em relação ao π_3 , gerando o gráfico da Figura 4.5. Com o mesmo procedimento que no gráfico anterior, a equação para a curva gerada pelos pontos é obtida. As equações (4.5) e (4.6) mostra o resultado encontrado.

$$a = A_1 \cdot \pi_3 + A_2 = -0,0822 \cdot \pi_3 + 0,8213 (R^2 = 0,9919) \quad (4.5)$$

$$b = B_1 \cdot \pi_3 + B_2 = 0,1397 \cdot \pi_3 - 5,2628 (R^2 = 0,1636) \quad (4.6)$$

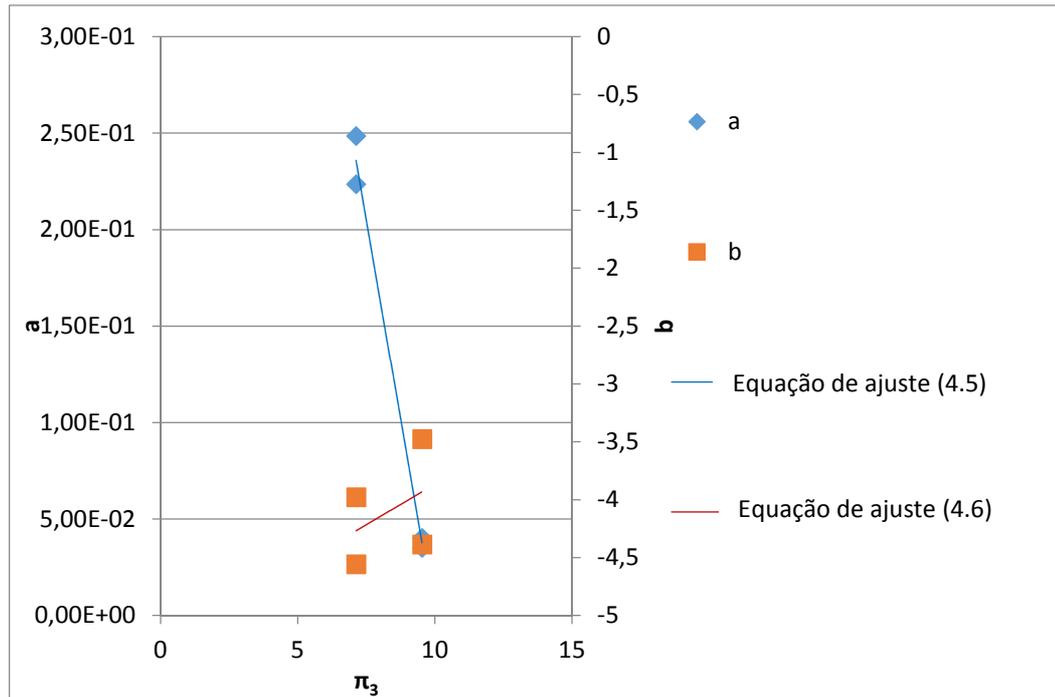


Figura 4.5 – Número adimensional π_3 plotado em relação aos coeficientes a e b .

Substituindo as equações (4.5) e (4.6) nas suas equações de origem (4.1), (4.2), (4.3) ou (4.4), tem-se a equação (4.7). Então, substitui-se os números adimensionais pelas suas equações e isolando o fluxo de massa (G_s), tem-se a equação (4.8).

$$\pi_1 = (-0,0822 \cdot \pi_3 + 0,8213) \cdot \pi_2^{(0,1397\pi_3 - 5,2628)} \quad (4.7)$$

$$G_s = \left[\left(-0,0822 \cdot \frac{L_h}{D} + 0,8213 \right) \cdot \left(\frac{D^2 \cdot U_{mf}}{Q_{ext}} \right)^{(0,1397 \cdot \frac{L_h}{D} - 5,2628)} \right] \cdot \frac{\Delta p_{DC} \cdot D^2}{Q_{ext}} \quad (4.8)$$

A Tabela 4.2 compara os π_1 calculados pela equação (4.7) e aqueles calculados através dos dados dos testes. O π_1 é calculado com o intuito de facilitar o cálculo, sendo que o valor do fluxo de massa é proporcional a este número adimensional para todos os casos. O erro médio quadrático calculado em relação à diferença entre os valores observados e calculados pela correlação, foi de 0,0501 e a média das diferenças entre o π_1 calculado pela equação e o calculado com base nos testes foi de 45,02% (desvio padrão de 44,97%). Considerou-se aceitável este ajuste dos coeficientes aos dados experimentais, considerando a complexidade do processo. O gráfico da Figura 4.6 mostra um comparativo entre os valores de π_1 calculados pela equação 4.7 (linhas pontilhadas) e os valores obtidos nos testes. Nota-se

que as curvas da mesma válvula ficaram sobrepostas pois os coeficientes a e b foram os mesmos (da mesma forma que o valor de π_3 varia apenas com as dimensões das válvulas).

Tabela 4.2 – Números adimensionais calculados pela equação (4.7) e com base nos testes.

Válvula L 34 mm, Partícula 0,8 mm				Válvula L 34 mm, Partícula 1,216 mm			
Aeração	π_1 (Calculado)	π_1 (Testes)	Diferença	Aeração	π_1 (Calculado)	π_1 (Testes)	Diferença
[m3/s]	[-]	[-]	[%]	[m3/s]	[-]	[-]	[%]
0.00021	0.000483	0.000426	13%	0.00050	0.002755	0.002056	34%
0.00028	0.001496	0.000800	87%	0.00067	0.008538	0.006500	31%
0.00035	0.003598	0.003498	3%	0.00083	0.020529	0.020163	2%
0.00042	0.007368	0.012270	40%	0.00100	0.042041	0.059765	30%
0.00049	0.013507	0.028184	52%	0.00117	0.077068	0.110608	30%
0.00050	0.015089	0.048880	69%	0.00133	0.130279	0.171287	24%
0.00067	0.046759	0.083798	44%	0.00150	0.207006	0.183350	13%
0.00083	0.112427	0.120050	6%	Válvula L 70 mm, Partícula 1,216 mm			
0.00100	0.230236	0.155597	48%	Aeração	π_1 (Calculado)	π_1 (Testes)	Diferença
0.00117	0.422064	0.174763	142%	[m3/s]	[-]	[-]	[%]
0.00133	0.713470	0.201669	254%	0.00100	0.000554	0.000582	5%
Válvula L 70 mm, Partícula 0,8 mm				0.00117	0.001071	0.000913	17%
Aeração	π_1 (Calculado)	π_1 (Testes)	Diferença	0.00133	0.001893	0.001520	25%
[m3/s]	[-]	[-]	[%]	0.00150	0.003130	0.002027	54%
0.00050	0.000182	0.000432	58%	0.00167	0.004908	0.002719	81%
0.00067	0.000622	0.000822	24%	0.00183	0.007371	0.004198	76%
0.00083	0.001613	0.001741	7%	0.00200	0.010687	0.006528	64%
0.00100	0.003513	0.002509	40%	0.00217	0.015039	0.010153	48%
0.00117	0.006784	0.005269	29%	0.00233	0.020635	0.016914	22%
0.00133	0.011995	0.020574	42%	0.00250	0.027702	0.033470	17%
0.00150	0.019831	0.035202	44%	0.00267	0.036488	0.068891	47%

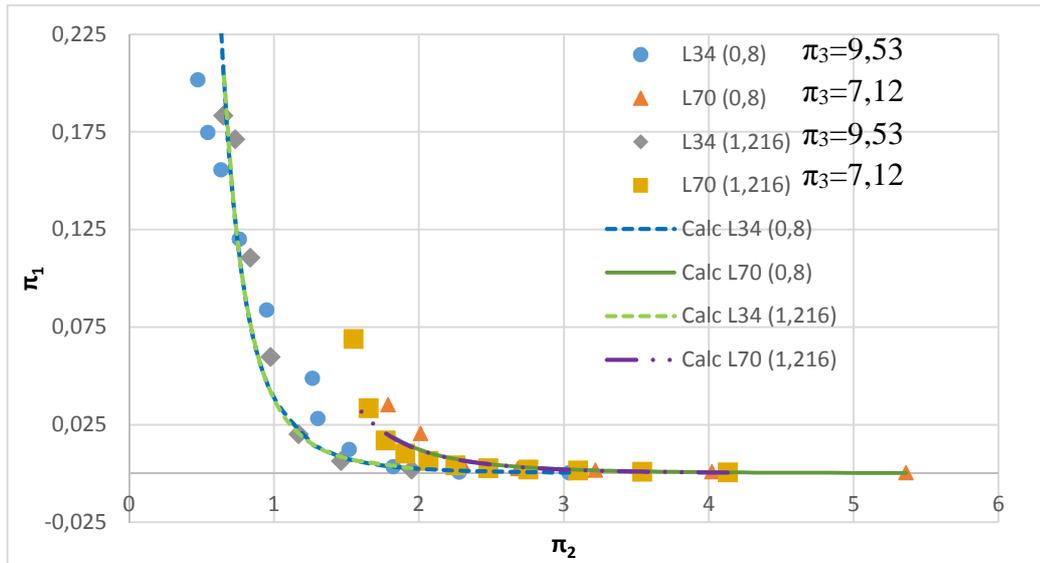


Figura 4.6 – Comparativo entre os valores de π_1 calculados e oriundos dos testes.

Com o intuito de melhorar estes resultados, realizou-se o mesmo procedimento para o primeiro grupo de números adimensionais, mas a forma da equação principal foi exponencial, ou seja, as equações que descrevem os pontos do gráfico π_1 versus π_2 têm a forma da equação (4.9). As equações (4.10) e (4.11) trazem a correlação achada. O apêndice B traz as tabelas e os gráficos que originaram esta equação. A Figura 4.7 mostra um gráfico comparativo entre os números adimensionais calculados pelos testes e pela equação (4.10). Da mesma forma que a correlação anterior, a curva é a mesma para cada válvula (independentemente da partícula). O erro médio quadrático foi de 0,0065 e a média das diferenças ficou próxima à anterior, 47,44%, porém houve uma redução no desvio padrão de aproximadamente 10% (35,89%). Comparando-se o ajuste exponencial ao potencial, fica claro que o exponencial ajustou melhor os coeficientes aos dados experimentais.

$$y = a \cdot e^{b \cdot x} \quad (4.9)$$

$$\pi_1 = (0,5199 \cdot \pi_3 - 3,4761) \cdot \pi_2^{(-0,7381 \cdot \pi_3 + 3,8242)} \quad (4.10)$$

$$G_s = \left[\left(0,5199 \cdot \frac{L_h}{D} - 3,4761 \right) \cdot \left(\frac{D^2 \cdot U_{mf}}{Q_{ext}} \right)^{(-0,7381 \cdot \frac{L_h}{D} + 3,8242)} \right] \cdot \frac{\Delta p_{DC} \cdot D^2}{Q_{ext}} \quad (4.11)$$

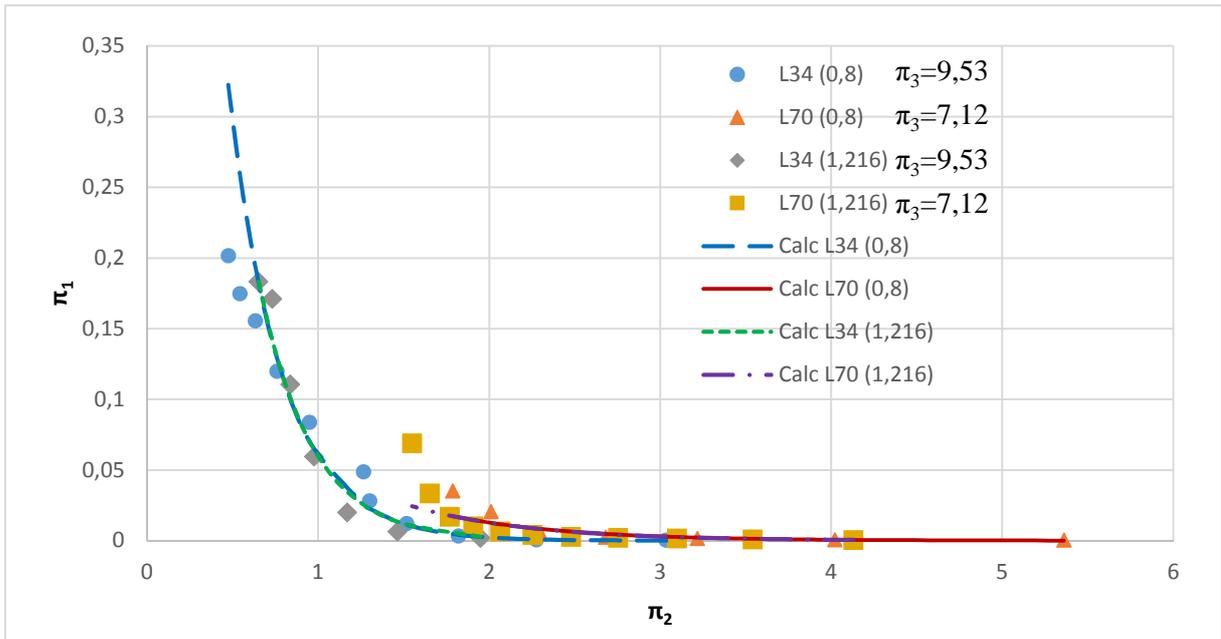


Figura 4.7 – Comparativo entre os valores de π_1 calculados e oriundos dos testes, para o primeiro grupo de números adimensionais sob a forma exponencial.

4.3 SEGUNDO GRUPO DE NÚMEROS ADIMENSIONAIS

Após calcular os números adimensionais do segundo grupo com base nos testes, construiu-se o gráfico da Figura 4.8. As equações que se ajustam à curva gerada pelos pontos dos ensaios também são apresentadas nesta figura. Adotou-se a forma potencial (π_2 é elevado ao coeficiente b) para a curva para seguir a mesma ordem da seção anterior pois para esses números adimensionais, não houve uma forma de equação que apresentasse melhores valores de R^2 (para duas curvas o valor de R^2 é mais alto para a forma potencial e as outras duas é a forma exponencial). Nota-se que, para os ensaios com a válvula de 34 mm, as variáveis do π_1 não reproduziram a forma de “sino” do gráfico que ocorre por causa da redução da taxa de sólidos com o aumento da aeração, o que diminuiu o valor de R^2 com uma influência maior para a partícula de 0,8 mm. Para o primeiro grupo de números adimensionais, o fluxo de sólidos é multiplicado pela aeração e dividido pela queda de pressão e uma constante (diâmetro ao quadrado) e, provavelmente, isto tenha escondido esta queda da taxa de sólidos naquele gráfico.

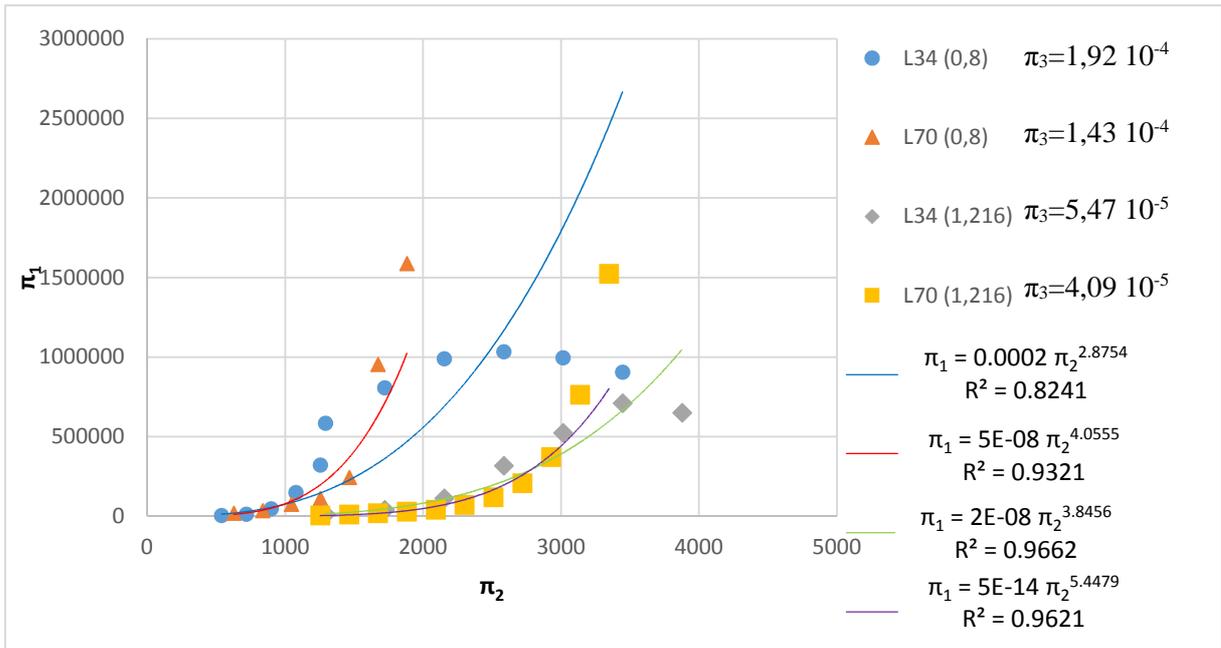


Figura 4.8 – Números adimensionais π_1 versus π_2 , com suas respectivas curvas que se ajustam aos dados experimentais para o segundo grupo de números adimensionais.

Da mesma forma que na seção anterior, os coeficientes da curva gerada pelos pontos do gráfico anterior são relacionados com π_3 , gerando o gráfico da Figura 4.9. A equação para a curva gerada pelos pontos é obtida e estas equações vem a ser os coeficientes a e b da equação principal.

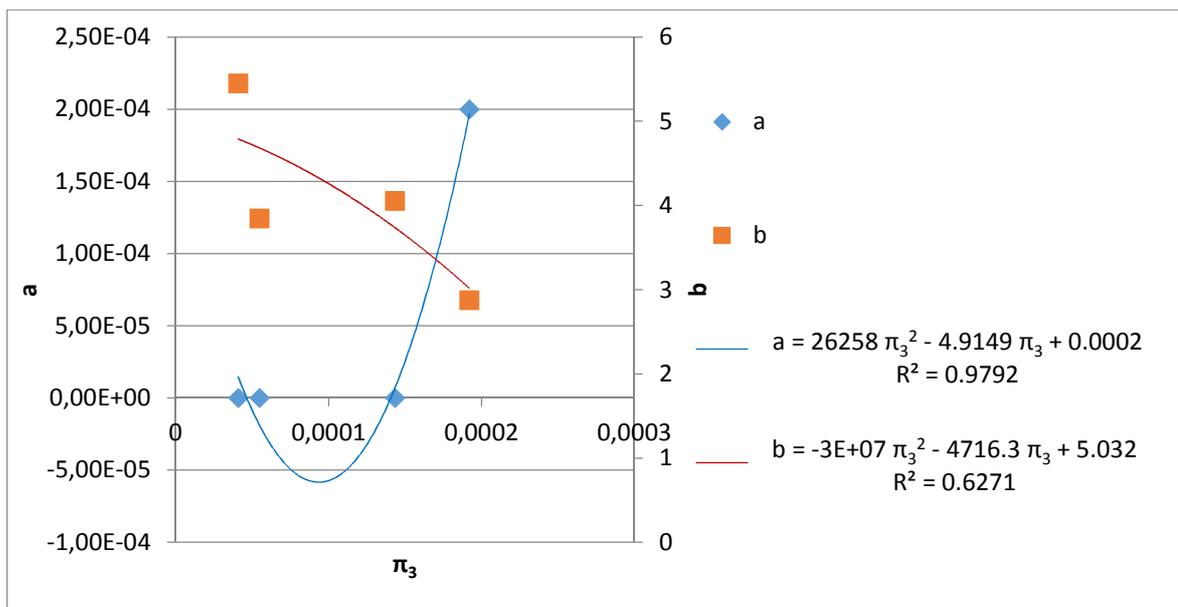


Figura 4.9 – Número adimensional π_3 plotado em relação aos coeficientes a (losango) e b (quadrado) para o segundo grupo de números adimensionais.

Com base nos dois últimos gráficos tem-se a equação (4.12). Então, substituí-se os números adimensionais pelas suas equações e isolando o fluxo de massa (G_s), tem-se a equação (4.13). O apêndice B traz as tabelas e os gráficos que originaram esta equação.

$$\pi_1 = (26258 \cdot \pi_3^2 + 4,9149 \cdot \pi_3 + 0,0002) \cdot \pi_2^{(-3 \cdot 10^{-7} \cdot \pi_3^2 - 4716,3 \pi_3 + 5,032)} \quad (4.12)$$

$$G_s = \left[(26258 \cdot \pi_3^2 + 4,9149 \cdot \pi_3 + 0,0002) \cdot \left(\frac{U_{ext} \cdot dp \cdot \rho}{\mu} \right)^{(-3 \cdot 10^{-7} \cdot \pi_3^2 - 4716,3 \pi_3 + 5,032)} \right] \cdot \frac{\mu}{D} \quad (4.13)$$

$$\text{Sendo: } \pi_3 = \frac{L_h \cdot \mu^2}{D \cdot g \cdot dp^3 \cdot \rho \cdot (\rho_p - \rho)}$$

No entanto, os resultados com esta equação não foram bons. Na Figura 4.10 os números adimensionais calculados em relação aos testes e com base na equação (4.12) são mostrados. As curvas calculadas para a partícula de 1,216 mm foram colocadas na ordenada secundária para melhorar a visualização. A diferença é tão grande que não se pode dizer que esta equação prediz os testes. O problema deve ter sido pela soma de erros, pela “parábola” que a equação de ajuste aos pontos não conseguiu prever e pela forma que os pontos da Figura 4.9 se apresentaram (uma equação de segundo grau não consegue descrever estes pontos), aliado ao fato de que o número adimensional do fluxo de massa também é uma variação do número de Reynolds, ou seja, há dois números de Reynolds neste grupo de números adimensionais. A ideia de dividir dois números adimensionais para formar um (englobando mais variáveis) não parece ser correta para esta situação pois o acúmulo de variáveis em um só número adimensional parece confundir mais os resultados.

Utilizando-se a equação principal sob a forma exponencial, para o segundo grupo de números adimensionais, foi encontrada a equação (4.14), com o método similar ao já utilizado. Substituindo os números adimensionais e isolando o fluxo da massa temos a equação (4.15). A Figura 4.11 mostra os valores de π_1 calculados pela equação (4.14) e pelos dados dos testes. Esta equação se comportou melhor do que as anteriores, porém ainda não pode ser utilizada como uma correlação para descrever o fluxo de massa pois o erro médio quadrático foi muito alto também e a média das diferenças foi de 503% (desvio padrão de 851%). Os resultados para o ajuste exponencial foram melhores do que o exponencial, mas ainda assim não foram bons para descrever o fluxo de massa da válvula L. O apêndice B traz as tabelas e os gráficos que originaram esta equação.

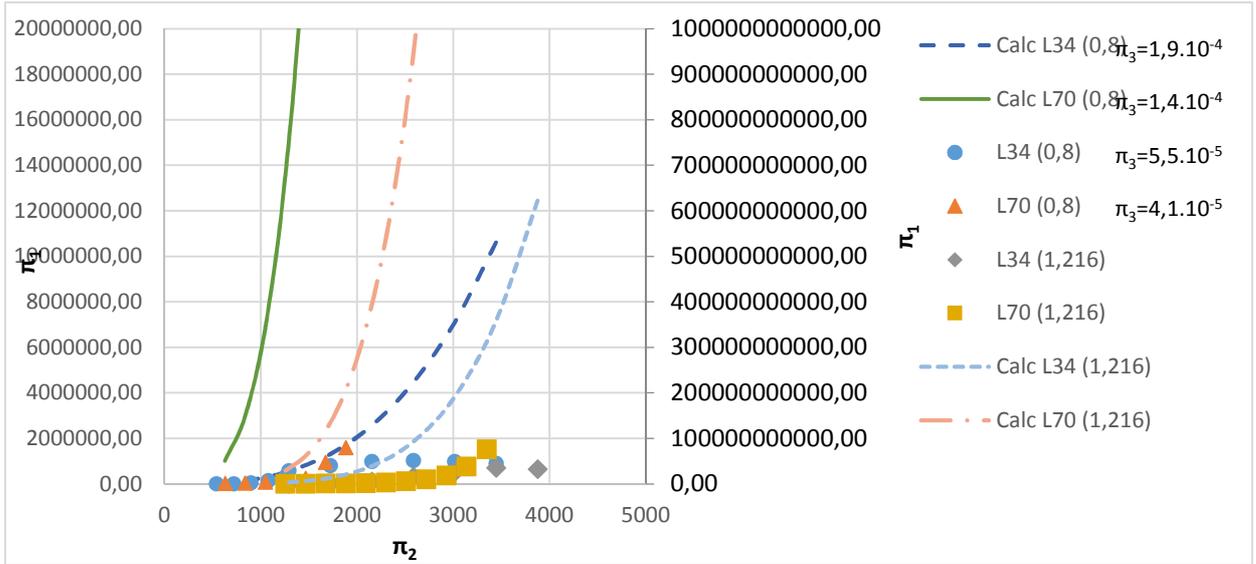


Figura 4.10 – Comparativo entre os valores de π_1 calculados e dos testes, para o segundo grupo de números adimensionais sob a forma potencial.

$$\pi_1 = (2 \cdot 10^{12} \cdot \pi_3^2 - 3 \cdot 10^8 \cdot \pi_3 + 12519) \cdot \pi_2^{(-307343\pi_3^2 + 69,859\pi_3 - 0,0004)} \quad (4.14)$$

$$Gs = \left[(2 \cdot 10^{12} \cdot \pi_3^2 - 3 \cdot 10^8 \cdot \pi_3 + 12519) \cdot \left(\frac{U_{ext} \cdot dp \cdot \rho}{\mu} \right)^{(-307343\pi_3^2 + 69,859\pi_3 - 0,0004)} \right] \cdot \frac{\mu}{D} \quad (4.15)$$

Sendo:
$$\pi_3 = \frac{L_h \cdot \mu^2}{D \cdot g \cdot dp^3 \cdot \rho \cdot (\rho_p - \rho)}$$

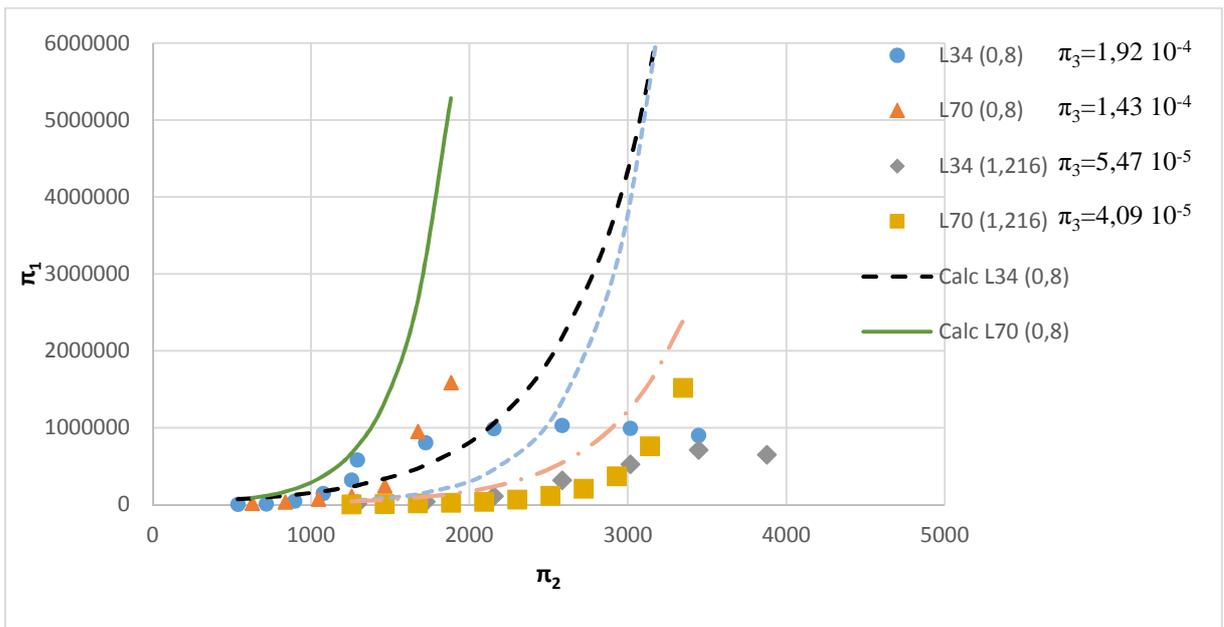


Figura 4.11 – Comparativo entre os valores de π_1 calculados e dos testes, para o segundo grupo de números adimensionais sob a forma exponencial.

4.4 TERCEIRO GRUPO DE NÚMEROS ADIMENSIONAIS

Para o terceiro grupo de números adimensionais foi feito o mesmo procedimento descrito anteriormente para os outros grupos. Em um primeiro momento, foi usada uma curva na forma potencial. A equação (4.16) é a equação resultante deste processo e na equação (4.17) os números adimensionais foram substituídos pelas suas variáveis e o fluxo de massa foi isolado.

$$\pi_1 = (7 \cdot 10^{-7} \cdot \pi_3^2 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot \pi_3 + 0,0013) \cdot \pi_2^{(0,0004\pi_3^2 - 0,0555\pi_3 + 0,0397)} \quad (4.16)$$

$$Gs = \left[\left(7 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{D}{d_p} \right)^2 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{D}{d_p} \right) + 0,0013 \right) \cdot \left(\frac{g \cdot d_p}{U_{ext}^2} \right)^{\left(0,0004 \left(\frac{D}{d_p} \right)^2 - 0,0555 \left(\frac{D}{d_p} \right) + 0,0397 \right)} \right] \cdot \rho_p \cdot U_{ext} \quad (4.17)$$

O gráfico da Figura 4.12 mostra a comparação entre os dados calculados pela equação (4.16) e aqueles calculados com base nos testes. Os dados calculados pela equação para os valores de π_2 baixos foram omitidos para facilitar a visualização. Os resultados para esta situação não foram bons. O erro médio quadrático foi de 15,3363 enquanto a média das diferenças entre o π_1 calculado pela equação em relação ao calculado pelos testes ficou em 827% (desvio padrão de 1013%), valor alto para validar os coeficientes de ajuste dos dados experimentais. Um detalhe interessante deste gráfico foi que a equação proposta para a válvula de 34 mm para a partícula de 1.216 mm se ajusta melhor aos pontos experimentais para a mesma válvula utilizando a partícula de 0,8 mm.

Seguindo, calculou-se para o terceiro grupo de números adimensionais, porém com a equação principal sob a forma exponencial. A equação (4.18) é a resposta encontrada nesta situação em função dos números adimensionais, enquanto a equação (4.19) está com o fluxo de massa isolado. O apêndice B traz as tabelas e os gráficos que originaram as duas correlações propostas nesta seção.

$$\pi_1 = (1 \cdot 10^{-5} \cdot \pi_3^2 - 0,0006 \cdot \pi_3 + 0,1605) \cdot \pi_2^{(-0,0336\pi_3^2 + 5,1409\pi_3 - 201,09)} \quad (4.18)$$

$$Gs = \left[\left(1 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{D}{d_p} \right)^2 - 0,0006 \cdot \left(\frac{D}{d_p} \right) + 0,1605 \right) \cdot \left(\frac{g \cdot d_p}{U_{ext}^2} \right)^{\left(-0,0336 \left(\frac{D}{d_p} \right)^2 + 5,1409 \left(\frac{D}{d_p} \right) - 201,09 \right)} \right] \cdot \rho_p \cdot U_{ext} \quad (4.19)$$

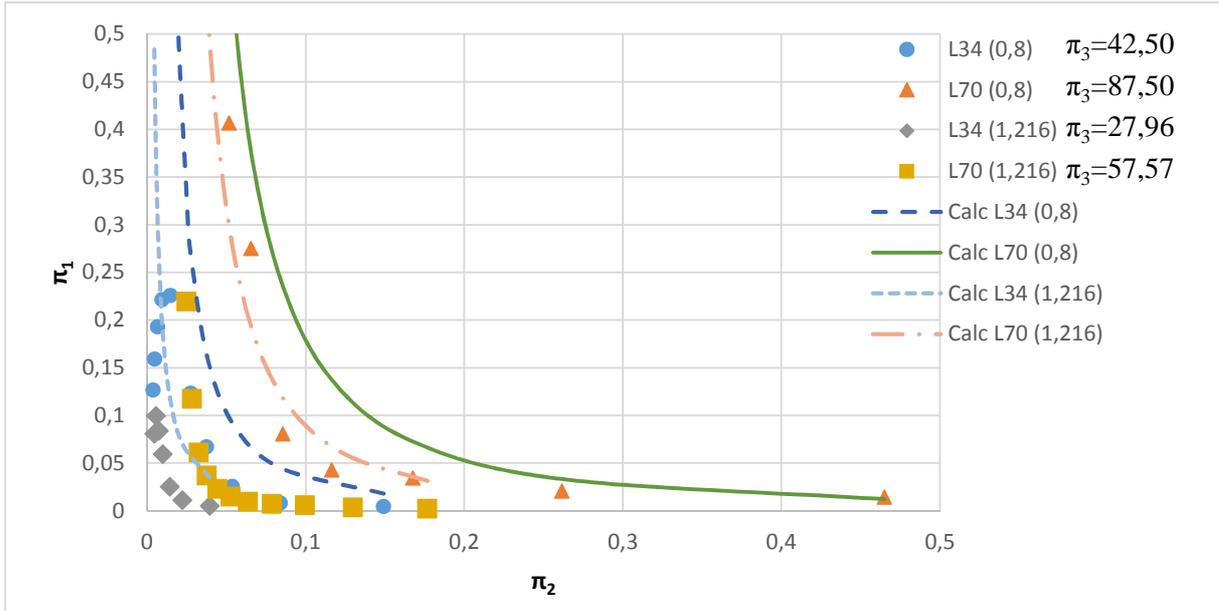


Figura 4.12 – Comparativo entre os valores de π_1 calculados e dos testes, para o terceiro grupo de números adimensionais sob a forma potencial.

A Figura 4.13 traz o comparativo entre os dados calculados pela equação (4.16) e os calculados pelos testes. Apesar de, ao usar uma equação potencial, a equação resultante se ajustar melhor ao formato da distribuição dos pontos do que ao usar a forma exponencial, a média das diferenças, calculado pela equação em relação aos testes, para o último caso se comportou melhor (erro médio quadrático de 0,0508, média de π_1 calculado pela equação em relação aos calculados pelos testes foi de 114% e desvio padrão de 145%).

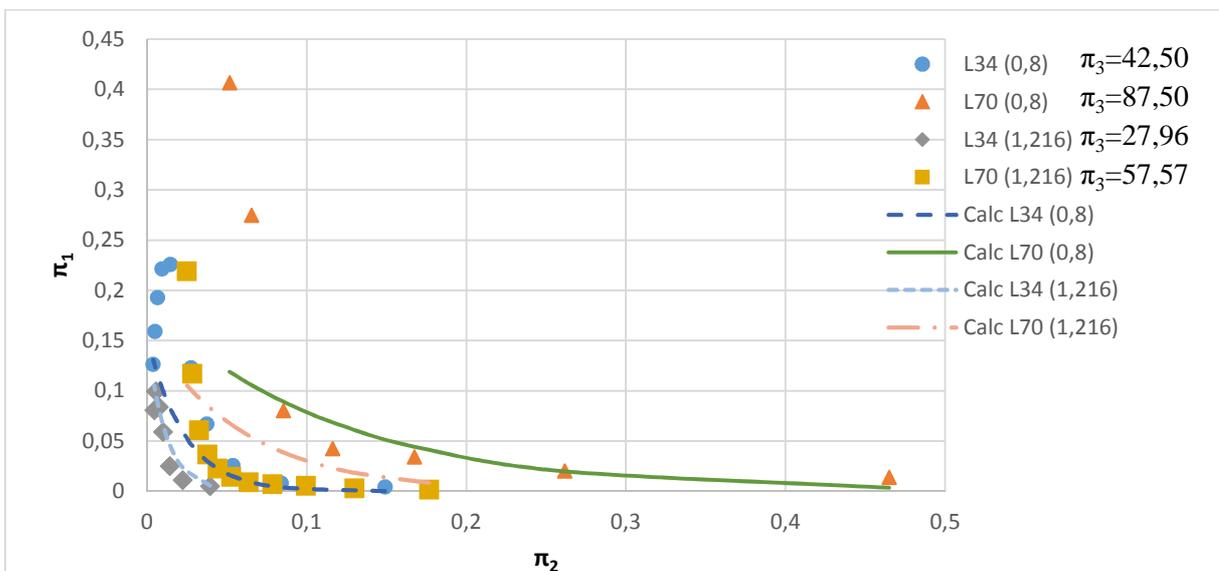


Figura 4.13 – Comparativo entre os valores de π_1 calculados e dos testes, para o Terceiro grupo de números adimensionais sob a forma exponencial.

4.5 ANÁLISE FATORIAL DAS VARIÁVEIS

Como pode ser observado no Apêndice A, não foi possível realizar os testes para cada válvula para a mesma faixa de vazões injetadas nas válvulas L. O limite inferior depende das suas características geométricas e da partícula para iniciar o escoamento e o limite superior teve o seu valor crítico a quantidade de partículas ou a maior vazão de ar disponível. A Figura 4.14 mostra a variação da velocidade de ar injetada nas válvulas em relação ao diâmetro da válvula e do diâmetro da partícula utilizada durante os testes. Observa-se que as faixas de velocidades não foram iguais nem ao menos para as válvulas de mesmo diâmetro. A vazão volumétrica injetada foi o parâmetro controlado durante os testes e para esta variável existe uma faixa em que todos os conjuntos de testes são similares. Porém, ao se calcular a velocidade do ar em função do diâmetro da válvula, as velocidades diferem ainda mais, de forma que não se tem duas velocidades iguais para as duas válvulas L utilizando-se as duas partículas. Por esta razão, não foi feita a análise fatorial de três níveis pois é preciso de oito ensaios em que as três variáveis tenham variado em dois níveis iguais resultando em um fator de saída diferente.

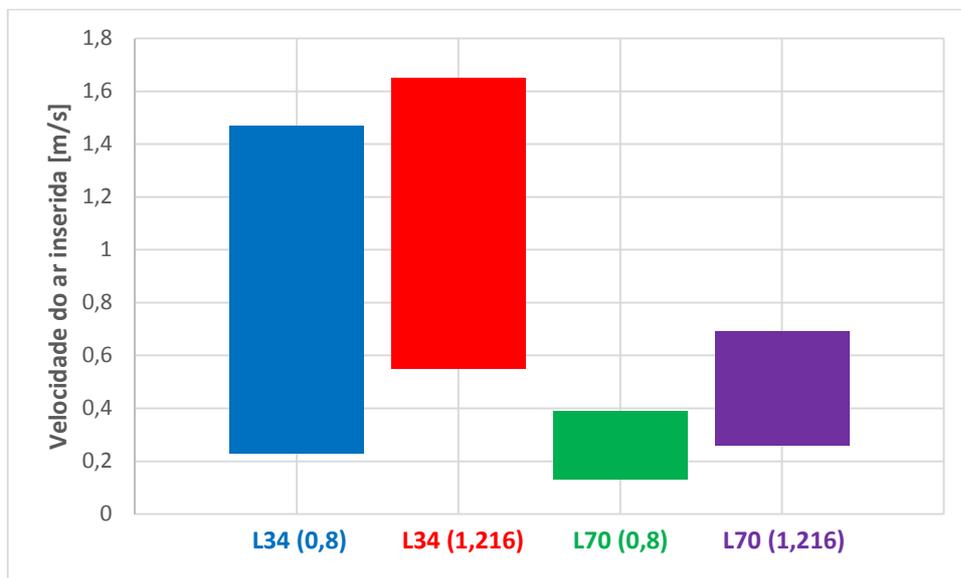


Figura 4.14 – Comparativo entre as velocidades do ar injetadas para cada conjunto de teste (diâmetro da válvula L e a partícula utilizada).

Assim, optou-se por realizar a análise de dois níveis, sob a seguinte ordem:

- a) Diâmetro da partícula e velocidade do ar injetado em relação a taxa de sólidos para a válvula de 34 mm;

- b) Números adimensionais do primeiro grupo;
- c) Números adimensionais do segundo grupo;
- d) Números adimensionais do terceiro grupo;

4.5.1 Análise fatorial para variáveis da válvula de 34 mm

A Tabela 4.3 mostra a matriz de planejamento com os dados dos testes da válvula de 34 mm para as partículas de 0,8 mm e de 1,216 mm. Nesta tabela já foi informado os níveis superiores para os valores maiores e inferiores para os menores. A tabela de coeficientes de contraste foi criada com base nestes níveis como é mostrado na Tabela 4.4. A primeira coluna é preenchida com níveis positivos que no final do cálculo será a média das taxas. A segunda e a terceira coluna são os níveis do diâmetro da partícula e da velocidade do ar, respectivamente. A última coluna é a multiplicação dos níveis da segunda e da terceira coluna, que virá a descrever o fator de interação.

Tabela 4.3 – Matriz de planejamento para análise fatorial 2^2 para a válvula de 34 mm.

Ensaio	1		2		12
	Diâmetro da partícula		Velocidade do ar		Taxa de sólidos
	[m]	níveis	[m/s]	níveis	[kg/s]
1	0,0008	-	0,55	-	0,271677
2	0,0008	-	1,47	+	0,420330
3	0,001216	+	0,55	-	0,006349
4	0,001216	+	1,47	+	0,330561

Tabela 4.4 – Tabela de coeficiente de contrastes para a válvula de 34 mm.

M	1	2	12
+	-	-	+
+	-	+	-
+	+	-	-
+	+	+	+

Ao incluir unidade à tabela de coeficiente de contrastes, tem-se a matriz X:

$$X = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Com a taxa de sólidos cria-se o vetor Y , mostrado na equação (4.21). O produto da matriz trasposta de X pela matriz Y , tem-se o vetor mostrado na equação (4.22).

$$Y = \begin{bmatrix} 0,27168 \\ 0,42033 \\ 0,00635 \\ 0,33056 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$X^t \cdot Y = \begin{bmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 \\ -1 & -1 & +1 & +1 \\ -1 & +1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,27168 \\ 0,42033 \\ 0,00635 \\ 0,33056 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,02892 \\ -0,35510 \\ 0,47287 \\ 0,17556 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Com o vetor gerado pela multiplicação da matriz X pelo vetor Y da equação (4.22), divide-se o primeiro elemento por quatro e os demais por dois, tem-se o vetor da equação (4.23). Este vetor vem a ser a média global das taxas de sólidos (M), os dois efeitos principais (1 e 2, respectivamente, diâmetro da partícula e velocidade do ar injetado) e o efeito de interação (12).

$$\begin{bmatrix} M \\ 1 \\ 2 \\ 12 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2572291 \\ -0,1775487 \\ 0,2364330 \\ 0,0877792 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

A média das taxas de sólidos analisadas foi de 0,2572 kg/s. Aumentando o diâmetro de partícula de 0,8 mm para 1,216 mm a taxa de sólidos diminuiu 0,1775 kg/s. Quando a velocidade do ar injetado na válvula foi aumentado de 0,55 m/s para 1,47 m/s, a taxa de sólidos aumentou em média 0,2364 kg/s.

O efeito de interação foi baixo em relação à média da taxa de sólidos, induzindo que a interação seja baixa. No entanto, ela existe, pois, caso contrário o efeito principal do diâmetro da partícula seria o mesmo para qualquer velocidade, fato que não acontece. Com estes dados observa-se que, ao aumentar o tamanho da partícula, a taxa de sólidos diminui e ao aumentar

a velocidade do ar, e por consequência a vazão volumétrica injetada na válvula, aumenta-se a taxa de sólidos. Ambas afirmações concordam com afirmações de outros autores. A maior vazão ocorre com a menor partícula na maior velocidade de ar.

4.5.2 Análise fatorial para os números adimensionais do primeiro grupo

A Tabela 4.5 mostra a matriz de planejamento para os números adimensionais do primeiro grupo calculado com os testes da válvula L de 34 mm. Não foi possível realizar este cálculo, pois um dos números adimensionais não varia para estes ensaios fazendo com que não exista dois níveis.

Tabela 4.5 – Matriz de planejamento para análise fatorial 2² para o primeiro grupo de números adimensionais.

Ensaio	1		2		12
	π_2		π_3		π_1
	[-]	Níveis	[-]	Níveis	[-]
1	0,7587984	-	9,529412	+	0,120
2	0,835292571	-	9,529412	+	0,111
3	1,5175968	+	9,529412	+	0,012
4	1,461762	+	9,529412	+	0,006

4.5.3 Análise fatorial para os números adimensionais do segundo grupo

A Tabela 4.6 traz a matriz de planejamento do segundo grupo de números adimensionais calculados com os dados da válvula L de 34 mm. Realizando os cálculos como descrito anteriormente, tem-se a equação (4.24) sendo que M é a média de π_1 , a variável 1 é o π_2 , a variável 2 é o π_3 e a variável 12 é a interação entre os dois. O efeito principal do π_2 resultou em um valor muito próximo da média dos π_1 , evidenciando que seu peso foi grande. Para o π_3 , resultou em um efeito significativo quando comparado com o outro efeito principal. A interação entre os dois foi praticamente a metade do π_3 , mas esta interação existe pois caso contrário o efeito do π_2 seria o mesmo para qualquer valor de π_3 .

Tabela 4.6 – Matriz de planejamento para análise fatorial 2² para o segundo grupo de números adimensionais.

Ensaio	1		2		12
	π_2 (Reynolds)		π_3		π_1
	[-]	Níveis	[-]	Níveis	[-]
1	1292,394095	-	0,000192	+	584701,374
2	1292,394095	-	0,000055	-	13663,570
3	3446,384253	+	0,000192	+	904633,590
4	3446,384253	+	0,000055	-	711431,993

$$\begin{bmatrix} M \\ 1 \\ 2 \\ 12 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 553607,632 \\ 508850,319 \\ 382119,701 \\ -188918,103 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

4.5.4 Análise fatorial para os números adimensionais do terceiro grupo

Os números adimensionais do terceiro grupo foram calculados utilizando os resultados dos testes da válvula L de 34 mm. A Tabela 4.7 mostra a matriz de planejamento desta análise fatorial de dois níveis. Após os cálculos, o vetor mostrado na equação (4.25) é encontrado sendo que M é a média de π_1 , a variável 1 é o π_2 , a variável 2 é o π_3 e a variável 12 é a interação entre os dois. O número adimensional π_2 apresenta uma variação pequena, em média, para os valores de π_1 , enquanto o π_3 parece representar uma influência elevada sendo maior do que a média M . Possivelmente a baixa influência do segundo número adimensional deste grupo possa ter prejudicado a correlação proposta com base nestes números adimensionais.

Tabela 4.7 – Matriz de planejamento para análise fatorial 2² para o terceiro grupo de números adimensionais.

Ensaio	1		2		12
	π_2 (Froude)		π_3		π_1
	[-]	Níveis	[-]	Níveis	[-]
1	0,006	-	42,5	+	0,193
2	0,006	-	28,0	-	0,100
3	0,026	+	42,5	+	0,218
4	0,022	+	28,0	-	0,011

$$\begin{bmatrix} M \\ 1 \\ 2 \\ 12 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,130 \\ -0,032 \\ 0,150 \\ 0,057 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma bancada foi desenvolvida para a realização dos testes das válvulas L de 34 mm e de 70 mm. A estrutura comporta também os reservatórios (silos), posicionados a montante das válvulas, e os acessórios para o controle de vazão volumétrica e pressão a ser injetado. A jusante das válvulas há espaço para acomodar os recipientes para coletar os sólidos, possibilitando a medição da taxa de sólidos.

Algumas correlações existentes foram aplicadas aos resultados dos testes, porém não foi possível encontrar correspondências significativas. As razões levantadas para explicar isso foram: a possibilidade das vazões volumétricas do fluido injetado na válvula, nos estudos que geraram as correlações, terem sido inferiores às que este trabalho executou, resultando em um comportamento diferente do perfil proposto pelas correlações e o uso de sólidos com diâmetro e material diferentes. Nestas correlações da literatura não foi dito de forma clara se foi observada uma diminuição da taxa de sólidos com o aumento da injeção de ar (como observado neste estudo), fato que dificulta a similaridade entre os resultados. No entanto, Grace et al. (1997), sugere que isto pode ocorrer em função do aparecimento de bolhas no *standpipe*, criando uma barreira, o que resulta em uma dificuldade maior para a passagem das partículas.

A proposta deste trabalho foi obter uma correlação para descrever o fluxo de sólidos através de um grupo de números adimensionais, limitada pelas partículas (dois diâmetros de esferas de vidro) e duas geometrias de válvulas (diâmetros de 34 mm e 70 mm). Estudou-se três grupos de variáveis, sendo que o primeiro deles apresentou melhores resultados, podendo-se dizer que a correlação obtida é viável, considerando todas as variáveis do processo. Este grupo foi o único que considerou a queda de pressão e omitiu algumas variáveis importantes, como o diâmetro da partícula e massa específica da partícula.

Para o segundo grupo pode-se afirmar que os números adimensionais encontrados não conseguem descrever o comportamento de uma válvula L. A imprecisão dos resultados utilizando estes números foi enorme. Dois números adimensionais conhecidos foram utilizados nesta análise (números de Reynolds e Arquimedes), o que não quer dizer que estes números não sejam importantes para o processo em questão. Apenas pode-se dizer que, da forma como foram empregados e analisados, eles não conseguem descrever o fluxo de sólidos de uma válvula L. É possível que, ao substituir uma ou duas variáveis no cálculo dos números adimensionais, estes sejam alterados e os resultados melhorem.

No terceiro grupo de números adimensionais há dois números propostos por Glicksmann (1984). Sua correlação apresentou uma resposta melhor quando se utilizou a forma exponencial para as curvas que descrevem os pontos experimentais ao plotar-se π_1 em relação a π_2 , resultando uma correlação também exponencial. De uma forma geral, as outras análises utilizando uma curva exponencial também apresentaram resultados melhores ou próximos às análises potenciais, em que a variável independente é elevada a uma constante.

Neste estudo, para a válvula de 34 mm, atingiu-se a máxima taxa de sólidos, ou seja, ao aumentar a vazão volumétrica injetada na válvula acima de um determinado valor, houve uma queda da taxa de partículas. Tal comportamento já havia sido sugerido na literatura. Este fato complicou bastante a busca de uma correlação pois tal comportamento dificultou encontrar uma função que descrevesse os pontos experimentais com uma precisão maior. Acredita-se que a válvula de 70 mm tenha um comportamento similar, mas não foram atingidos os níveis de aeração necessários para que este fenômeno acontecesse. Dessa forma, havia um tipo de curva para os testes da válvula menor e outro comportamento para a válvula L maior.

A escolha do terceiro número adimensional, π_3 , é importante para a sensibilidade da equação. Este parâmetro, junto com os coeficientes oriundos da relação π_1 e π_2 , ajustam os coeficientes da equação principal. Houve casos em que os pontos se organizaram como um quadrilátero, o que dificulta encontrar uma equação para descrever tal comportamento, resultando em uma função aproximada pouco precisa. Este pode ter sido um fator que diminuiu a precisão das correlações encontradas neste estudo. Observou-se que este fato foi mais recorrente quando o π_3 era uma relação que utilizava variáveis apenas da partícula ou somente da válvula pois, dos quatro grupos de ensaio havia apenas duas constantes. No entanto, a correlação que apresentou a melhor precisão se enquadra nesta situação.

Ao total foram seis correlações calculadas neste estudo, as melhores delas foram as do primeiro grupo de números. Foram utilizadas para o ajuste uma função potencial e uma exponencial que apresentaram, respectivamente, erro médio quadrático de 0,0501 e média das diferenças, entre o calculado pela correlação e o calculado pelos dados experimentais, de 45% (desvio padrão de aproximadamente 45%) e erro médio quadrático de 0,0065 e média de erros de 47% (desvio de 35%). A segunda melhor correlação foi a que utilizou o terceiro grupo de números adimensionais utilizando uma curva na forma exponencial, que resultou em um erro médio quadrático de 0,0508 e uma média de 114% (desvio de 145%). As demais análises não apresentaram similaridade a ponto de descrever o processo.

Apesar de não se ter conseguido uma boa correlação com os números adimensionais conhecidos, este estudo serve de base para encontrar uma correlação mais ampla contemplando um número maior de ensaios, com mais tipos e diâmetros de partículas e um número maior de geometrias de válvula L.

Uma análise da importância das variáveis do processo foi desenvolvida com base na análise fatorial de dois níveis. Ao realizar este procedimento para o diâmetro da partícula e a velocidade de ar injetada na válvula em relação à taxa de sólidos, observou-se as mesmas tendências que a literatura sugere, que ao se aumentar o diâmetro da partícula a taxa de sólidos diminui e que ao se aumentar a velocidade do ar injetado na válvula a taxa de sólidos aumenta. Quando este procedimento foi efetuado para os números adimensionais utilizados para gerar as correlações, observou-se que, no segundo grupo de números adimensionais, há evidência de que o número adimensional π_2 (Reynolds) aparenta ter uma influência grande ao π_1 (Reynolds que utiliza o fluxo de massa invés da massa específica multiplicado pela velocidade). Entretanto, o terceiro grupo de número adimensionais, o π_2 (Froude) aparenta ter um efeito pequeno sobre o π_1 , podendo ser a causa dos resultados ruins gerados pela correlação deste grupo de números adimensionais.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para possíveis trabalhos futuros:

- a) Utilizar outras variáveis (como o comprimento do tubo horizontal e vertical, massa específica etc.) para que seja possível uma análise fatorial mais abrangente, visando uma melhor compreensão da válvula L;
- b) Realizar testes com outras partículas de diâmetros e materiais diferentes para tornar a correlação mais ampla, como por exemplo, areia, cinza de carvão de um leito fluidizado e misturas entre estes materiais;
- c) Estudar se estes números adimensionais descrevem o escalonamento entre duas válvulas L;

REFERÊNCIAS

- ADANEZ, J.; ABAD, A.; GARCIA-LABIANO, F.; GAYAN, P.; DIEGO, L. F. Progress in Chemical-Looping Combustion and Reforming technologies. **Progress in Energy and Combustion Science**, [S.l.], v. 38, p. 215-282, 2012.
- BARROS NETO, Benício de; SARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2. ed. Campinas: Unicamp, 2001.
- BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized beds**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.
- BIANCHI, F. M.; AQUINO, T. F. **Bancada de leito fluidizado circulante a frio: experimentos e análise de dados**. 2014. Artigo de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -- Faculdade SATC, Criciúma, 2014.
- CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidodinâmicos**. São Paulo: Blucher, 2012.
- DAOUS, M. A.; AL-ZAHRANI, A. A. Modeling solids and gas flow through an L-valve. **Powder Technology**, [S.l.], v. 99, p. 86-89, 1998.
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- GELDART, D. Types of gas fluidization. **Powder Technology**, [S.l.], v. 7, p. 285-292, 1973.
- GELDART, D.; JONES, P. The behavior of L-valves with granular powders. **Powder Technology**, [S.l.], v. 67, p. 163-174, 1991.
- GLICKSMAN, L. R. Scaling relationships for fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, [S.l.], v. 39, p. 1373-1379, 1984.
- GRACE, J. R.; AVIDAN, A. A.; KNOWLTON, T. M. **Circulating fluidized beds**. New York: Blackie Academic & Professional Londres, 1997.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, Octave. **Fluidization engineering**. 2nd ed. Newton (MA): Butterworth-Heinemann. 1991.
- NAKAYAMA, Y; BOUCHER, R. F. **Introduction to fluid mechanics**. Tokyo: Butterworth-Heinemann. 2000.
- NICASTRO, M. T.; GLICKSMAN, L. R. Scaling relationships for fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, [S.l.], v. 39, p. 1381-1391, 1984.
- OKA, S. N. **Fluidized Bed Combustion**. New York: Marcel Dekker. 2004.
- PRITCHARD, P. J. **Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics**. 8. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

SANTOYO, F.; GUATEMALA, G.; OROZCO, I.; ARRIOLA, E. La Válvula-S: modelando del flujo de sólidos granulares utilizando números adimensionales. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, [S.l.]. v. 9, p. 179-188, 2010.

SMOLDERS, K.; BAEYENS, J. The operation of L-valves to control standpipeflow. **Advanced Powder Technol**, [S.l.], v. 6, p. 163-176, 1995.

STOECKER, W. F. **Design of thermal systems**. [S.l.]: McGraw-Hill. 1989.

YANG, W.-C.; KNOWLTON, T. M. L-valve equations. **Powder Technology**, [S.l.], v. 77, p. 49-54., 1993.

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS TESTES

- Resultados dos testes para a válvula de 34 mm utilizando a partícula de 0,8 mm:

Tabela A.1 – Resultados dos testes da válvula de 34 mm com as partículas de 0,8 mm.

(continua)

teste	Nº Rotâmetro	Vazão ar inserida	Δp	Tempo	Massa medida	Taxa de massa	Média taxa de massa	Desvio padrão da taxa de massa
[-]	[-]	[m ³ /s]	[Pa]	[s]	[kg]	[kg/s]	[kg/s]	[%]
1	1	0,208	1128	306,06	0,7535	0,002462	0,00242	3,5%
2	1	0,208	1128	306,07	0,6928	0,002264		
3	1	0,208	1128	306,12	0,743	0,002427		
4	1	0,208	1128	306,32	0,7728	0,002523		
5	1	0,208	1128	306,34	0,7429	0,002425		
6	1	0,278	1912	306,98	1,77	0,005766	0,005777	5,5%
7	1	0,278	1912	306,11	1,5898	0,005194		
8	1	0,278	1912	306,80	1,7868	0,005824		
9	1	0,278	1912	307,16	1,8324	0,005966		
10	1	0,278	1912	306,57	1,8815	0,006137		
11	1	0,347	2108	306,39	6,4248	0,020969	0,022295	3,4%
12	1	0,347	2108	306,28	6,9359	0,022646		
13	1	0,347	2108	306,24	6,7288	0,021972		
14	1	0,347	2108	306,40	6,9656	0,022734		
15	1	0,347	2108	306,00	7,0848	0,023153		
16	1	0,417	2256	120,54	8,5408	0,070854	0,069710	2,1%
17	1	0,417	2256	120,76	8,5249	0,070594		
18	1	0,417	2256	120,52	8,3091	0,068944		
19	1	0,417	2256	120,43	8,5512	0,071006		
20	1	0,417	2256	120,84	8,1147	0,067152		
21	1	0,486	2452	44,75	6,6345	0,148257	0,149188	1,5%
22	1	0,486	2452	45,11	6,6142	0,146624		
23	1	0,486	2452	45,02	6,8848	0,152928		
24	1	0,486	2452	46,18	6,9576	0,150663		
25	1	0,486	2452	45,17	6,6612	0,147470		
26	2	0,500	2648	25,00	6,8756	0,275024	0,271677	4,1%
27	2	0,500	2648	26,50	7,4643	0,281672		
28	2	0,500	2648	26,71	7,3291	0,274395		
29	2	0,500	2648	30,74	7,6797	0,249828		
30	2	0,500	2648	27,88	7,7357	0,277464		

Tabela A.2 (continuação) – Resultados dos testes da válvula de 34 mm com as partículas de 0,8 mm.

(conclusão)

teste	Nº Rotâmetro	Vazão ar inserida	Δp	Tempo	Massa medida	Taxa de massa	Média taxa de massa	Desvio padrão da taxa de massa
31	2	0,667	2844	16,74	6,3937	0,381941	0,375186	1,6%
32	2	0,667	2844	17,43	6,5346	0,374905		
33	2	0,667	2844	16,16	6,1674	0,381646		
34	2	0,667	2844	21,06	7,8070	0,370703		
35	2	0,667	2844	18,75	6,8763	0,366736		
36	2	0,833	3040	14,59	6,8118	0,466881	0,459656	1,4%
37	2	0,833	3040	16,26	7,4480	0,458057		
38	2	0,833	3040	15,37	6,9031	0,449128		
39	2	0,833	3040	13,53	6,3032	0,465868		
40	2	0,833	3040	14,76	6,7652	0,458347		
41	2	1,000	2942	12,54	5,9727	0,476292	0,48045	1,1%
42	2	1,000	2942	15,45	7,5481	0,488550		
43	2	1,000	2942	14,76	7,0785	0,479573		
44	2	1,000	2942	13,86	6,7108	0,484185		
45	2	1,000	2942	14,76	6,9911	0,473652		
46	2	1,167	2844	17,27	7,9994	0,463196	0,462542	0,5%
47	2	1,167	2844	15,07	6,9930	0,464035		
48	2	1,167	2942	14,31	6,6342	0,463606		
49	2	1,167	2942	14,52	6,6551	0,458340		
50	2	1,167	2942	16,25	7,5324	0,463532		
51	2	1,333	2648	14,04	6,0811	0,433127	0,42033	1,8%
52	2	1,333	2648	17,56	7,3587	0,419060		
53	2	1,333	2648	16,13	6,8266	0,423224		
54	2	1,333	2648	14,96	6,1710	0,412500		
55	2	1,333	2648	16,36	6,7688	0,413741		

Obs: Rotâmetro 1: fabricante Luft, possui uma faixa de medição de 0,25 a 2,5 m³/h com resolução de 0,125 m³/h; Rotâmetro 2: fabricante AppliTech, faixa de 30 a 450 LPM (1,8 a 27 m³/h) com uma resolução de 10 LPM (0,6 m³/h),

- Resultados dos testes para a válvula de 70 mm utilizando a partícula de 0,8 mm:

TabelaA.3 – Resultados dos testes da válvula de 70 mm com as partículas de 0,8 mm.

teste	Nº Rotâmetro	Vazão ar inserida	Δp	Tempo	Massa medida	Taxa de massa	Média taxa de massa	Desvio padrão da taxa de massa
[-]	[-]	[m³/s]	[Pa]	[s]	[kg]	[kg/s]	[kg/s]	[%]
56	2	0,500	1079	333,94	1,3197	0,00395	0,004142	2,6%
57	2	0,500	1079	314,72	1,2870	0,00409		
58	2	0,500	1079	312,00	1,3137	0,00421		
59	2	0,500	1079	311,41	1,3115	0,00421		
60	2	0,500	1079	322,57	1,3693	0,00424		
61	2	0,667	1471	306,17	2,4025	0,00785	0,008067	2,5%
62	2	0,667	1471	307,26	2,4225	0,00788		
63	2	0,667	1471	308,79	2,4939	0,00808		
64	2	0,667	1471	322,35	2,6127	0,00811		
65	2	0,667	1471	319,95	2,6945	0,00842		
66	2	0,833	1765	313,22	5,0189	0,01602	0,016858	4,1%
67	2	0,833	1814	303,62	5,0072	0,01649		
68	2	0,833	1863	305,76	5,1399	0,01681		
69	2	0,833	1863	311,09	5,2384	0,01684		
70	2	0,833	1765	301,53	5,4652	0,01812		
71	2	1,000	2256	301,65	7,4084	0,02456	0,025181	3,7%
72	2	1,000	2256	305,37	7,5091	0,02459		
73	2	1,000	2256	303,82	7,5330	0,02479		
74	2	1,000	2256	303,42	7,5582	0,02491		
75	2	1,000	2256	305,06	8,2520	0,02705		
76	2	1,167	2746	133,26	6,5721	0,04932	0,055167	6,7%
77	2	1,167	2746	139,88	7,4354	0,05316		
78	2	1,167	2746	139,50	7,6957	0,05517		
79	2	1,167	2746	146,28	8,6163	0,05890		
80	2	1,167	2746	131,54	7,7996	0,05929		
81	2	1,333	3138	40,50	8,5756	0,21174	0,215424	1,2%
82	2	1,333	3138	39,05	8,3644	0,21420		
83	2	1,333	3138	40,72	8,7681	0,21533		
84	2	1,333	3138	40,75	8,8257	0,21658		
85	2	1,333	3138	39,57	8,6765	0,21927		
86	2	1,500	3432	21,72	7,6057	0,35017	0,358346	1,8%
87	2	1,500	3432	20,04	7,0646	0,35252		
88	2	1,500	3432	20,43	7,3059	0,35761		
89	2	1,500	3432	21,46	7,8152	0,36418		
90	2	1,500	3432	20,00	7,3451	0,36726		

Obs: Rotâmetro 2: fabricante AppliTech, faixa de 30 a 450 LPM (1,8 a 27 m³/h) com uma resolução de 10 LPM (0,6 m³/h).

- Resultados dos testes para a válvula de 34 mm utilizando a partícula de 1,216 mm:

Tabela A.4 – Resultados dos testes da válvula de 34 mm com as partículas de 1,216 mm.

teste	Nº Rotâmetro	Vazão ar inserida	Δp	Tempo	Massa medida	Taxa de massa	Média taxa de massa	Desvio padrão da taxa de massa
[-]	[-]	[m³/s]	[Pa]	[s]	[kg]	[kg/s]	[kg/s]	[%]
91	2	0,500	1471	307,56	1,9000	0,00618	0,006349	1,9%
92	2	0,500	1471	307,20	1,9165	0,00624		
93	2	0,500	1471	308,74	1,9684	0,00638		
94	2	0,500	1471	308,48	1,9963	0,00647		
95	2	0,500	1471	307,76	1,9943	0,00648		
96	2	0,667	1765	307,56	5,6197	0,01827	0,018664	2,0%
97	2	0,667	1765	306,95	5,6323	0,01835		
98	2	0,667	1863	308,34	5,7057	0,01850		
99	2	0,667	1863	316,16	6,0068	0,01900		
100	2	0,667	1863	309,04	5,9328	0,01920		
101	2	0,833	2059	136,08	6,9974	0,05142	0,052297	1,1%
102	2	0,833	2059	139,71	7,2437	0,05185		
103	2	0,833	2059	135,35	7,1115	0,05254		
104	2	0,833	2059	135,93	7,1584	0,05266		
105	2	0,833	2059	137,92	7,3117	0,05301		
106	2	1,000	2354	41,83	5,9850	0,14308	0,147633	2,6%
107	2	1,000	2354	42,76	6,2518	0,14621		
108	2	1,000	2354	45,59	6,7055	0,14708		
109	2	1,000	2354	43,26	6,3688	0,14722		
110	2	1,000	2354	43,04	6,6528	0,15457		
111	2	1,167	2452	31,90	7,6012	0,23828	0,243952	2,2%
112	2	1,167	2452	30,73	7,3307	0,23855		
113	2	1,167	2452	30,48	7,4118	0,24317		
114	2	1,167	2452	30,97	7,6563	0,24722		
115	2	1,167	2452	33,32	8,4147	0,25254		
116	2	1,333	2452	21,32	6,9688	0,32687	0,330561	0,7%
117	2	1,333	2452	22,36	7,3804	0,33007		
118	2	1,333	2452	21,63	7,1560	0,33084		
119	2	1,333	2452	21,33	7,0602	0,33100		
120	2	1,333	2452	22,23	7,4255	0,33403		
121	2	1,500	2354	25,35	7,4507	0,29391	0,301944	2,6%
122	2	1,500	2354	26,33	7,7497	0,29433		
123	2	1,500	2354	25,13	7,5262	0,29949		
124	2	1,500	2354	24,74	7,6250	0,30821		
125	2	1,500	2354	23,94	7,5119	0,31378		

Obs: Rotâmetro 2: fabricante AppliTech, faixa de 30 a 450 LPM (1,8 a 27 m³/h) com uma resolução de 10 LPM (0,6 m³/h).

- Resultados dos testes para a válvula de 70 mm utilizando a partícula de 1,216 mm:

Tabela A.5 – Resultados dos testes da válvula de 70 mm com as partículas de 1,216 mm.

(continua)

teste	Nº Rotâmetro	Vazão ar inserida	Δp	Tempo	Massa medida	Taxa de massa	Média taxa de massa	Desvio padrão da taxa de massa
[-]	[-]	[m³/s]	[Pa]	[s]	[kg]	[kg/s]	[kg/s]	[%]
126	2	1,000	490	308,12	0,3814	0,00124	0,001269	2,2%
127	2	1,000	490	321,10	0,4003	0,00125		
128	2	1,000	490	310,43	0,3935	0,00127		
129	2	1,000	490	314,52	0,4017	0,00128		
130	2	1,000	490	307,19	0,4047	0,00132		
131	2	1,167	686	327,21	0,7451	0,00228	0,002391	2,6%
132	2	1,167	686	305,23	0,7243	0,00237		
133	2	1,167	686	306,50	0,7411	0,00242		
134	2	1,167	686	306,08	0,7437	0,00243		
135	2	1,167	686	306,81	0,7542	0,00246		
136	2	1,333	883	345,04	1,4728	0,00427	0,004477	2,5%
137	2	1,333	883	306,33	1,3677	0,00446		
138	2	1,333	883	306,85	1,3937	0,00454		
139	2	1,333	883	306,21	1,3920	0,00455		
140	2	1,333	883	306,52	1,3992	0,00456		
141	2	1,500	1079	306,99	1,9307	0,00629	0,006486	2,6%
142	2	1,500	1079	305,67	1,9394	0,00634		
143	2	1,500	1079	305,94	1,9800	0,00647		
144	2	1,500	1079	305,79	2,0057	0,00656		
145	2	1,500	1079	305,96	2,0701	0,00677		
146	2	1,667	1275	319,21	2,8487	0,00892	0,009251	3,9%
147	2	1,667	1275	305,89	2,7329	0,00893		
148	2	1,667	1275	305,71	2,7943	0,00914		
149	2	1,667	1275	306,23	2,8660	0,00936		
150	2	1,667	1275	309,13	3,0597	0,00990		
151	2	1,833	1569	308,35	4,8970	0,01588	0,015986	0,5%
152	2	1,833	1569	306,12	4,8844	0,01596		
153	2	1,833	1569	306,66	4,9001	0,01598		
154	2	1,833	1569	307,03	4,9114	0,01600		
155	2	1,833	1569	309,13	4,9821	0,01612		

Tabela A.6 (continuação) – Resultados dos testes da válvula de 70 mm com as partículas de 1,216 mm

(conclusão)

teste	N° Rotâmetro	Vazão ar inserida	Δp	Tempo	Massa medida	Taxa de massa	Média taxa de massa	Desvio padrão da taxa de massa
156	2	2,000	1863	305,23	8,0266	0,02630	0,027055	2,2%
157	2	2,000	1863	303,49	8,0246	0,02644		
158	2	2,000	1863	304,32	8,3262	0,02736		
159	2	2,000	1863	305,89	8,3722	0,02737		
160	2	2,000	1863	316,94	8,8130	0,02781		
161	2	2,167	2256	181,76	8,3023	0,04568	0,047023	2,1%
162	2	2,167	2256	180,93	8,3238	0,04601		
163	2	2,167	2256	181,02	8,6062	0,04754		
164	2	2,167	2256	182,43	8,7035	0,04771		
165	2	2,167	2256	181,30	8,7351	0,04818		
166	2	2,333	2599	90,29	7,2908	0,08075	0,083805	3,5%
167	2	2,333	2599	90,71	7,3544	0,08108		
168	2	2,333	2599	89,77	7,4215	0,08267		
169	2	2,333	2599	91,57	7,9584	0,08691		
170	2	2,333	2599	92,85	8,1353	0,08762		
171	2	2,500	2893	44,16	6,8738	0,15566	0,172309	6,6%
172	2	2,500	2893	38,37	6,3115	0,16449		
173	2	2,500	2893	37,64	6,4838	0,17226		
174	2	2,500	2893	37,43	6,8170	0,18213		
175	2	2,500	2893	36,81	6,8840	0,18701		
176	2	2,667	2991	20,07	6,5548	0,32660	0,343761	5,4%
177	2	2,667	2991	20,40	6,7285	0,32983		
178	2	2,667	2991	20,09	6,6390	0,33046		
179	2	2,667	2991	21,41	7,7205	0,36060		
180	2	2,667	2991	18,17	6,7468	0,37132		

Obs: Rotâmetro 2: fabricante AppliTech, faixa de 30 a 450 LPM (1,8 a 27 m³/h) com uma resolução de 10 LPM (0,6 m³/h),

APÊNDICE B – TABELAS E GRÁFICOS DOS CÁLCULOS DAS CORRELAÇÕES ATRAVÉS DOS NÚMEROS ADIMENSIONAIS

- Primeiro grupo de números adimensionais utilizando curvas na forma exponencial:

A Tabela B.7 mostra os números adimensionais calculados com base nos testes e com base na correlação proposta na seção 4.3. Com os valores desta tabela construiu-se a Figura B.1, que por sua vez, mostra a relação π_1 em função de π_2 com as equações das curvas que melhor se adaptam a cada grupo de ensaios. A Figura B.2 foi feita com base no π_3 (tabela) e nos coeficientes da Figura B.1. As duas equações são os coeficientes utilizados para gerar a correlação com este grupo de números adimensionais para este formato de curva.

Tabela B.7 – Valores do primeiro grupo de números adimensionais calculados em função dos testes e em função da correlação proposta

Válvula L 34 mm, Partícula 0,8 mm						Válvula L 34 mm, Partícula 1,216 mm					
Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença	Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença
[m ³ /s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[m ³ /s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0.00021	3.04	9.53	0.000425961	8.6924E-05	80%	0.00050	1.95	9.53	0.002056055	0.00283863	38%
0.00028	2.28	9.53	0.000799573	0.000992639	24%	0.00067	1.46	9.53	0.006499585	0.013560258	109%
0.00035	1.82	9.53	0.003498211	0.004279392	22%	0.00083	1.17	9.53	0.020162939	0.034654802	72%
0.00042	1.52	9.53	0.012269579	0.01133555	8%	0.00100	0.97	9.53	0.059764655	0.06477793	8%
0.00049	1.30	9.53	0.028184053	0.022731532	19%	0.00117	0.84	9.53	0.110607751	0.101268069	8%
0.00050	1.26	9.53	0.0488801	0.025526605	48%	0.00133	0.73	9.53	0.171286782	0.141581538	17%
0.00067	0.95	9.53	0.083797569	0.070417583	16%	0.00150	0.65	9.53	0.183349555	0.18373835	0%
0.00083	0.76	9.53	0.120050497	0.129447584	8%						
0.00100	0.63	9.53	0.155596896	0.194253644	25%						
0.00117	0.54	9.53	0.174763302	0.259585272	49%						
0.00133	0.47	9.53	0.201669124	0.322636282	60%						
Válvula L 70 mm, Partícula 0,8 mm						Válvula L 70 mm, Partícula 1,216 mm					
Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença	Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença
[m ³ /s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[m ³ /s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0.00050	5.36	7.12	0.000431506	0.000105611	76%	0.00100	4.13	7.12	0.000581892	0.000612311	5%
0.00067	4.02	7.12	0.000821784	0.000716791	13%	0.00117	3.54	7.12	0.000913482	0.001422928	56%
0.00083	3.22	7.12	0.001740542	0.002261535	30%	0.00133	3.10	7.12	0.001520327	0.002678188	76%
0.00100	2.68	7.12	0.002509451	0.004864938	94%	0.00150	2.75	7.12	0.002027313	0.004379897	116%
0.00117	2.30	7.12	0.00526874	0.008408171	60%	0.00167	2.48	7.12	0.002718536	0.006491756	139%
0.00133	2.01	7.12	0.020573945	0.012674175	38%	0.00183	2.25	7.12	0.004198476	0.008957525	113%
0.00150	1.79	7.12	0.035201542	0.017439491	50%	0.00200	2.07	7.12	0.006527662	0.011714119	79%
						0.00217	1.91	7.12	0.010153357	0.014699575	45%
						0.00233	1.77	7.12	0.016913619	0.017857265	6%
						0.00250	1.65	7.12	0.033470495	0.021137667	37%
						0.00267	1.55	7.12	0.068890799	0.02449875	64%

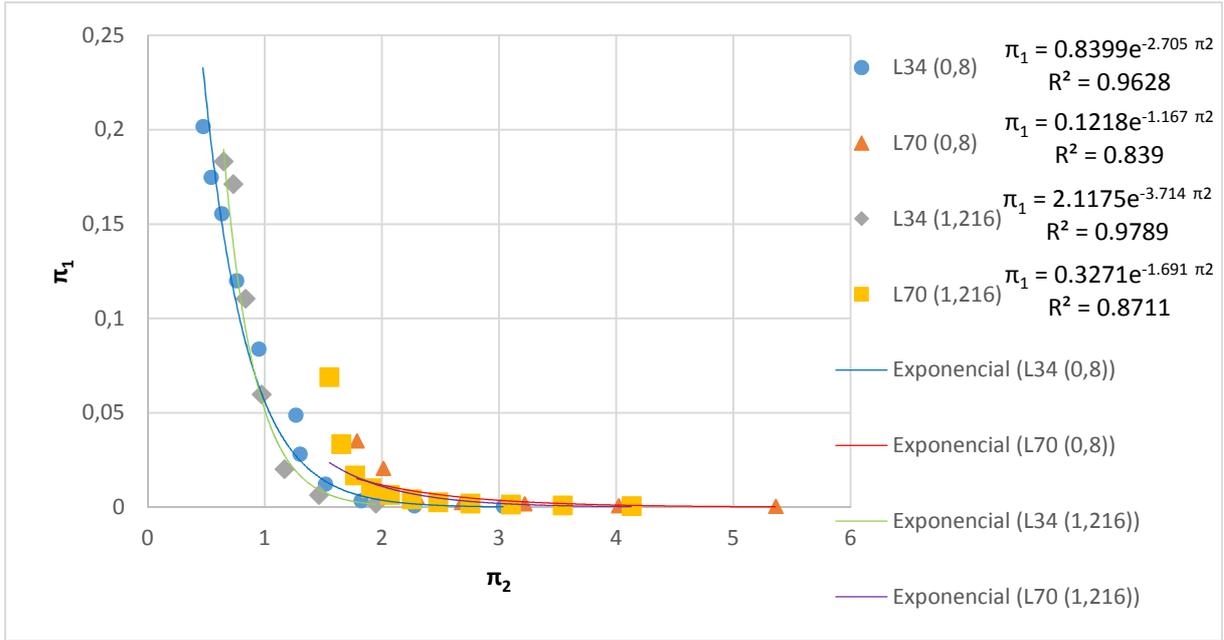


Figura B.1 – Gráfico de π_1 versus π_2 , com suas respectivas curvas que se ajustam para cada grupo de ensaios.

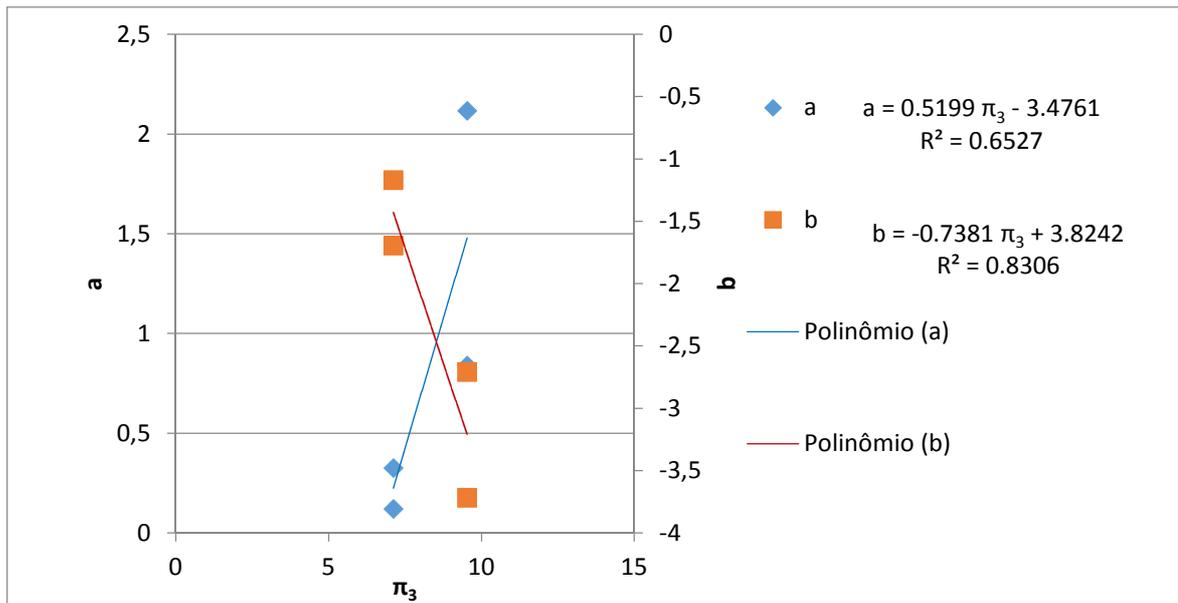


Figura B.2 – Número adimensional π_3 plotado em relação aos coeficientes a (losango) e b (quadrado).

-Segundo grupo de números adimensionais utilizando curvas na forma potencial:

A Tabela B.8 mostra os números adimensionais calculados com base nos testes e com base na correlação proposta na seção 4.3. Com os valores desta tabela construiu-se a Figura B.3, que por sua vez, mostra a relação π_1 em função de π_2 com as equações das curvas que melhor se adaptam a cada grupo de ensaios. A Figura B.4 foi feita com base no π_3 (tabela) e nos coeficientes da Figura B.3. As duas equações são os coeficientes utilizados para gerar a correlação com este grupo de números adimensionais para este formato de curva.

Tabela B.8 – Valores do segundo grupo de números adimensionais (equação potencial) calculados em função dos testes e em função da correlação proposta

Válvula L 34 mm, Partícula 0,8 mm					
Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença
[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0.00021	538.50	0.0001922	5208.56	39317.27	653%
0.00028	718.00	0.0001922	12433.79	93673.28	653%
0.00035	897.50	0.0001922	47982.75	183681.20	283%
0.00042	1077.00	0.0001922	150029.62	318429.24	112%
0.00049	1256.49	0.0001922	321082.16	507038.31	58%
0.00050	1292.39	0.0001922	584701.37	552028.06	6%
0.00067	1723.19	0.0001922	807474.74	1315205.09	63%
0.00083	2153.99	0.0001922	989270.75	2578947.32	161%
0.00100	2584.79	0.0001922	1034023.60	4470856.12	332%
0.00117	3015.59	0.0001922	995481.00	7118992.54	615%
0.00133	3446.38	0.0001922	904633.59	10651800.32	1077%

Válvula L 34 mm, Partícula 1,216 mm					
Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença
[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0.00050	1292.39	0.0000547	13663.57	3628546866.96	26556260%
0.00067	1723.19	0.0000547	40169.65	13962260295.96	34758129%
0.00083	2153.99	0.0000547	112554.45	39709091390.16	35279796%
0.00100	2584.79	0.0000547	317734.17	93278426812.47	29357279%
0.00117	3015.59	0.0000547	525033.54	192028331162.94	36574388%
0.00133	3446.38	0.0000547	711431.99	358925410888.66	50451020%
0.00150	3877.18	0.0000547	649842.50	623170226322.53	95895479%

Válvula L 70 mm, Partícula 0,8 mm					
Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença
[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0.00050	627.73	0.0001435	18351.66	1013161.30	5421%
0.00067	836.98	0.0001435	35744.21	2968833.03	8206%
0.00083	1046.22	0.0001435	74697.00	6835135.36	9050%
0.00100	1255.47	0.0001435	111576.38	13509973.11	12008%
0.00117	1464.71	0.0001435	244446.41	24034804.68	9732%
0.00133	1673.96	0.0001435	954540.72	39587827.18	4047%
0.00150	1883.20	0.0001435	1587830.41	61478490.52	3772%

Válvula L 70 mm, Partícula 1,216 mm					
Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença
[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0.00100	1255.47	0.0000409	5624.43	29782487226.50	529520350%
0.00117	1464.71	0.0000409	10595.39	62312941759.51	588113775%
0.00133	1673.96	0.0000409	19838.38	118116232011.92	595392314%
0.00150	1883.20	0.0000409	28740.07	207628027754.87	722433872%
0.00167	2092.45	0.0000409	40991.64	343894183847.63	838937176%
0.00183	2301.69	0.0000409	70833.04	542825243267.10	766344629%
0.00200	2510.94	0.0000409	119880.05	823445003500.26	686890678%
0.00217	2720.18	0.0000409	208358.40	1208133865791.17	579834376%
0.00233	2929.43	0.0000409	371339.61	1722867541419.28	463959975%
0.00250	3138.67	0.0000409	763501.29	2397451583060.66	314007436%
0.00267	3347.92	0.0000409	1523203.63	3265752129525.03	214400132%

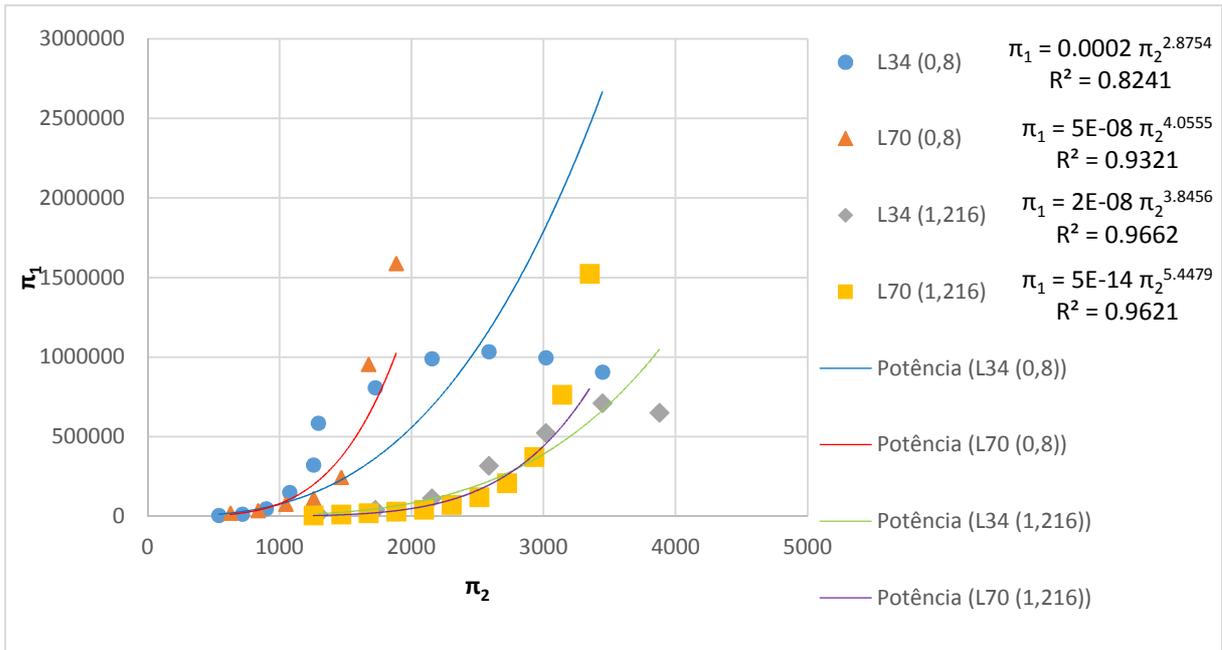


Figura B.3 – Gráfico de π_1 versus π_2 , com suas respectivas curvas que se ajustam para cada grupo de ensaios.

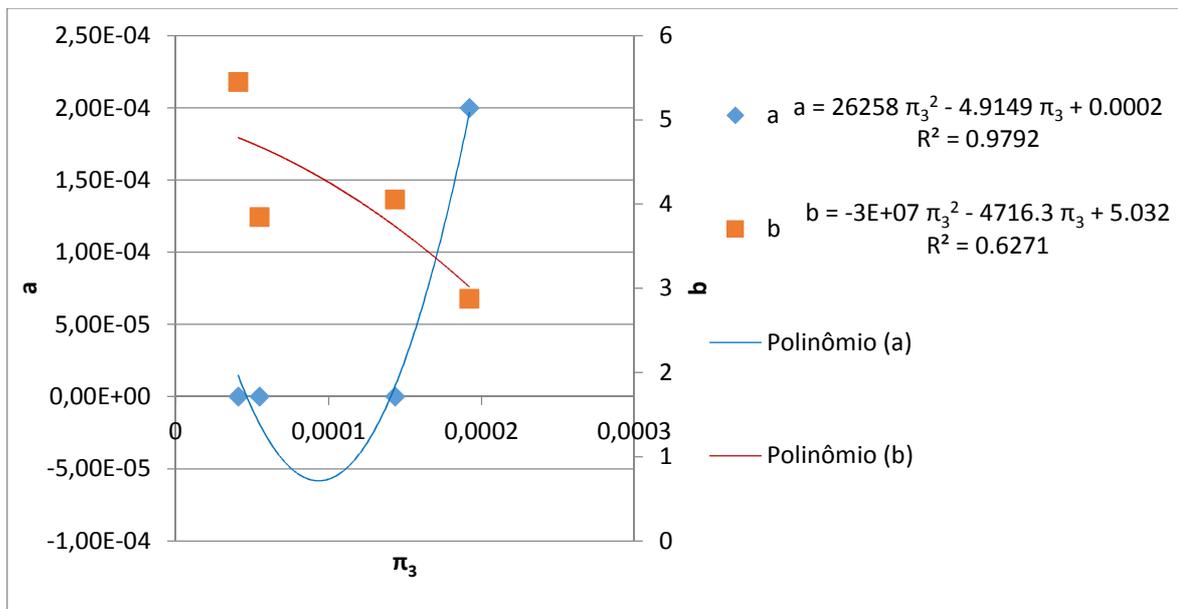


Figura B.4 – Número adimensional π_3 plotado em relação aos coeficientes a (losango) e b (quadrado).

- Segundo grupo de números adimensionais utilizando curvas na forma exponencial:

A Tabela B.9 mostra os números adimensionais calculados com base nos testes e com base na correlação proposta na seção 4.3. Com os valores desta tabela construiu-se a Figura B.5, que por sua vez, mostra a relação π_1 em função de π_2 com as equações das curvas

que melhor se adaptam a cada grupo de ensaios. A Figura B.6 foi feita com base no π_3 (tabela) e nos coeficientes da Figura B.5. As duas equações são os coeficientes utilizados para gerar a correlação com este grupo de números adimensionais para este formato de curva.

Tabela B.9 – Valores do segundo grupo de números adimensionais (equação exponencial) calculados em função dos testes e em função da correlação proposta

Válvula L 34 mm, Partícula 0,8 mm						Válvula L 34 mm, Partícula 1,216 mm					
Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença	Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença
[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0.00021	538.50	0.0001922	5208.56	70788.05	1259%	0.00050	1292.39	0.0000547	13663.57	53092.19	289%
0.00028	718.00	0.0001922	12433.79	95611.68	669%	0.00067	1723.19	0.0000547	40169.65	156037.47	288%
0.00035	897.50	0.0001922	47982.75	129140.33	169%	0.00083	2153.99	0.0000547	112554.45	458592.74	307%
0.00042	1077.00	0.0001922	150029.62	174426.66	16%	0.00100	2584.79	0.0000547	317734.17	1347799.97	324%
0.00049	1256.49	0.0001922	321082.16	235593.78	27%	0.00117	3015.59	0.0000547	525033.54	3961172.09	654%
0.00050	1292.39	0.0001922	584701.37	250192.34	57%	0.00133	3446.38	0.0000547	711431.99	11641849.41	1536%
0.00067	1723.19	0.0001922	807474.74	514749.97	36%	0.00150	3877.18	0.0000547	649842.50	34215291.53	5165%
0.00083	2153.99	0.0001922	989270.75	1059055.30	7%						
0.00100	2584.79	0.0001922	1034023.60	2178918.34	111%						
0.00117	3015.59	0.0001922	995481.00	4482943.52	350%						
0.00133	3446.38	0.0001922	904633.59	9223283.99	920%						

Válvula L 70 mm, Partícula 0,8 mm						Válvula L 70 mm, Partícula 1,216 mm					
Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença	Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença
[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0.00050	627.73	0.0001435	18351.66	84369.37	360%	0.00100	1255.47	0.0000409	5624.43	41198.26	632%
0.00067	836.98	0.0001435	35744.21	168131.84	370%	0.00117	1464.71	0.0000409	10595.39	61849.09	484%
0.00083	1046.22	0.0001435	74697.00	335054.23	349%	0.00133	1673.96	0.0000409	19838.38	92851.26	368%
0.00100	1255.47	0.0001435	111576.38	667698.30	498%	0.00150	1883.20	0.0000409	28740.07	139393.43	385%
0.00117	1464.71	0.0001435	244446.41	1330593.59	444%	0.00167	2092.45	0.0000409	40991.64	209265.09	411%
0.00133	1673.96	0.0001435	954540.72	2651615.73	178%	0.00183	2301.69	0.0000409	70833.04	314160.26	344%
0.00150	1883.20	0.0001435	1587830.41	5284157.39	233%	0.00200	2510.94	0.0000409	119880.05	471634.68	293%
						0.00217	2720.18	0.0000409	208358.40	708043.94	240%
						0.00233	2929.43	0.0000409	371339.61	1062954.53	186%
						0.00250	3138.67	0.0000409	763501.29	1595765.84	109%
						0.00267	3347.92	0.0000409	1523203.63	2395651.51	57%

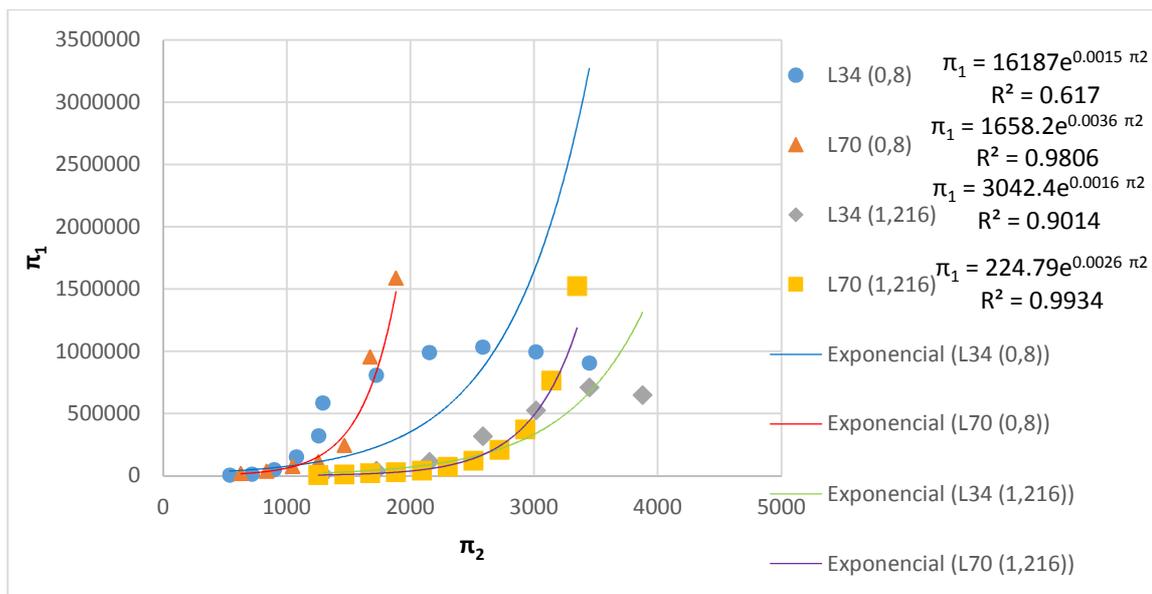


Figura B.5 – Gráfico de π_1 versus π_2 , com suas respectivas curvas que se ajustam para cada grupo de ensaios.

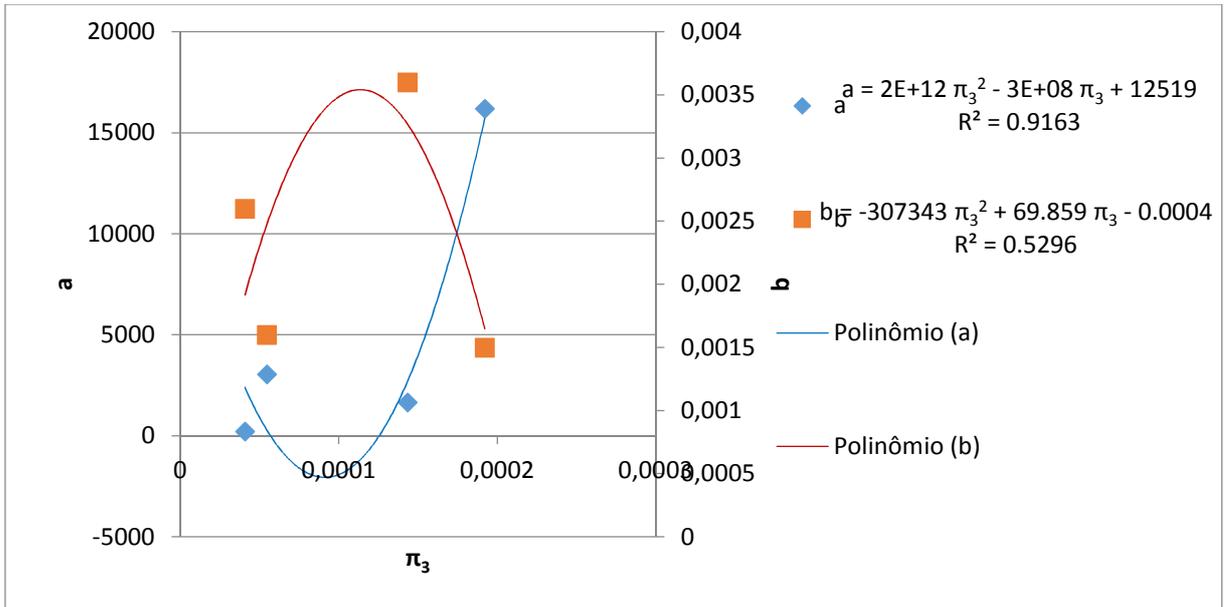


Figura B.6 – Número adimensional π_3 plotado em relação aos coeficientes a (losango) e b (quadrado).

-Terceiro grupo de números adimensionais utilizando curvas na forma potencial:

A Tabela B.10 mostra os números adimensionais calculados com base nos testes e com base na correlação proposta na seção 4.3. Com os valores desta tabela construiu-se a Figura B.7, que por sua vez, mostra a relação π_1 em função de π_2 com as equações das curvas que melhor se adaptam a cada grupo de ensaios. A Figura B.8 foi feita com base no π_3 (tabela) e nos coeficientes da Figura B.7. As duas equações são os coeficientes utilizados para gerar a correlação com este grupo de números adimensionais para este formato de curva.

Tabela B.10 – Valores do terceiro grupo de números adimensionais (equação potencial) calculados em função dos testes e em função da correlação proposta

Válvula L 34 mm, Partícula 0,8 mm					
Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença
[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0.00021	0.14905	42.50	0.00467	0.01805	287%
0.00028	0.08384	42.50	0.00835	0.04523	442%
0.00035	0.05366	42.50	0.02579	0.09224	258%
0.00042	0.03726	42.50	0.06719	0.16509	146%
0.00049	0.02738	42.50	0.12325	0.27008	119%
0.00050	0.02588	42.50	0.21821	0.29550	35%
0.00067	0.01456	42.50	0.22602	0.74047	228%
0.00083	0.00932	42.50	0.22152	1.50990	582%
0.00100	0.00647	42.50	0.19295	2.70260	1301%
0.00117	0.00475	42.50	0.15922	4.42130	2677%
0.00133	0.00364	42.50	0.12661	6.77212	5249%

Válvula L 34 mm, Partícula 1,216 mm					
Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença
[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0.00050	0.03933	27.96	0.00510	0.03532	593%
0.00067	0.02212	27.96	0.01124	0.07043	526%
0.00083	0.01416	27.96	0.02520	0.12029	377%
0.00100	0.00983	27.96	0.05929	0.18628	214%
0.00117	0.00722	27.96	0.08398	0.26963	221%
0.00133	0.00553	27.96	0.09957	0.37143	273%
0.00150	0.00437	27.96	0.08084	0.49269	509%

Válvula L 70 mm, Partícula 1,216 mm					
Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença
[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0.00100	0.17667	57.57	0.00216	0.03141	1353%
0.00117	0.12980	57.57	0.00349	0.05521	1482%
0.00133	0.09938	57.57	0.00572	0.09000	1474%
0.00150	0.07852	57.57	0.00736	0.13849	1781%
0.00167	0.06360	57.57	0.00945	0.20363	2055%
0.00183	0.05256	57.57	0.01484	0.28861	1844%
0.00200	0.04417	57.57	0.02303	0.39682	1623%
0.00217	0.03763	57.57	0.03695	0.53187	1340%
0.00233	0.03245	57.57	0.06114	0.69756	1041%
0.00250	0.02827	57.57	0.11733	0.89789	665%
0.00267	0.02484	57.57	0.21945	1.13708	418%

Válvula L 70 mm, Partícula 0,8 mm					
Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença
[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0.00050	0.46493	87.50	0.01410	0.01211	14%
0.00067	0.26153	87.50	0.02060	0.03321	61%
0.00083	0.16738	87.50	0.03444	0.07266	111%
0.00100	0.11623	87.50	0.04287	0.13774	221%
0.00117	0.08540	87.50	0.08050	0.23654	194%
0.00133	0.06538	87.50	0.27504	0.37788	37%
0.00150	0.05166	87.50	0.40668	0.57122	40%

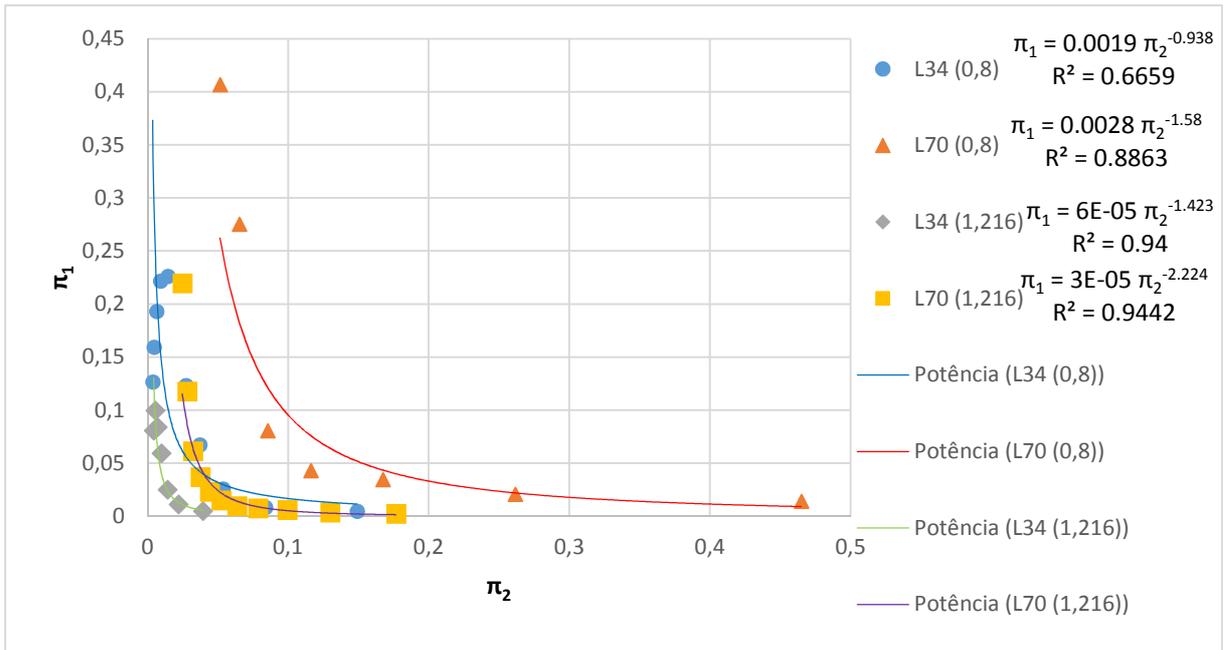


Figura B.7 – Gráfico de π_1 versus π_2 , com suas respectivas curvas que se ajustam para cada grupo de ensaios.

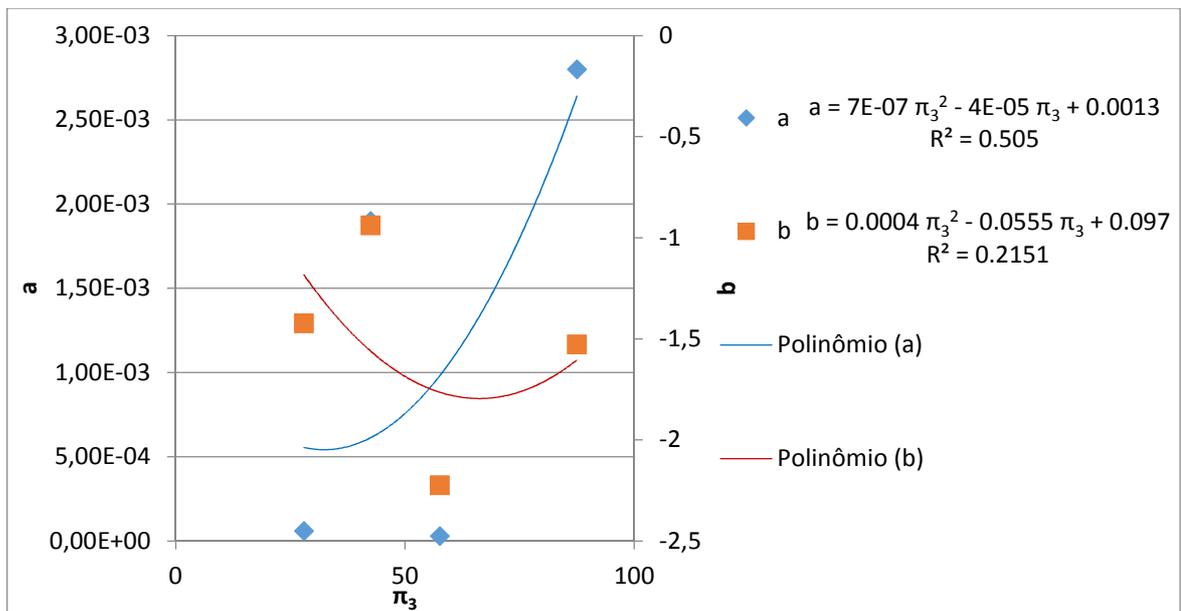


Figura B.8 – Número dimensional π_3 plotado em relação aos coeficientes a (losango) e b (quadrado).

-Terceiro grupo de números adimensionais utilizando curvas na forma exponencial:

A Tabela B.11 mostra os números adimensionais calculados com base nos testes e com base na correlação proposta na seção 4.3. Com os valores desta tabela construiu-se a Figura B.9, que por sua vez, mostra a relação π_1 em função de π_2 com as equações das curvas que melhor se adaptam a cada grupo de ensaios. A Figura B.10 foi feita com base no π_3 (tabela) e nos coeficientes da Figura B.9. As duas equações são os coeficientes utilizados para gerar a correlação com este grupo de números adimensionais para este formato de curva.

Tabela B.11 – Valores do terceiro grupo de números adimensionais (equação exponencial) calculados em função dos testes e em função da correlação proposta

Válvula L 34 mm, Partícula 0,8 mm					
Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença
[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0.00021	0.14905	42.50	0.00467	0.00024	95%
0.00028	0.08384	42.50	0.00835	0.00406	51%
0.00035	0.05366	42.50	0.02579	0.01500	42%
0.00042	0.03726	42.50	0.06719	0.03050	55%
0.00049	0.02738	42.50	0.12325	0.04679	62%
0.00050	0.02588	42.50	0.21821	0.04993	77%
0.00067	0.01456	42.50	0.22602	0.08151	64%
0.00083	0.00932	42.50	0.22152	0.10226	54%
0.00100	0.00647	42.50	0.19295	0.11567	40%
0.00117	0.00475	42.50	0.15922	0.12460	22%
0.00133	0.00364	42.50	0.12661	0.13075	3%

Válvula L 34 mm, Partícula 1,216 mm					
Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença
[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0.00050	0.03933	27.96	0.00510	0.00565	11%
0.00067	0.02212	27.96	0.01124	0.02383	112%
0.00083	0.01416	27.96	0.02520	0.04638	84%
0.00100	0.00983	27.96	0.05929	0.06660	12%
0.00117	0.00722	27.96	0.08398	0.08283	1%
0.00133	0.00553	27.96	0.09957	0.09543	4%
0.00150	0.00437	27.96	0.08084	0.10515	30%

Válvula L 70 mm, Partícula 0,8 mm					
Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença
[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0.00050	0.46493	87.50	0.01410	0.00353	75%
0.00067	0.26153	87.50	0.02060	0.01993	3%
0.00083	0.16738	87.50	0.03444	0.04441	29%
0.00100	0.11623	87.50	0.04287	0.06863	60%
0.00117	0.08540	87.50	0.08050	0.08923	11%
0.00133	0.06538	87.50	0.27504	0.10580	62%
0.00150	0.05166	87.50	0.40668	0.11890	71%

Válvula L 70 mm, Partícula 1,216 mm					
Aeração	PI2	PI3	PI1 (Testes)	PI1 (Calculado)	Diferença
[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0.00100	0.17667	57.57	0.00216	0.00863	299%
0.00117	0.12980	57.57	0.00349	0.01870	436%
0.00133	0.09938	57.57	0.00572	0.03089	440%
0.00150	0.07852	57.57	0.00736	0.04357	492%
0.00167	0.06360	57.57	0.00945	0.05573	490%
0.00183	0.05256	57.57	0.01484	0.06685	350%
0.00200	0.04417	57.57	0.02303	0.07678	233%
0.00217	0.03763	57.57	0.03695	0.08552	131%
0.00233	0.03245	57.57	0.06114	0.09316	52%
0.00250	0.02827	57.57	0.11733	0.09981	15%
0.00267	0.02484	57.57	0.21945	0.10561	52%

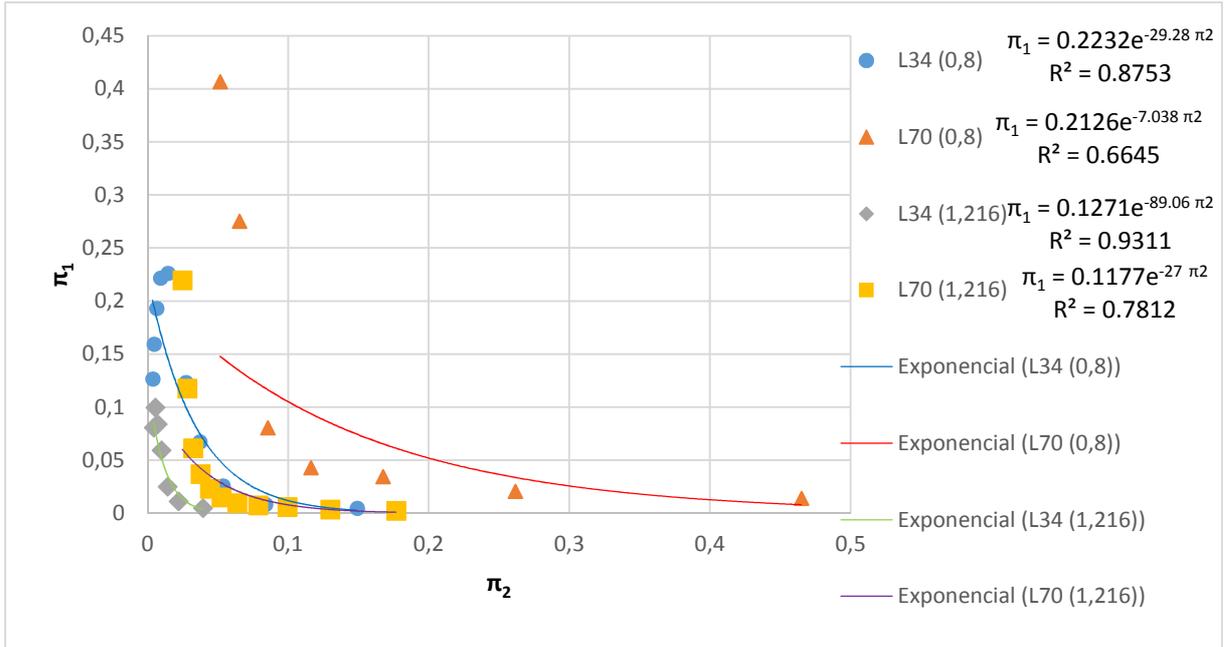


Figura B.9 – Gráfico de π_1 versus π_2 , com suas respectivas curvas que se ajustam para cada grupo de ensaios.

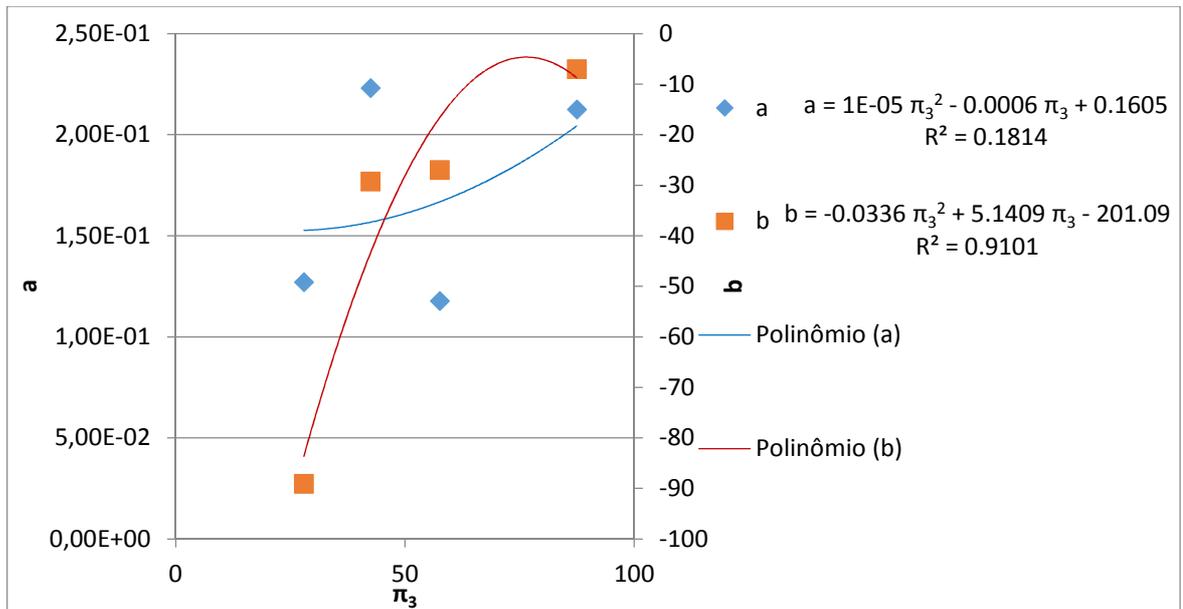


Figura B.10 – Número adimensional π_3 plotado em relação aos coeficientes a (losango) e b (quadrado).