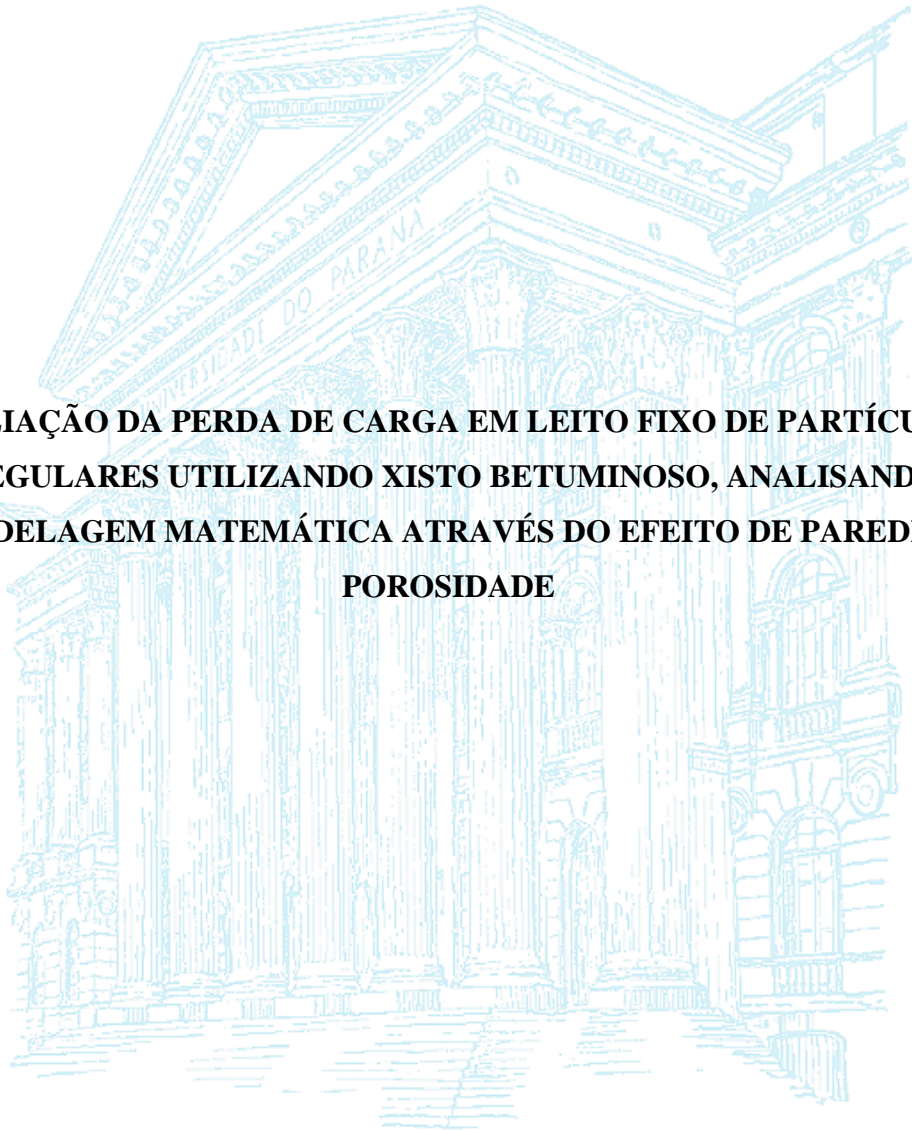


**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**JULIANA PEDRILHO FOLTIN**



**AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM LEITO FIXO DE PARTÍCULAS  
IRREGULARES UTILIZANDO XISTO BETUMINOSO, ANALISANDO A  
MODELAGEM MATEMÁTICA ATRAVÉS DO EFEITO DE PAREDE E  
POROSIDADE**

**CURITIBA**

**2013**

**JULIANA PEDRILHO FOLTIN**

**AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM LEITO FIXO DE PARTÍCULAS  
IRREGULARES UTILIZANDO XISTO BETUMINOSO, ANALISANDO A  
MODELAGEM MATEMÁTICA ATRAVÉS DO EFEITO DE PAREDE E  
POROSIDADE**

Dissertação apresentada ao curso de  
Mestrado em Engenharia Química da  
Universidade Federal do Paraná, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. Alexandre  
Knesebeck

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Itsuo  
Yamamoto

**CURITIBA**

**2013**

---

F671a

Foltin, Juliana Pedrilho

Avaliação da perda de carga em leito fixo de partículas irregulares utilizando xisto betuminoso, analisando a modelagem matemática através do efeito de parede e porosidade / Juliana Pedrilho Foltin. – Curitiba, 2013. 104f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Exatas, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, 2013.

Orientador: Alexandre Knesebeck -- Co-orientador: Carlos Itsuo Yamamoto.

Bibliografia: p. 86-90.

1. Partículas. 2. Velocidade. 3. Dinâmica dos Fluidos I. Universidade Federal do Paraná. II. Knesebeck, Alexandre. III. Yamamoto, Carlos Itsuo. IV. Título.

CDD: 532.57

---



Ministério da Educação e do Desporto  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Setor de Tecnologia  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



## ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos vinte e sete dias do mês de maio de 2013, no Auditório Inferior do Prédio de Engenharia Química no Centro Politécnico – UFPR foi instalada pelo Prof. Dr. Alexandre Knesebeck, professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, a Banca Examinadora para a quinquagésima defesa de dissertação de mestrado na área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos. Estiveram presentes no ato, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, foi constituída pelos professores doutores: Alexandre Knesebeck (PPGEQ/UFPR), Carlos Itsuo Yamamoto (PPGEQ/UFPR), Marcelo Kaminski Lenzi (PPGEQ/UFPR) e Oswaldo Curty da Motta Lima (DEQ/UEM). Às 13h30min, a banca iniciou os trabalhos, convidando a candidata **Juliana Pedrilho Foltin** a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada *“Avaliação da perda de carga em leito fixo de partículas irregulares utilizando xisto betuminoso, analisando a modelagem matemática através do efeito de parede e porosidade”*. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca decidiu pela APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68º e 69º da Resolução 65/09 – CEPE/UFPR de 30.10.2009).

Curitiba, 27 de maio de 2013.

---

Prof. Dr. Alexandre Knesebeck  
(PPGEQ/UFPR) – Orientador

---

Prof. Dr. Carlos Itsuo Yamamoto  
(PPGEQ/UFPR) – Coorientador

---

Prof. Dr. Marcelo Kaminski Lenzi  
(PPGEQ/UFPR) – Membro Titular Interno

---

Prof. Dr. Oswaldo Curty da Motta Lima  
(DEQ/UEM) – Membro Titular Externo

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que fizeram de alguma forma parte deste trabalho, contribuindo para o meu crescimento e desenvolvimento pessoal.

Aos meus pais, Fabio e Maria do Carmo pelo apoio e também a minha irmã Cristina. Ao Guilherme Prado, pela paciência e ajuda que transmitiu durante todo este período.

A todos professores da PPGEQ agradeço pelos ensinamentos, à Cintya Kuznharski pela dedicação ao PPGEQ. Também aos meus amigos que de uma forma direta ou indiretamente colaboraram, em especial meus amigos da Turma 5 do mestrado, desde o período das aulas até os momentos descontraídos que tivemos. Um muito obrigado à Alexis Escorsim, Bruno Paulin, Giselle Silva, Larissa Cesa, Larissa Pereira, Luís Ricardo e Paola obrigada pelas lembranças boas que vou levar durante toda à vida.

Agradeço também ao meu orientador Alexandre Knesebeck pela ajuda, compreensão e confiança para que este trabalho fosse realizado.

Gostaria de agradecer também o professor Carlos Itsuo Yamamoto pela parceria nos trabalhos publicados em congresso.

Ao aluno Vitor Kawazoe pela colaboração fazendo este trabalho parte do projeto de iniciação científica.

Sou grata também ao professor Juarez e técnicos pela ajuda ao material emprestado e ao Laboratório de Mineração (LAMIR) pelo empréstimo de equipamentos.

À Faculdade Federal do Paraná pela realização do mestrado e ao programa CAPES /REUNI pelo apoio financeiro.

“Sucesso é o resultado da prática constante de fundamentos e ações vencedoras. Não há nada de milagroso no processo, nem sorte envolvida. Amadores aspiram, profissionais trabalham.” (Bill Russel)

## RESUMO

Em aplicações industriais no ramo da Engenharia Química, reatores de leito fixo têm sido utilizados há mais de 70 anos. O estudo dos escoamentos de fluidos representa uma etapa importante nos processos industriais, tanto no ponto de vista de eficiência (torres de absorção), seletividade e processos de separação, quanto à absorção de gás, de extração e fluidização. A perda de carga influi na velocidade de mínima fluidização, e a influência da parede na fluidodinâmica deve ser conhecida para possibilitar a utilização de dados de laboratório em pequena escala no projeto desses sistemas. Este trabalho tem por objetivo validar os modelos matemáticos para o efeito parede na perda de carga em um leito de partículas irregulares de xisto betuminoso, envolvendo diferentes velocidades de escoamento do ar. As amostras utilizadas foram classificadas em doze faixas granulométricas utilizando peneiras, com tamanhos de partículas que variam entre 0,256 e 4,38 milímetros. Foram obtidos dados experimentais de perda de carga em função da velocidade, variando o diâmetro, em faixas de velocidade compreendendo os regimes laminar e intermediários. Os resultados mostram a influência do efeito parede na determinação experimental da perda de carga e na velocidade de mínima fluidização de partículas irregulares de diversas faixas granulométricas, sendo que, se o efeito parede não for considerado, é possível exceder a perda de carga do leito fixo. Os resultados obtidos podem ser usados para a modelagem de sistemas industriais de grandes dimensões e direcionar estudos de sistemas mais complexos.

Palavras chaves: partículas irregulares, perda de carga, xisto betuminoso, leito fixo.

## ABSTRACT

In industrial applications in the field of Chemical Engineering, fixed bed reactors have been used for over 70 years. The study of fluid flow is an important step in the industrial process both from the point of view of efficiency (absorption towers), selectivity and separation processes, as the gas absorption, extraction and fluidization. The pressure drop has influence in minimum fluidization velocity, and the wall effect in the fluid dynamics must be known in order to allow the use of laboratory data in small scale in the design systems. The objective of this research is to validate mathematical modelling of the wall effect in a fixed bed composed by oil shale irregular particles, involving different air velocities flow. The samples used have been classified in twelve granulometry ranges using screens, with particles sizes between 0,256 e 4,38 millimeters. Pressure drop experimental data have been acquired as a function of the velocity, varying the diameter, in velocity ranges involving laminar and transition flow. The results have shown the influence of the wall effect in the pressure drop and in the minimum fluidization velocity of irregular particles of several granulometric ranges, and that, if the wall effect was not to be considered, it is possible to exceed the fixed bed pressure drop. The results obtained can be used for the modelling of large scale industrial systems and orientate the study of more complex systems.

Keywords: irregular particles, pressure drop, oil shale, fixed bed.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DE SÓLIDOS .....	20
FIGURA 2 – PROCEDIMENTO DO PROCESSO PETROSIX®.....	21
FIGURA 3 – FLUXOGRAMA ESQUEMATIZADO DO PROCESSO DE RETORTAGEM DE XISTO.....	22
FIGURA 4 – FLUXOGRAMA ESQUEMATIZADO DOS REGIMES DE FLUXO E LEITOS FLUIDIZADOS.....	24
FIGURA 5 – AMOSTRAS DE XISTO UTILIZADOS NO EXPERIMENTO.....	41
FIGURA 6 – AMOSTRAS DE XISTO UTILIZADOS NO EXPERIMENTO.....	41
FIGURA 7 – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA A REALIZAÇÃO DOS TESTES.....	44
FIGURA 8 – PERDA DE CARGA PARA AS COLUNAS VAZIAS.....	45
FIGURA 9 – TRIPLICATA DOS TESTES REFERENTES A AMOSTRA $f_1$ PARA A COLUNA DE 0,0173 m.....	45
FIGURA 10 - TRIPLICATA DOS TESTES REFERENTES A AMOSTRA $f_3$ PARA A COLUNA DE 0,0354 m.....	46
FIGURA 11 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VALORES DE POROSIDADE EXPERIMENTAIS REFERENTES À FAIXA $f_1$ .....	51
FIGURA 12 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VALORES DE POROSIDADE EXPERIMENTAIS REFERENTES À FAIXA $f_5$ .....	51
FIGURA 13 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VALORES DE POROSIDADE EXPERIMENTAIS REFERENTES À FAIXA $f_7$ .....	52
FIGURA 14 – POROSIDADE DO LEITO EXPERIMENTAL REALIZADA COM CINCO AMOSTRAS DE CADA FAIXA GRANULOMÉTRICA.....	53
FIGURA 15 – POROSIDADE DO LEITO EXPERIMENTAL PARA TODAS AS FAIXAS UTILIZADAS, EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DA COLUNA.....	54
FIGURA 16 – COMPARAÇÃO ENTRE A POROSIDADE MÉDIA E A POROSIDADE REAL DOS EXPERIMENTOS DE PERDA DE CARGA.. .....	54
FIGURA 17 – POROSIDADES MÉDIAS EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DA PARTÍCULA .....	56
FIGURA 18 - COMPARAÇÃO ENTRE DADOS EXPERIMENTAIS PARA PARTÍCULAS $f_1$ REFERENTE À COLUNA DE 0,0470 m DE DIÂMETRO .....	59
FIGURA 19 - BARRA DE ERRO DOS DADOS EXPERIMENTAIS PARA PARTÍCULAS $f_1$ REFERENTE À COLUNA DE 0,0470 m DE DIÂMETRO COM 95% DE CONFIANÇA .....	60
FIGURA 20 - COMPARAÇÃO ENTRE DADOS EXPERIMENTAIS PARA PARTÍCULAS $f_2$ REFERENTE À COLUNA DE 0,0354 m DE DIÂMETRO .....	60
FIGURA 21 - BARRA DE ERRO DOS DADOS EXPERIMENTAIS PARA PARTÍCULAS $f_2$ REFERENTE À COLUNA DE 0,0354 m DE DIÂMETRO COM 95% DE CONFIANÇA .....	61

FIGURA 22 - COMPARAÇÃO ENTRE DADOS EXPERIMENTAIS PARA PARTÍCULAS $f_3$ REFERENTE À COLUNA DE 0,0246 m DE DIÂMETRO .....	61
FIGURA 23 - BARRA DE ERRO DOS DADOS EXPERIMENTAIS PARA PARTÍCULAS $f_3$ REFERENTE À COLUNA DE 0,0246 m DE DIÂMETRO COM 95% DE CONFIANÇA	62
FIGURA 24 – COMPARAÇÃO ENTRE DADOS EXPERIMENTAIS PARA PARTÍCULAS $f_7$ REFERENTE À COLUNA DE 0,0173 m DE DIÂMETRO .....	62
FIGURA 25 - BARRA DE ERRO DOS DADOS EXPERIMENTAIS PARA PARTÍCULAS $f_7$ REFERENTE À COLUNA DE 0,0173 m DE DIÂMETRO COM 95% DE CONFIANÇA	63
FIGURA 26 - DADOS EXPERIMENTAIS E MODELOS DA LITERATURA, LEITO COMPOSTO POR PARTÍCULAS $f_7$ REPRESENTANDO A COLUNA DE 0,0173 m DE DIÂMETRO.....	65
FIGURA 27 - DADOS EXPERIMENTAIS E MODELOS DA LITERATURA, LEITO COMPOSTO POR PARTÍCULAS $f_3$ REPRESENTANDO A COLUNA DE 0,0246 m DE DIÂMETRO.....	66
FIGURA 28 – DADOS EXPERIMENTAIS E MODELOS DA LITERATURA, LEITO COMPOSTO POR PARTÍCULAS $f_6$ REPRESENTANDO A COLUNA DE 0,0354 m DE DIÂMETRO.....	66
FIGURA 29 - DADOS EXPERIMENTAIS E MODELOS DA LITERATURA, LEITO COMPOSTO POR PARTÍCULAS $f_1$ REPRESENTANDO A COLUNA DE 0,0470 m DE DIÂMETRO.....	67
FIGURA 30 - RELAÇÃO ENTRE A PERDA DE CARGA E VELOCIDADE DA PARTÍCULA $f_8$ PARA O DIÂMETRO DA COLUNA 0,0173 m. ....	70
FIGURA 31 - RELAÇÃO ENTRE A PERDA DE CARGA E VELOCIDADE DA PARTÍCULA $f_9$ PARA O DIÂMETRO DA COLUNA 0,0246 m. ....	70
FIGURA 32 – RELAÇÃO ENTRE A PERDA DE CARGA E VELOCIDADE DA PARTÍCULA $f_9$ PARA O DIÂMETRO DA COLUNA 0,0354 m. ....	71
FIGURA 33 – RELAÇÃO ENTRE A PERDA DE CARGA E VELOCIDADE DA PARTÍCULA $f_8$ PARA O DIÂMETRO DA COLUNA 0,0470 m. ....	71
FIGURA 34 – MODELAGEM DO EFEITO DE PAREDE: PARTÍCULAS A FAIXA $f_3$ , COLUNA DE 0,0173 m, RELAÇÃO DE $D/d_p = 6,1$ .....	73
FIGURA 35 – MODELAGEM DO EFEITO DE PAREDE: PARTÍCULAS A FAIXA $f_7$ , COLUNA DE 0,0173 m, RELAÇÃO DE $D/d_p = 11,1$ .....	73
FIGURA 36- MODELAGEM DO EFEITO DE PAREDE: PARTÍCULAS A FAIXA $f_1$ , COLUNA DE 0,0246 m, RELAÇÃO DE $D/d_p = 5,6$ .....	74
FIGURA 37 – MODELAGEM DO EFEITO DE PAREDE: PARTÍCULAS A FAIXA $f_6$ , COLUNA DE 0,0246 m, RELAÇÃO DE $D/d_p = 13,3$ .....	74
FIGURA 38 – MODELAGEM DO EFEITO DE PAREDE: PARTÍCULAS A FAIXA $f_3$ , COLUNA DE 0,0354 m, RELAÇÃO DE $D/d_p = 12,3$ .....	75
FIGURA 39 – MODELAGEM DO EFEITO DE PAREDE: PARTÍCULAS A FAIXA $f_7$ , COLUNA DE 0,0354 m, RELAÇÃO DE $D/d_p = 22,3$ .....	75
FIGURA 40 - MODELAGEM DO EFEITO DE PAREDE: PARTÍCULAS A FAIXA $f_1$ , COLUNA DE 0,0470 m, RELAÇÃO DE $D/d_p = 10,7$ .....	76

FIGURA 41 - MODELAGEM DO EFEITO DE PAREDE: PARTÍCULAS A FAIXA $f_6$ , COLUNA DE 0,0470 m, RELAÇÃO DE $D/d_p = 25,4$ .....	76
FIGURA 42 - CURVAS DO MODELO DE REICHELT (1972) APLICADO PARA AMOSTRA $f_7$ EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DA COLUNA.....	77
FIGURA 43 - CURVAS DO MODELO DE REICHELT (1972) APLICADO PARA AMOSTRA $f_6$ EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DA COLUNA.....	78
FIGURA 44 - CURVAS DO MODELO DE REICHELT (1972) APLICADO PARA AMOSTRA $f_3$ EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DA COLUNA.....	78
FIGURA 45 - CURVAS DO MODELO DE REICHELT (1972) APLICADO PARA AMOSTRA $f_1$ EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DA COLUNA.....	79
FIGURA 46 - RELAÇÃO ENTRE A PERDA DE CARGA E O NÚMERO DE REYNOLDS PARA O DIÂMETRO DA COLUNA 0,0173 m.....	81
FIGURA 47 - RELAÇÃO ENTRE A PERDA DE CARGA E O NÚMERO DE REYNOLDS PARA O DIÂMETRO DA COLUNA 0,0246 m.....	81
FIGURA 48 - RELAÇÃO ENTRE A PERDA DE CARGA E O NÚMERO DE REYNOLDS PARA O DIÂMETRO DA COLUNA 0,0354 m.....	82
FIGURA 49 - RELAÇÃO ENTRE A PERDA DE CARGA E O NÚMERO DE REYNOLDS PARA O DIÂMETRO DA COLUNA 0,0470 m.....	82
FIGURA 50 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DADOS EXPERIMENTAIS E DA EQUAÇÃO DE ERGUN COM A CONSTANTE AJUSTADA.....	83

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PROPRIEDADES DA PARTÍCULA DO SÓLIDO .....	26
TABELA 2 - PROPRIEDADES DE CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS .....	27
TABELA 3 – SÉRIE DE PENEIRAS AMERICANAS E EQUIVALENTE DA SÉRIE TYLER .....	40
TABELA 4 – POROSIDADES MÉDIAS PARA AS FAIXAS UTILIZADAS PARA CADA COLUNA .....	49
TABELA 5 – POROSIDADES DO LEITO PARA A COLUNA DE 0,0470 m E FAIXAS $f_1, f_5, f_7$ .....	50
TABELA 6 – VALORES OBTIDOS DA VARIÂNCIA E DESVIO PADRÃO (D.P).....	55
TABELA 7 – RELAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS DURANTE O PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	57
TABELA 8 – RELAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS DURANTE O PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA A COLUNA DE 0,0173 m.....	58
TABELA 9 – RELAÇÃO ENTRE DIÂMETRO DA COLUNA PELO DIÂMETRO DA PARTÍCULA.....	64
TABELA 10 –VALORES DAS CONSTANTES A e B PARA O AJUSTE DE MODELOS	65
TABELA 11 - VALORES AJUSTADOS PARA A CONSTANTE A DA EQUAÇÃO DE ERGUN.....	69
TABELA 12 – LIMITES INFERIOR E SUPERIOR RELACIONANDO O NÚMERO DE REYNOLDS PARA OS TESTES REALIZADOS.....	80

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_p$	Volume da partícula ( $m^3$ )
$S_p$	Área da partícula ( $m^2$ )
$\rho_f$	Densidade do fluido ( $kg/m^3$ )
$A$	Área projetada da partícula ( $m^2$ )
$u$	Velocidade da partícula (m/s)
$\emptyset$	Esfericidade da partícula (adimensional)
$N_p$	Número de partículas
$V_s$	Volume de sólidos ( $m^3$ )
$\rho_s$	densidade dos sólidos ( $kg/m^3$ )
$m$	Massa de sólidos (kg)
$d_p$	Diâmetro de partícula (m)
$\varepsilon$	Porosidade do leito (adimensional)
$\Delta P$	Perda de carga (Pa)
$L$	Altura do leito (m)
$\varepsilon_b$	Porosidade média
$\mu$	Viscosidade do Fluido (kg/m.s)
$f_p$	Fator de fricção viscosa (adimensional)
$Re$	Número de Reynolds (adimensional) $Re_p = \rho_f \cdot d_p \cdot u / \mu$
$A$ e $B$	Constantes
$A_w$ e $B_w$	Constantes
$K_1, k_1, k_2$	constantes
$v_b$	Velocidade <i>bulk</i>

$D_c$	Diâmetro da coluna (m)
$M$	Fator de modificação
$r$	Posição radial (m)
$\eta$	Viscosidade dinâmica
$u_0$	Velocidade superficial (m/s)
$a_v$	Área específica dinâmica do leito poroso (m <sup>2</sup> )
$\tau$	Tortuosidade do leito
$Re_e$	Número de Reynolds modificado
$Q$	Vazão
$f_i$	Faixas granulométricas

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivo Geral .....	18
1.2 Objetivo Específico .....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
2.1 Processo PETROSIX.....	19
2.2 Fluidização .....	19
2.2.1 Regimes de Fluidização.....	23
2.2.2 Leito Fixo .....	25
2.3 Estruturas do Leito e da Partícula.....	25
2.3.1 Propriedades e Geometria do Sólido Particulado.....	25
2.3.2 Esfericidade .....	26
2.3.3 Porosidade .....	28
2.3.4 Efeitos da porosidade no leito .....	29
2.4 Perda de carga.....	31
2.5 Efeitos de Parede .....	33
2.6 Ajustes dos modelos matemáticos sem efeito de parede.....	34
2.7 Ajustes dos modelos matemáticos com efeito de parede .....	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1 Descrição das amostras utilizadas .....	39
3.2 Caracterizações do Sistema .....	42
3.3 Porosidade do leito .....	42
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	43
4.1 Equipamento experimental.....	43
4.2 Curva de Calibração .....	44
5. RESULTADOS .....	47
5.1 Método de Estimação dos Parâmetros.....	47
5.2 Porosidade do Leito .....	48
5.3 Testes de Queda de Pressão.....	48
5.4 Comparações da perda de carga para diferentes faixas granulométricas .....	58
5.5 Relações sem efeito de parede e modelos matemáticos .....	63
5.6 Modelagem do Sistema com Efeito de Parede .....	68

5.7 Comportamento do Sistema através da análise da equação de Ergun.....	79
6. CONCLUSÃO.....	84
6.1 Sugestões Futuras .....	84
REFERÊNCIAS .....	86
7. ANEXOS .....	91
7.1 Comparações de perda de carga para todas as faixas e colunas .....	91
7.2 Modelos Aplicados às partículas .....	99
7.3 Tabelas.....	101

## 1. INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento industrial, o qual ocasionou aumento no consumo de energia, houve então, a necessidade de buscar novas alternativas de fontes de energia, visando minimizar custos operacionais e reduzir insumos. Uma alternativa aplicada em indústrias são processos de fluidização<sup>1</sup>, método que promove uma boa mistura e homogeneização do material. É de suma importância o conhecimento das características de fluidização das partículas de xisto, constituídas por sólidos irregulares e uma faixa de distribuição granulométrica.

O xisto, nomenclatura popular de uma rocha chamada de *folhelho*, precisamente, *folhelho betuminoso*. Este elemento rochoso sedimentar originado perante temperaturas e pressões elevadas, e contendo matéria orgânica disseminada em seu meio natural, o querogênio, refere-se a um complexo orgânico de composição indefinida que se decompõe termicamente, produzindo óleo e gás e baixos teores de enxofre. O xisto, fonte energética não renovável, caracterizado por uma baixa capacidade calorífica e cinza de alto teor mineral, é considerado a maior fonte conhecida em potencial de hidrocarbonetos no mundo.

O Brasil possui um dos maiores volumes mundial de xisto. Contém em seu território reservas de 1,9 bilhões de barris de óleo. A Superintendência Industrial de Xisto (PETROSIX) da Petrobrás atua como um centro de desenvolvimento de tecnologia, e processa diariamente cerca de 7.800 toneladas de xisto betuminoso, gerando 3.870 barris de óleo de xisto, 120 toneladas de gás combustível, 45 toneladas de gás liquefeito de xisto e 75 toneladas de enxofre (PETROBRAS, 2010). Atualmente, os custos de produção de um barril de óleo combustível obtido a partir do xisto giram em torno de US\$ 70 à US\$ 100 dólares. O pré-sal, da Petrobras, tem um custo médio de produção de US\$ 100 por cada barril de petróleo (PORTAL JORNAL MONTE CARLOS, 2013).

Em comparação ao petróleo, o qual possui atualmente uma produção nacional de 1,9 milhão de barris/dia, o xisto ocupa uma representação significativa no atual cenário mercantil. O aumento do consumo do petróleo nos últimos 35 anos indica que este se encontra prestes a seu limite, isto é, aproxima-se cada vez mais de sua escassez. Nesse sentido, identifica-se a

---

<sup>1</sup> Método que se baseia na circulação de sólidos juntamente com um fluido.

necessidade de estudar uma substituição natural de insumos, resultando no financiamento do desenvolvimento gradativo de novas fontes de energia, como o xisto.

Recentemente, considerando novos estudos com o aumento da produção do *Shale Gas* (gás natural produzido a partir do xisto), nos próximos anos o mercado de energia poderá sofrer alterações mundiais, tornando o xisto uma das principais fontes de energia não renovável. Estimativas colocam o Brasil, num futuro próximo, como o maior produtor desse insumo, seguido dos Estados Unidos (INOG, 2012).

Visando melhorias, tanto para as questões ambientais, quanto para questões econômicas, o propósito do presente estudo tomou como base análises de partículas finas e irregulares, através de amostras fornecidas pela PETROSIX, com faixas variando entre  $0,256 \times 10^{-3}$  m e  $4,38 \times 10^{-3}$  m, a fim de estudar a hidrodinâmica do leito fixo de partículas de xisto, em especial os aspectos da porosidade, perda de carga e velocidade de mínima fluidização. A partir dos experimentos, fazer um levantamento de curvas da perda de carga para várias faixas granulométricas e avaliar o efeito de parede na hidrodinâmica do processo para aplicar os modelos propostos, com a finalidade de obter uma melhoria na dissipação de energia da perda de carga das partículas e também um melhor aproveitamento das mesmas.

## **1.1 Objetivo Geral**

O objetivo do trabalho é adequar um modelo matemático que seja adaptado para partículas irregulares, estudando a perda de carga, mínima fluidização, efeito de parede e porosidade, utilizando como materiais partículas menores que oito milímetros de xisto betuminoso, considerado como rejeito, para diferentes faixas granulométricas através da passagem de ar em diferentes colunas.

## **1.2 Objetivo Específico**

O objetivo do específico do projeto é medir a perda de carga até atingir a velocidade de mínima fluidização das partículas, utilizando diferentes faixas granulométricas, assim

como determinar a influência do efeito parede na perda de carga através do leito em diferentes colunas e tamanhos de amostras, comparando com situações similares.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Processo PETROSIX**

Atualmente, a maior parte de xisto que ocorre no Brasil, segundo dados fornecidos pela PETROBRAS (2010), pertence à Formação de Irati<sup>2</sup>, que abrange os estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Mato Grosso do Sul e Goiás. A jazida de xisto de São Mateus do Sul, situada na Bacia do Paraná, é explorada pela Petrobras. As ocorrências de xisto no Brasil são as que apresentam as condições mais favoráveis para o aproveitamento econômico dos seus recursos em óleo, daí então, a intensificação dos trabalhos de pesquisa da PETROBRAS, principalmente na jazida de São Mateus do Sul, no estado do Paraná.

A Unidade de Tratamento de Minério (U-220) do Módulo Industrial do Xisto tem por objetivo granular o minério oriundo do processo de britagem, ou seja, o xisto é fragmentado e dividido em suas faixas granulométricas após passar por um peneiramento, separando-se em faixas entre 85 mm e 11 mm, para iniciar o processo de retortagem para a extração do óleo contido no xisto. O processo de britagem é dividido em três estágios: o primeiro estágio é realizado em britador giratório e os outros dois estágios em britadores de cone. O grânulo obtido como produto final é empilhado em duas pilhas de homogeneização e estocagem, onde são divididas as atividades entre pilhas de estocagem e alimentação das retortas. A capacidade do tratamento do minério é de 1046 t/h, na qual 880 t/h forma o produto granulado, o restante, 166 t/h, constitui a fração fina rejeitada. Para obtenção das frações menores que 11 mm, o xisto é recuperado das pilhas e peneirado.

---

<sup>2</sup> A Formação Irati constitui parte integrante da coluna de sedimentos paleozóicos de idade Permiana da Bacia do Paraná.

O fluxograma simplificado da rocha é representado na Figura 1, que exemplifica o processo, onde se pode notar o xisto desde a saída da mina até a obtenção do rejeito.

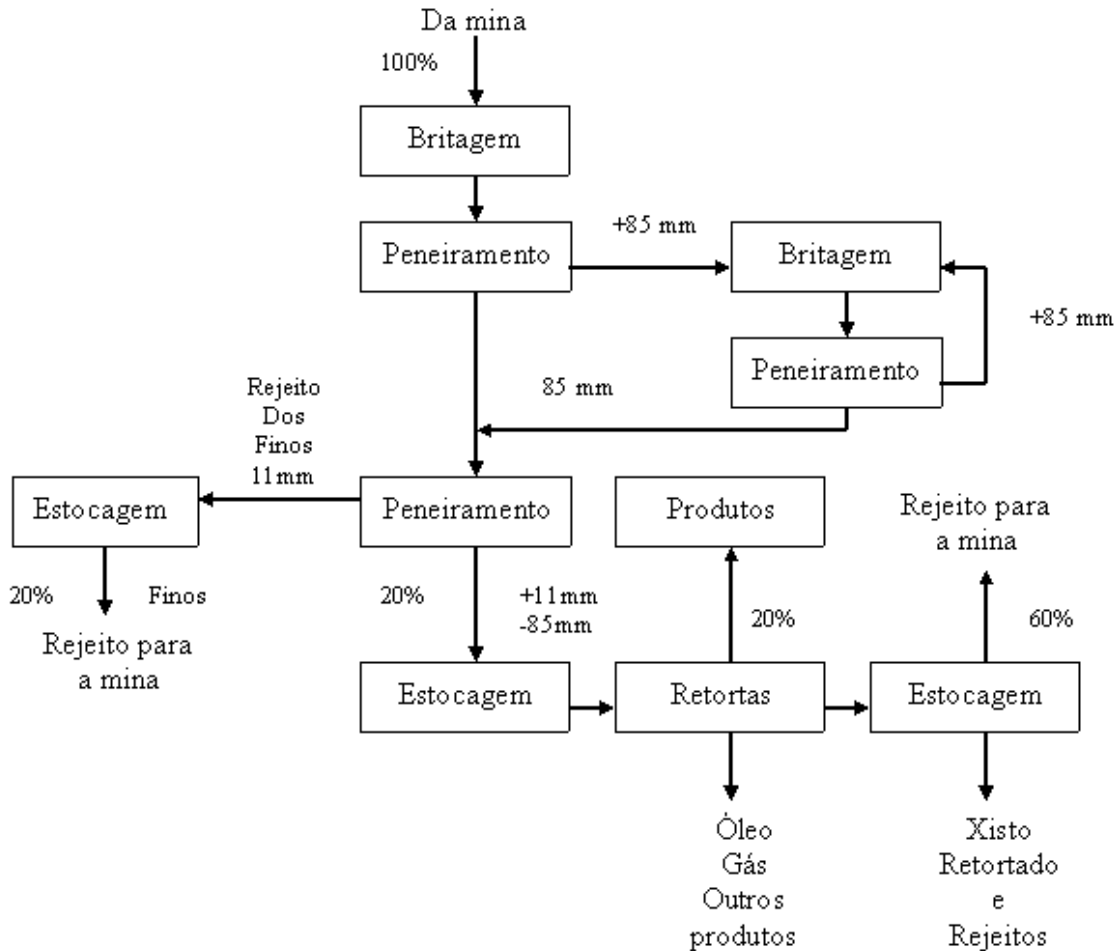


Figura 1: Fluxograma Simplificado de Sólidos. (Tratamento de Minério)

Fonte: Universidade Federal de Santa Maria.

A unidade da PETROBRAS - PETROSIX, localizada em São Mateus do Sul, é uma das responsáveis pelo processamento e aproveitamento do xisto. O processamento do minério se inicia aquecendo a rocha em torno de 500 °C, em ambiente isento de oxigênio, produzindo óleo e gás. Para aquecer o material sólido é utilizado na parte superior à retorta que, além de ser a principal operação do processo, apresenta a função de trocador de contato direto com o gás/sólido, até atingir a temperatura de pirólise, conforme é apresentado na Figura 2. Assim, são formados os seguintes produtos obtidos da retortagem:

- Gás combustível para consumo local e gás liquefeito para consumo doméstico ou industrial;

- Nafta, utilizado como combustível industrial.

- Óleo, utilizado como combustível industrial.

- Enxofre.

Como subprodutos da retortagem se enquadram:

- Cinzas de xisto, insumo industrial para produção de cimento.

- Torta oleosa, combustível sólido alternativo, para lenha e carvão mineral.

- Finos de xisto, insumo energético com aproveitamento por combustão.

- Xisto retortado, insumo industrial para produção de cerâmica vermelha.

- Cal xisto, corretivo de acidez para solos agricultáveis.

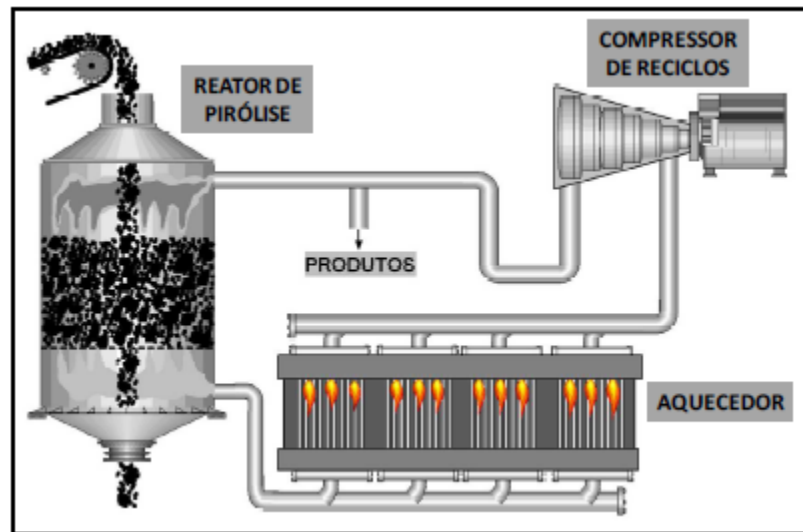


Figura 2 – Procedimento do processo PETROSIX®

Fonte: Motta (2009).

Depois de minerado a céu aberto, o xisto vai para um britador, que reduz as pedras até a faixa granulométrica adequada ao processo. Essas pedras são então levadas a uma retorta, onde são pirolisadas (tratadas termicamente), fazendo com que a matéria orgânica nelas

contida seja liberada sob forma de óleo e gás, como mostra o processo de retortagem esquematizado na Figura 3. Os gases do processo são resfriados e separados em frações pesadas e leves.

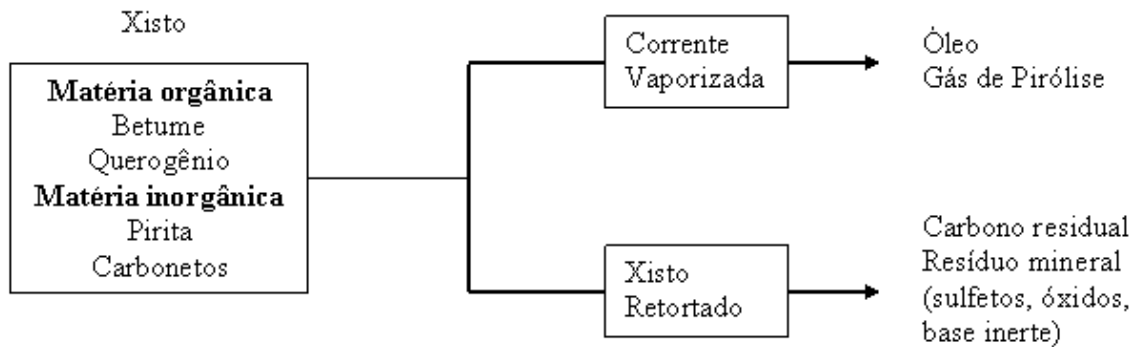


Figura 3 – Fluxograma esquematizado do processo de retortagem de xisto.

Fonte: Tonel e Taffarel (2004).

Embora obtenham os produtos de retortagem do xisto como produto final, estes ainda não estão prontos para o uso e necessitam de tratamentos a fim de adequá-los ao uso direto, ou de matéria-prima para outras aplicações.

As informações pesquisadas e exploradas neste contexto têm como objetivo reduzir os custos operacionais, sugerindo um maior aproveitamento do xisto, quantificando a perda de carga e comparando com a modelagem teórica. As informações exploradas neste trabalho podem ser aplicadas para a geração de eletricidade via caldeiras de leito fluidizado.

## 2.2 Fluidização

O regime de fluidização se baseia, fundamentalmente, na circulação do fluido (gás ou líquido) passando entre os sólidos, impedindo a existência de gradientes de temperatura, de

pontos muito ativos ou de regiões estagnadas no leito, proporcionando também um maior contato superficial entre sólido e fluido, o qual favorece as transferências de massa e calor. Pode-se destacar como características do leito fluidizado o comportamento da mistura fluido-partícula como se fosse um fluido simples e a alta velocidade de mistura de sólidos.

A fluidização promovida por um fluido ascendente, sendo gás ou líquido, favorece o contato entre o sólido e o fluido (HOWARD, 1989). De acordo com Huang (2010), a fluidização ocorre quando as partículas são suspensas pelo escoamento de gás. O gás e o sólido entram em contato promovendo características únicas de contato gás-sólido, ou seja, a mistura de sólidos transmite uma alta taxa de transferência de calor, facilitando o sentido do sólido. Em um leito fluidizado, é alto o custo de energia do processo de fluidização, onde o fluido (gás) ao ser comprimido exerce a função de manter o sólido fluidizado. Seria vantajoso ter um processo que incorporasse a vantagem de fluidização com menos gás e um consumo reduzido de energia.

A fluidização pode ser empregada em processos de secagem, misturas, pirólise, entre outros, trazendo como vantagem o comportamento dos sólidos similar ao de líquidos, pois permite operações contínuas controladas automaticamente, elevadas coeficientes de transferência de calor e de massa e também um fácil escoamento em dutos.

### **2.2.1 Regimes de Fluidização**

De acordo com as características de sentido e do fluido empregado, podem ocorrer diferentes maneiras do regime de fluidização durante o processo. Dentre elas, tem-se:

- Incipiente: o regime acontece na velocidade de mínima fluidização, ou seja, quando a força de arraste entre fluido-partícula equilibra-se com a força peso sobre as partículas.
- Homogêneo: ocorre em sistemas cujo fluido é líquido. Poucas instabilidades e a porosidade é razoavelmente homogênea no líquido.
- Borbulhante: neste caso, conforme se aumenta a vazão do fluido, canais preferenciais e bolhas surgem, fazendo que com a movimentação dos sólidos fique mais dinâmica. O leito não se expande muito.

- Pistonada: conforme aumenta a vazão do fluido, as bolhas se unem e crescem, podendo atingir até o diâmetro da coluna.
- Turbulento: em altas vazões do fluido, a superfície do leito torna-se indistinta, e, ao invés de bolhas, observa-se um escoamento violento e agitado, com bolhas e aglomerados de vários tamanhos movendo-se rapidamente.
- Transporte: quando a vazão do ar ultrapassa a velocidade terminal das partículas, fazendo com que sejam arrastadas pela corrente do fluido, desprendendo-se da coluna.

Assim como as teorias dos regimes do leito de fluidização, Rabinovich e Kalman (2011) propuseram modelos de fluidização nos estudos por eles realizados. A figura 4 apresenta o regime projetado ao qual nele incluíram: fluidização, fluxo lento, fluxo borbulhante, fluxo de leito fluidizado e de “*plug flow*”. O sistema permite prever a fase gás - sólido para todas as condições do sistema e as propriedades das partículas.

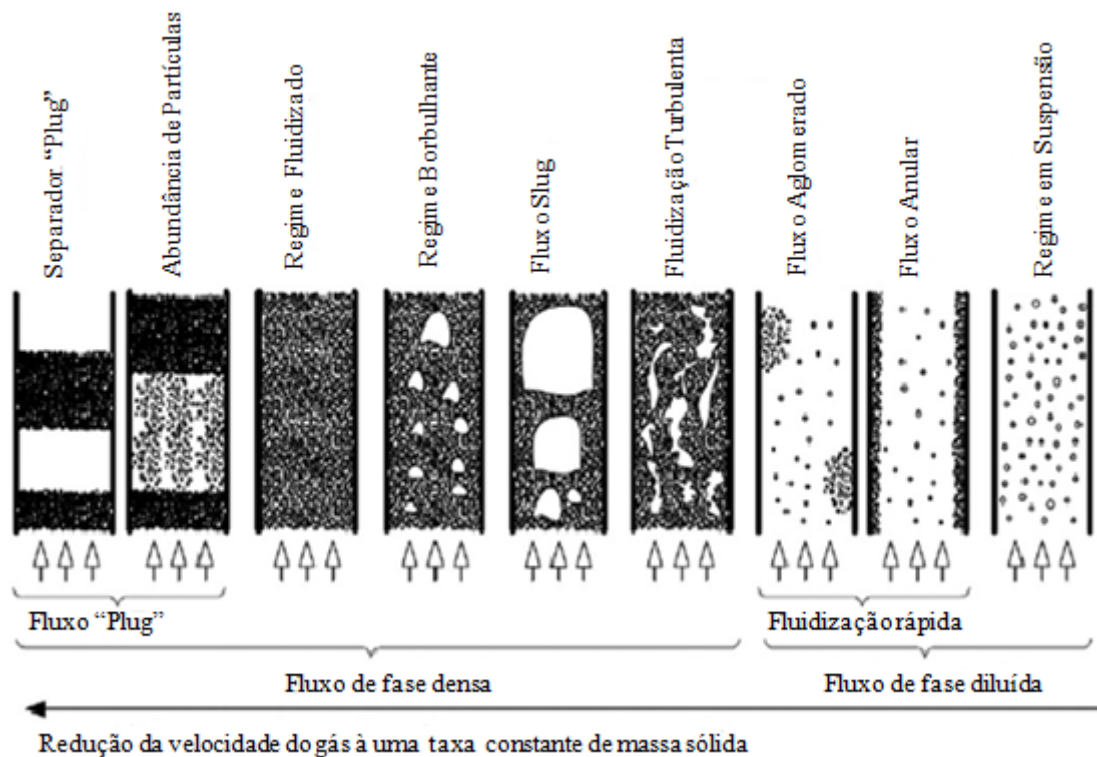


Figura 4 – Fluxograma esquematizado dos regimes de fluxo e leitos fluidizados.

Fonte: Rabinovich e Kalman (2011) adaptado.

## **2.2.2 Leito Fixo**

Nos processos de fluidização, o regime inicial que ocorre é o de leito fixo. No começo desse processo, quando a velocidade é muito baixa, o fluido percorre o espaço entre as partículas, não havendo expansão do leito. (PORTO, 2005). Maldonado et al, (2008), comenta que, para iniciar a caracterização hidrodinâmica do reator de leito fixo é necessário conhecer os regimes de escoamento de gás.

Em reatores de leito fixo, o fluido passa ascendentemente através de partículas sólidas. Os primeiros estudos de leito fixo utilizando como fluido o gás dentro de um leito fixo foi realizado por Kaveckii e Planovskij (1962). Várias vantagens de colunas de leito fixo foram relatadas: baixa queda de pressão, alta taxa de transferência de calor e de transferência de massa. (Nikačević, 2009).

Segundo Montillet e Coq (2001), para obter melhores resultados em uma modelagem de fluxo de reator é necessário realizar uma minuciosa caracterização da estrutura de leitos fixos e, para tal, os dados necessários são os perfis porosidade, geralmente radiais e longitudinais, a média de tamanho de partícula e a média dimensão dos poros. É importante considerar também a caracterização da geometria dos espaços vazios ou os chamados poros de modo a quantificar as variações axiais da porosidade e conseqüentemente os efeitos de extremidade do leito sendo que as espessuras são comumente expressas em termos de número de diâmetro da partícula. Analogamente, podemos obter informações qualitativas da variação da velocidade na secção transversal quando analisamos o perfil de porosidade radial destacando a natureza dos efeitos de parede, em particular, no caso de leitos estreitos.

## **2.3 Estruturas do leito e da Partícula**

### **2.3.1 Propriedades e Geometria do Sólido Particulado**

O sólido particulado é o material composto por sólidos de variados tamanhos, entre eles, tamanhos reduzidos. O tamanho das partículas pode ser devido à fragmentação causada pelo processo, ou da própria natureza do material.

Os estudos dos sistemas particulados são de fundamental importância para o projeto e operação de processos industriais (GELDART, 1990). Entre as principais propriedades das partículas, algumas são listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades da partícula do sólido

<b>PROPRIEDADES</b>	
<b>PARTÍCULA</b>	<b>SISTEMA PARTICULADO</b>
Tamanho	Distribuição granulométrica. Diâmetro médio
Forma	Distribuição – função do tamanho da partícula. Média
Densidade	Distribuição – função do tamanho da partícula. Média
Área superficial da partícula	Área superficial total
Porosidade	Permeabilidade

Fonte: Geldart, 1990.

Segundo Allen (1990), ao definir os parâmetros de partículas irregulares, o tamanho da partícula depende do método escolhido para realizar tal medida. Dentre eles, estão: área projetada, área superficial, diâmetro, entre outros. Na Tabela 2, são apresentados alguns diâmetros utilizados nos processos de caracterização de partículas.

### 2.3.2 Esfericidade

A esfericidade é definida como o grau em que a forma de uma partícula se aproxima da forma esférica. Ela mede o afastamento do formato esférico e é definida como a razão

entre a área superficial da esfera com o mesmo volume da partícula e a área superficial da partícula. Para partículas esféricas, a esfericidade é dada como ( $\phi = 1$ ) e, para qualquer outra forma de partículas, a esfericidade é menor que um ( $\phi < 1$ ), com variação entre zero e um ( $0 < \phi < 1$ ).

Tabela 2 – Propriedades de caracterização das partículas

<b>Símbolo</b>	<b>Nome</b>	<b>Definições</b>	<b>Equação</b>
$d_v$	Diâmetro volumétrico	Diâmetro de uma esfera que tem o mesmo volume da partícula	$V_p = \frac{\pi}{6} d_v^3$
$d_s$	Diâmetro superficial	Diâmetro de uma esfera que tem a mesma área superficial da partícula	$S_p = \pi d_s^2$
$d_{sv}$	Diâmetro volumétrico superficial	Diâmetro de uma esfera que tem a mesma relação área superficial por volume que a partícula	$d_{sv} = \frac{d_v^3}{d_s^2} = \frac{6V_p}{S_p}$
$d_d$	Diâmetro de arraste	Diâmetro de uma esfera que tem a mesma força de arraste que a partícula, no mesmo fluido e na mesma velocidade relativa	$F_D = C_D \rho_f \frac{v^2}{2} A$
$d_f$	Diâmetro de queda livre	Diâmetro de uma esfera que tem a mesma densidade e velocidade terminal que a partícula, no mesmo fluido	
$d_{St}$	Diâmetro de Stokes	Diâmetro de queda da partícula na região de fluxo laminar ( $Re < 0,2$ )	$d_{St}^2 = \frac{d_v^3}{d_d}$
$d_a$	Diâmetro da área projetada	Diâmetro de um círculo que tem a mesma área projetada da partícula em uma posição estável	$A = \frac{\pi}{4} d_a^2$
$d_p$	Diâmetro da área projetada	Diâmetro de um círculo que tem a mesma área projetada da partícula em uma posição randômica	Valor médio para todas as posições
$d_c$	Diâmetro perimétrico	Diâmetro de um círculo que tem o mesmo perímetro que o projetado da partícula	
$d_A$	Diâmetro de peneiramento	Largura da mínima abertura através da qual a partícula pode passar	

$d_F$	Diâmetro Ferret	Distância média entre pares de retas paralelas tangentes ao contorno projetado da partícula
$d_M$	Diâmetro de Martin	A média do comprimento das cordas do contorno projetado da partícula
$d_R$	Diâmetro <i>unrolled</i>	A média do comprimento das cordas que passam pelo centro de gravidade da partícula

Fonte: Allen (1990).

### 2.3.3 Porosidade

A fração de vazios ou porosidade média é definida como a razão entre o volume vazio em relação ao volume total do leito. Por conseguinte, é uma propriedade estrutural global do leito, sendo utilizado para caracterizar o espaço total disponível para o fluxo. A porosidade tem como símbolo  $\varepsilon$  e é adimensional. O cálculo é feito da seguinte forma:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\text{Volume de sólidos}}{\text{Volume total leito}} \quad (2.1)$$

Para leitos aleatórios de partículas uniformes, sua porosidade depende da esfericidade das partículas e pode ser relacionada matematicamente. Quando o leito é composto de uma distribuição de partículas com diferentes formas, a esfericidade pode ser calculada por meio da média aritmética das várias esfericidades (YANG, 2003).

Segundo Di Felice et al. (2004) a não homogeneidade do leito e o uso de propriedades efetivas, e o modelo de Ergun<sup>3</sup>, implicam que, para um dado sistema físico (que especifica a densidade, a viscosidade do fluido e o diâmetro da partícula), a queda de pressão depende unicamente de duas variáveis: a porosidade e a velocidade do fluxo de fluido, que na prática, podem ser obtidas a partir dos parâmetros experimentais, conforme apresentado nas equações 2.2 e 2.3.

<sup>3</sup> Equação que descreve a queda de pressão de um fluido deslocando em um leito poroso fixo.

$$\varepsilon = 1 - \frac{M_s}{\rho_s \cdot A \cdot L} \quad (2.2)$$

$$U = \frac{Q}{A} \quad (2.3)$$

Em que:

$\varepsilon$  = porosidade

$M_s$  = fator de modificação

$\rho_s$  = densidade do sólido

L = altura

U = velocidade

A = área

Q = vazão

A queda de pressão estimada usando os valores médios de porosidade e a velocidade pode ser chamada de queda de pressão efetiva, pois a suposição implícita nesta aproximação é de um leito homogêneo efetivo. Na presença de um leito não homogêneo, por outro lado, a queda de pressão efetiva pode representar uma estimativa significativa sobre a queda de pressão. Segundo Brown et al. (1950), a porosidade do leito fixo está relacionada à esfericidade da partícula ( $\phi$ ).

### 2.3.4 Efeitos da porosidade no leito

A porosidade de um leito de enchimento é um parâmetro chave na determinação da tensão e comportamento do fluxo de sólidos granulares em armazenamento a granel, manuseio e transporte. Durante o fluxo de leito fixo, os campos de velocidade das partículas,

a partir do fluido intersticial, são conhecidos para dimensionar pela distribuição intersticial do espaço anular no interior do leito de partículas, segundo TÜZÜN et al. (2005).

A análise quantitativa da variação do efeito de parede, em termos de porosidade, é essencial para a avaliação do fluxo em relação ao fluido (Cohen; Metzner, 1981) e/ou a transferência de calor e massa (Wakao; Kaguei; 1982) em leitos. Isto é particularmente verdadeiro para pequenos reatores amplamente utilizados em muitos processos recentemente desenvolvidos (Dixon, 1988). É estabelecido, então, que a porosidade total diminua com a relação de diâmetro, e, com isso, diferentes equações foram empiricamente formuladas para quantificar esta relação (Carman, 1937; McGeary, 1961; Ayer; Soppet 1965; Dixon, 1988).

As alterações locais na porosidade podem levar a grandes variações de perfil de velocidade e, portanto, uma previsão não uniforme para a perda de carga ao longo do leito de enchimento (Freund, 2003).

DeKlerk (2003) fornece dados de altura média de distribuições radiais de porosidade para diâmetros de partículas em diferentes colunas e, com base em suas observações, representa a equação 2.4 para ajustar os seus dados:

$$\varepsilon(r) = \varepsilon_b + 0,29 \exp\left(-0,6 \frac{R-r}{d}\right) [\cos(2,3)] \quad (2.4)$$

Em que:

$\varepsilon_r$  = porosidade na camada

$\varepsilon_b$  = porosidade média

R= raio do tubo na posição radial r a partir do centro

d = diâmetro da partícula

Modelo proposto por Jeschar (1964) também procurou correlacionar a porosidade média:

$$\varepsilon_b = 0,375 + \frac{0,34}{\lambda} \quad (2.5)$$

Em que  $\lambda$  é expresso como sendo a relação adimensional entre o diâmetro do tubo e o diâmetro da partícula.

## 2.4 Perda de carga

A queda de pressão através de leitos fixos é o resultado de perdas por atrito e inércia caracterizadas pela dependência linear da velocidade do fluxo e da dependência quadrática da velocidade do fluxo, respectivamente, como pode ser visto a partir da equação de Ergun (Çarpınlioğlu *et al*, 1998).

Com o passar do tempo, os modelos foram se aperfeiçoando e, desde Ergun (1952), eles sofrem adaptações até os dias de hoje. Assim, para regimes de escoamentos não linear a queda de pressão para o fluxo através de um leito fixo pode ser avaliada utilizando a equação de Ergun:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu \cdot v}{(d_p)^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_f \cdot v^2}{d_p} \quad (2.6)$$

Em que:

$\Delta P$  = Perda de carga

L = Altura do leito

$\varepsilon$  = Porosidade do leito

$\rho_f$  = Densidade do fluido

$d_p$  = Diâmetro da partícula

$\mu$  = Viscosidade do fluido

v = Velocidade do fluido

Di Felice e Gibilaro (2004), estudos na área revelaram que o tipo de regime de escoamento (laminar ou turbulento) determina o comportamento da perda de carga real ( $\Delta P$ ) frente à perda de carga “homogênea” ( $\Delta P_h$ ): para baixos números de Reynolds um progressivo decréscimo na razão  $D/d_p$  conduz a um progressivo aumento na constante de regime viscoso da equação de Ergun (1952) e, por esta razão, têm-se um aumento no  $\Delta P$  observado em relação ao estimado quando se considera as condições homogêneas do leito,  $\Delta P_h$ . Já para altos números de Reynolds, verifica-se o inverso, um progressivo decréscimo na razão  $D/d_p$ , o que conduz a um progressivo decréscimo no  $\Delta P$  em relação ao  $\Delta P_h$ .

A análise da influência dos elementos que atuam na perda de carga é dependente de vários fatores, dentre eles:

- Velocidade do fluido
- Diâmetro da partícula
- Viscosidade
- Comprimento do leito
- Esfericidade da partícula

Dentre as propriedades do fluido, a viscosidade é a mais importante na dissipação de energia. Além de ser proporcional à perda de carga, sua relação com as forças de inércia do escoamento proporciona o número de Reynolds (adimensional, equação 2.7), parâmetro que indica o regime de escoamento.

$$R_e = \frac{\bar{\rho} \cdot \bar{v} \cdot D}{\mu} \quad (2.7)$$

Em que:

Re: Número de Reynolds

$\rho$ : Massa específica do fluido

$\bar{v}$ : Velocidade média do fluido

D: Diâmetro da tubulação

$\mu$ : Viscosidade dinâmica do fluido

Observa-se ser fundamental o número de Reynolds, que, além de ser a base do comportamento de sistemas reais, é possível se avaliar a estabilidade do fluxo, podendo-se obter uma indicação se o escoamento flui de forma laminar ou turbulenta. Para  $Re \leq 2.100$ , considera escoamento laminar, variando de  $2.100 < Re < 3.500$ , escoamento de transição ou intermediário e para valores acima  $Re \geq 3.500$ , escoamento turbulento.

## 2.5 Efeitos de Parede

O efeito de parede exerce um decréscimo em relação à partícula associada ao fluido. Ele é causado por um fluxo ascendente do fluido (no caso o gás), e quanto menor a distância entre a parede e a partícula, maior o efeito. No caso das aplicações, é necessário um procedimento experimental para a compreensão e interpretação dos resultados. O efeito de parede depende do tamanho das partículas e do formato da parede. (CHHABRA, 2003).

Para colunas de diâmetros menores, o efeito de parede terá grande influência na porosidade do leito. De acordo com Winterberg *et al.* (2000), vários modelos matemáticos que descrevem o efeito parede podem ser encontrados na literatura, e eles geralmente parecem estar em boa concordância com dados experimentais.

Há uma região da parede anelar, na qual a porosidade média é maior do que no centro do leito, uma vez que a distribuição espacial das partículas tem de se adaptar à forma da parede. A influência da parede no fluxo através de canalização torna-se mais significativa à medida que  $D/d_p$  decresce (Fand e Thinakaran, 1990). Entretanto, observa-se que o atrito viscoso na parede, que acarreta o aumento da queda de pressão, pode não ser insignificante em comparação com que é causado pelas partículas, devido ao fato de que a superfície de

atrito da parede aumenta em relação à superfície total do leito conforme a relação  $D/d_p$  diminuem.

## 2.6 Ajustes dos modelos matemáticos sem efeito de parede

A descrição correta da queda de pressão em leitos fixos é de extrema importância para a concepção de colunas e reatores de leito fixo, uma vez que determina as exigências de energia das bombas de fornecimento e compressores. Além disso, os modelos para o campo de fluxo complexo em leitos fixos dependem da precisão da correlação da queda de pressão utilizada (EISFELD, 2001).

Para Ergun, a porosidade é obtida a partir de um leito infinito, justamente para que as heterogeneidades da região da parede sejam consideradas insignificantes. Essas correlações sugerem que um vínculo eficaz entre o diâmetro da coluna e o diâmetro de partícula,  $D/d_p$ , controla a estrutura de empacotamento no interior do leito. As alterações locais na porosidade podem ocasionar grandes variações de perfil de velocidade com uma previsão não uniforme da perda de carga ao longo do leito de enchimento (THEUERKAUF *et al.*, 2006).

Os coeficientes da equação de Ergun foram determinados a partir de experiências de um leito infinito de esferas (ou seja, uma grande relação de diâmetros de partículas associado ao leito) na distribuição aleatória (SODRÉ, 1998). O primeiro termo da equação 2.7 está relacionado à perda por energia viscosa, enquanto o segundo termo refere-se à perda de energia cinética (LEVA, 1959). Nota-se que as constantes 150 e 1,75 não são adequadas em algumas situações, entre elas, enchimentos constituídos por partículas não esféricas. Assim, MacDonald *et al.* (1979) propõem constantes com base em dados experimentais adquiridos para cada leito de enchimento por meio da expressão mostrada na equação 2.8:

$$\frac{\Delta P}{L} = 180 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu.v}{(d_p.\phi)^2} + 4.0 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho.v^2}{d_p.\phi} \quad (2.8)$$

Tomando como base a equação de Ergun (1952), os autores com o passar do tempo propuseram valores no lugar das constantes que melhor adaptasse os modelos. Em especial a constante A considera o valor de 180, e os valores da constante de B são avaliados de acordo com a estrutura da partícula. Para partículas lisas considera a constante B de valor 1.8, e para partículas rugosas utiliza-se a constante de valor 4,0. Com isso, com medidas experimentais, as constantes A e B podem originar valores distintos conforme o meio poroso, sendo as mais significativas para as partículas de formato irregular. Assim, o efeito de parede se tornar insignificante para colunas com diâmetros de partículas superiores a 50 (BASU, 2001).

## **2.7 Ajustes dos modelos matemáticos com efeito de parede**

O efeito de parede adjacente com fluxo canalizado, diz-se ser importante quando a razão de diâmetros,  $D/d_p$ , for menor que 50, tornando-se mais pronunciado em valores inferiores a 12. A presença do efeito de parede faz com que um leito de partículas de maior porosidade aumente significativamente o fluxo de fluidos na abertura da zona da parede (FOUMENY et al. 1993).

Pouco se sabe sobre o efeito da forma da partícula e o efeito de parede em colunas utilizando partículas irregulares. Para estender a aplicação da equação de Ergun para leitos finitos, com efeitos de parede, foram propostas várias correções, entre elas, CHENG (2011). Cheng comenta que o efeito de parede sobre a queda de pressão em leitos fixos pode ser considerado, modificando a equação Ergun baseada no conceito de raio hidráulico. As fórmulas adaptadas fornecem uma boa descrição de variações das medidas nas duas constantes envolvidas na equação Ergun modificadas de raios do diâmetro de partículas no leito.

Foram analisadas abordagens apresentadas na literatura para a correção do efeito de parede, entre elas, a proposta por Cheng (2011), partindo de uma adaptação da equação de Ergun, como está apresentado na equação 2.9:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{A_w \cdot M^2 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot v}{\varepsilon^3 \cdot d \cdot \text{Re}_e} + \frac{B_w \cdot M \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot v^2}{\varepsilon^3 \cdot d} \quad (2.9)$$

Cheng (2011) propôs uma correção para os valores das constantes A e B, e tomou como base para a análise dos parâmetros da equação acima. Assim os valores de  $A_w$  e  $B_w$  foram definidos por:

$$A_w = \left[ 185 + 17 \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \left( \frac{D}{D - d} \right)^2 \right] \frac{1}{M^2} \quad (2.10)$$

$$B_w = \left[ 1,3 \left( \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^{1/3} + 0,03 \left( \frac{D}{D - d} \right)^2 \right] \frac{1}{M} \quad (2.11)$$

Em que M é um fator de modificação dado por:

$$M = 1 + \frac{2}{3} \frac{1}{(1 - \varepsilon)} \frac{d_p}{D} \quad (2.12)$$

Sendo o número de Reynolds modificado por:

$$\text{Re}_e = \frac{\varepsilon \cdot d_p}{(1 - \varepsilon)} \frac{v}{\mu} \quad (2.13)$$

Reichert (1972) também corrigiu o efeito de parede. Este autor propôs o modelo apresentado na equação 2.9, citado por Cheng (2011), para prever o comportamento de leitos fixos com constantes ajustadas, obtendo um desempenho melhor do que outras correlações para outras quedas de pressões com  $D/d_p$  variando entre 1,73 – 91, como mostram a equação 2.14 e 2.15.

$$A_w = 150 \quad (2.14)$$

$$B_w = \left[ \frac{1,5}{(D/d_p)^2} + 0,88 \right]^{-2} \quad (2.15)$$

Eisfeld e Schnitzlein (2001) também apresentam correlações, expressado na equações 2.16 e 2.17, para quedas de pressões com  $D/d_p$  variando entre 1,62 – 250.

$$A_w = 154 \quad (2.16)$$

$$B_w = \left[ \frac{1,15}{(D/d_p)^2} + 0,87 \right]^{-2} \quad (2.17)$$

Todavia, Mehta e Hawley (1969) mostraram que as constantes  $A_w = 150$  e  $B_w = 1,75$  se adaptam bem aos dados experimentais para a relação  $D/d_p$  variando entre 7,7 - 91.

Foumeny *et al.* (1993) correlacionam as avaliações existentes na literatura, sendo obtida uma nova equação reformulando suas correlações originais para números muito grandes ou pequenos de Reynolds, em termos fator de atrito e número de Reynolds.

$$A_w = \frac{A}{M^2} \quad (2.18)$$

$$B_w = \frac{D/d}{2,28 + (1/B)(D/d)} \frac{1}{M} \quad (2.19)$$

Entretanto, Di Felice *et al.* (2004) verificaram que a velocidade do fluido e a distribuição da porosidade do leito não são constantes em toda sua superfície, apresentando um comportamento diferenciado nas paredes do leito, local onde as partículas tendem a se organizar de forma diferenciada. Mesmo assim, o impacto dessa região é mínimo quando levamos em conta os casos mais comuns, deste modo, é coerente menosprezá-lo. Pelos resultados dos autores, a relação entre o diâmetro do leito e o diâmetro da partícula era de aproximadamente cinco, inferindo que valores abaixo dessas condições implicam em desvios

significativos do modelo do leito homogêneo. Aplicar a lei de Ergun para a região do *bulk* do leito é uma solução eficaz para o problema, pois esconde as incertezas referentes à fluidodinâmica da região próxima a parede. Com isso, propuseram a seguinte correlação para o cálculo da velocidade na região *bulk*, apresentada na equação 2.20.

$$u_b = \frac{u}{2,06 - 1,06 \left( \frac{\left( \frac{D_c}{d_p} - 1 \right)}{\left( \frac{D_c}{d_p} \right)} \right)} \quad (2.20)$$

A velocidade *bulk* ( $u_b$ ), juntamente com a porosidade na região *bulk*, permite que a perda de carga possa ser obtida como uma função da relação entre os diâmetros do leito e das partículas, a partir da equação de Ergun.

Outros autores, como Montillet *et al.* (2007), estudaram a perda de carga em leito de esferas, considerando o regime laminar e turbulento, concluindo que, para um intervalo ou valores muito grande do número de Reynolds, a perda de carga não pode ser representada como:

$$\frac{|\Delta P|}{L} = AU_0 + BU_0^2 \quad (2.21)$$

A partir da equação (2.22), autores como Rose e Rizk *et al.* (1949), propuseram a equação:

$$f_p = 1000R_e^{-1} + 125R_e^{0,5} + 14 \quad (2.22)$$

Sendo o fator de fricção da partícula ( $f_p$ ) definido:

$$f_p = \frac{|\Delta P|.d_p}{L.p_f.v^2} \quad (2.23)$$

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição das amostras utilizadas

As amostras de xisto foram coletadas pela empresa PETROSIX situada na bacia do Paraná e pertence à formação Irati, localizada na cidade de São Mateus do Sul. Após serem coletadas, as amostras de xisto foram encaminhadas a britadores, nos quais tiveram uma redução de tamanho. Após o peneiramento inicial, elas foram transportadas de São Mateus do Sul para a UFPR, onde foram feitos os experimentos no Laboratório de Engenharia Química, LABENGE, Universidade Federal do Paraná.

Para ajustar as faixas granulométricas, as partículas passaram por um sistema de peneiras vibratórias, para o procedimento de separação dos tamanhos das faixas a serem trabalhadas. Para obter quantidade suficiente de amostras de todas as faixas, foi realizado o procedimento de moagem no equipamento moinho de bolas, por um período médio de duas horas, com aproximadamente três quilos de amostras por batelada, até reduzir ao tamanho a ser trabalhado.

No decorrer do trabalho, as faixas  $f_4$  e  $f_8$  foram subdivididas nas faixas  $f_3$ ,  $f_5$ ,  $f_6$  e  $f_7$ , de forma a se trabalhar com faixas mais estreitas de diâmetros, que melhor caracterizam a influência do diâmetro médio das partículas na hidrodinâmica do sistema. As faixas  $f_4$  e  $f_8$  foram mantidas nos resultados, devido à possibilidade de analisar a influência de uma faixa mais ampla de distribuição nos resultados.

Quanto à distribuição granulométrica, as amostras foram divididas em doze faixas, diferenciadas pelas peneiras do tipo Tyler<sup>4</sup>. As faixas foram classificadas com variação dos diâmetros médios de  $0,256 \times 10^{-3} \text{ m}$  e  $4,38 \times 10^{-3} \text{ m}$ , conforme apresenta a Tabela 3. Foram excluídas as partículas menores que  $f_{12}$ . As Figuras 5 e 6 apresentam as imagens das faixas utilizadas, denominadas  $f_1$  (maiores partículas) a  $f_{12}$  (menores partículas).

Tabela 3 - Série de peneiras americanas e equivalentes da série Tyler (A.S.T.M. – E – 11 – 61)

Faixas	Tyler ( Mesh)	Abertura Peneira ( $10^{-3} \text{ m}$ )	Diâmetro médio $D_p$ ( $10^{-3} \text{ m}$ )
$f_1$	5	4,76 – 4,00	4,38
$f_2$	6	4,00 – 3,35	3,68
$f_3$	8	3,35 – 2,38	2,87
$f_4$	10	3,35 – 1,70	2,53
$f_5$	9	2,38 – 2,00	2,19
$f_6$	11	2,00 – 1,70	1,85
$f_7$	12	1,70 – 1,41	1,56
$f_8$	20	1,70 – 0,850	1,28
$f_9$	28	0,850 – 0,600	0,725
$f_{10}$	35	0,600 – 0,425	0,513
$f_{11}$	48	0,425 – 0,300	0,363
$f_{12}$	65	0,300 – 0,212	0,256

Fonte: Handbook of Chemical Engineering. Perry, 21-40 Sistemas Sólido-Sólido (adaptado).

Os dados foram coletados com variações de pressão de 10 milímetros de coluna de água, até o ponto onde se iniciou a fluidização, caracterizada visualmente pela expansão do leito e pela formação de bolhas do ar em excesso que caminhavam pelo leito expandido. A velocidade onde se iniciou esse processo foi tomada como a velocidade de mínima fluidização. Não foi possível coletar dados de perda de carga além do ponto de mínima fluidização, pois o leito apresentava tendência a expulsar as partículas da coluna, devido ao seu pequeno diâmetro.

<sup>4</sup> A série padrão consta de 14 peneiras e tem como base uma peneira de 200 malhas por polegada linear (200 mesh).

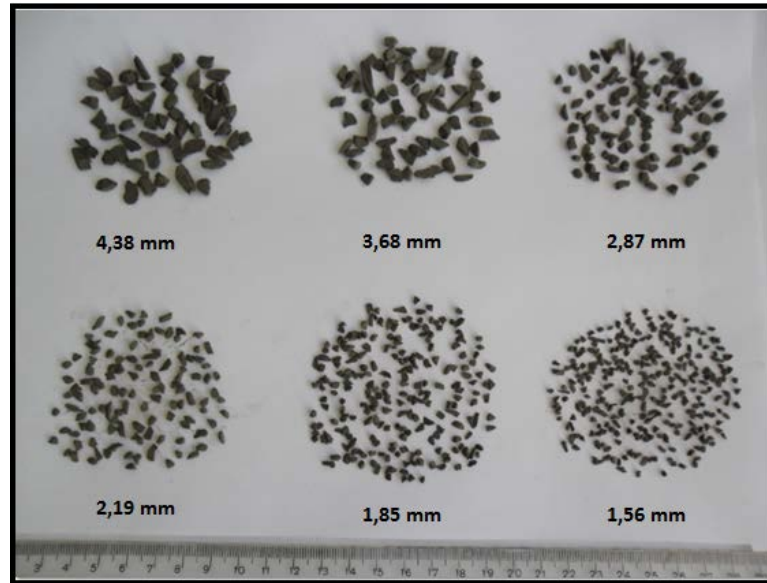


Figura 5 - Amostras de xisto utilizadas no experimento.

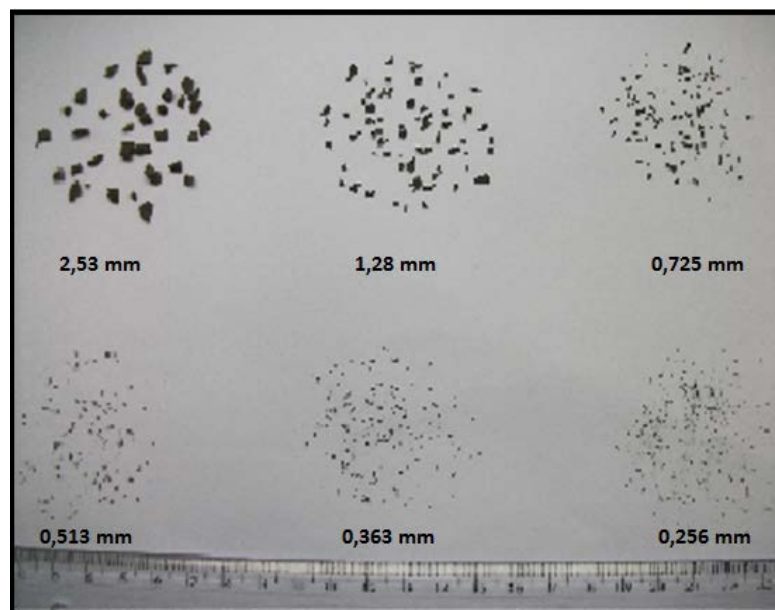


Figura 6 - Amostras de xisto utilizadas no experimento.

A esfericidade é um parâmetro comum para caracterizar a influência da forma de partículas irregulares na hidrodinâmica de sistemas particulados. Quando não é possível calcular diretamente a esfericidade a partir da forma geométrica da partícula, essa pode ser determinada, por exemplo, a partir de dados experimentais de queda de pressão no leito, ajustando-os a uma função empírica e utilizando a esfericidade como parâmetro de ajuste (esfericidade efetiva).

Nesse trabalho, esfericidades de partículas grandes de xisto foram determinadas pelo método do escaneamento tridimensional, realizado na Petrobrás - Six. Esse método é limitado a partículas maiores que as utilizadas nesse trabalho, porém a esfericidade resultante ( $0,72 \pm 0,06$ ) não mostrou tendência de variação em relação ao tamanho da partícula. Dessa forma, nesse trabalho foi adotada, para as faixas de partículas estudadas, a esfericidade determinada para essas partículas maiores.

### **3.2 Caracterizações do Sistema**

Para o estudo em questão, foram usadas amostras com doze diferentes diâmetros e realizou a repetição dos testes de amostragem para as faixas a fim de verificar a repetibilidade dos dados experimentais. O diâmetro médio foi obtido utilizando o diâmetro de peneira ( $D_p$ ) que representa a média entre as aberturas da peneira de maior diâmetro e a peneira que reteve a amostra.

A densidade do xisto foi medida experimentalmente, utilizando o método do deslocamento de volume do líquido. Para isso, introduziu-se uma massa conhecida de xisto em um volume conhecido de água em uma proveta calibrada. Pela variação do nível de água, foi obtido o volume ocupado pelo xisto e estabelecida a relação entre a massa de xisto e seu volume. Os testes foram repetidos para diversas amostras de xisto, que não apresentaram diferença significativa dos resultados, resultando na densidade média de valor  $2180 \text{ kg/m}^3$ .

### **3.3 Porosidade do leito**

A partir dos dados experimentais, realizou-se a média desses valores e foi calculada a porosidade do leito pela relação entre o volume de vazios por volume total do leito. A Tabela 4 apresenta os valores das médias da porosidade para cada uma das faixas granulométricas e colunas utilizadas com seus respectivos desvios padrão. Para os dados de queda de pressão, as porosidades utilizadas nas análises dos resultados foram as porosidades reais de cada

experimento. Sendo a porosidade a proporção de espaços vazios, então é possível afirmar que quanto mais as partículas se afastam da forma esférica, mais poroso será o leito.

Sabe-se que a porosidade média do leito é um parâmetro de grande influência na perda de carga do mesmo, tendo grande efeito no ajuste dos modelos matemáticos (NEMEC E LEVEC, 2005). A porosidade média pode ser influenciada pelo efeito de parede e pela forma de carregamento. Dessa forma, foram utilizadas diferentes formas de carregamento de porosidade, para todas as faixas e colunas utilizadas.

## **4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

### **4.1 Equipamento experimental**

Para o procedimento experimental foi utilizado um integralizador de vazão modelo LAB INDÚSTRIA MGP-2 com vazão máxima: 1,4 m<sup>3</sup>/h e vazão mínima: 0,02 m<sup>3</sup>/h. Para o leito os experimentos foram efetuados em quatro colunas cilíndricas de vidro com as seguintes dimensões: 0,0173 m de diâmetro por 1,21 m de altura; 0,0246 m de diâmetro por 0,75 m de altura; 0,0354 m de diâmetro por 0,81 m de altura e 0,0470 m de diâmetro por 0,95 m de altura. O fluido utilizado foi o ar e a variação de pressão foi medida através do manômetro em forma de U; com uma das tomadas antes do distribuidor e a outra aberta para a atmosfera. A vazão foi controlada por meio de uma válvula agulha. Os testes foram realizados à temperatura ambiente.

A Figura 7 representa um desenho esquemático da instalação utilizada para a realização dos testes de medição de perda de carga.

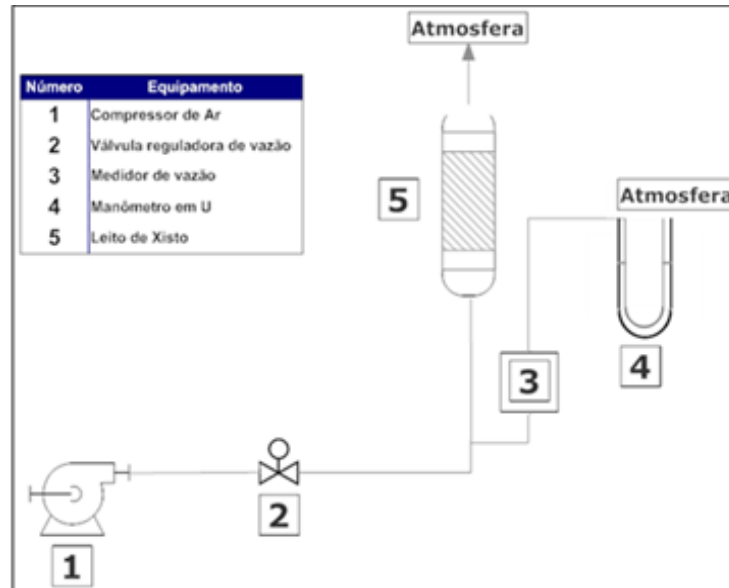


Figura 7 - Equipamento utilizado para a realização dos testes.

## 4.2 Curva de Calibração

Para obter a perda de carga das colunas sem os sólidos, foram realizados testes com as colunas vazias. A Figura 8 apresenta o modelo branco de calibração, variando a pressão em função da velocidade. A variação de pressão foi registrada a cada variação média de 10 milímetros de coluna de água.

Para cada procedimento experimental, o xisto foi introduzido ao leito não ultrapassando uma altura de 0,35 m. Após a estabilização da temperatura do ar na saída do compressor, foi ajustado o ar para o procedimento dos testes. Assim, a válvula de vazão de ar controlava a passagem de ar para os testes. Com isso, a cada variação de pressão de 10 milímetros de coluna d'água, foram medidos os valores com os respectivos tempos por meio da passagem do volume de ar. Este procedimento foi feito para cada faixa granulométrica e cada coluna, na sua maioria em triplicatas, para uma avaliação do erro experimental. As Figuras 9 e 10 representam um dos gráficos confeccionados em triplicata para uma dada faixa granulométrica. Escolheu-se para exibir a seguir as faixas  $f_1$  para a coluna de 0,0173 m e  $f_3$  mm para a coluna de 0,0354 m.

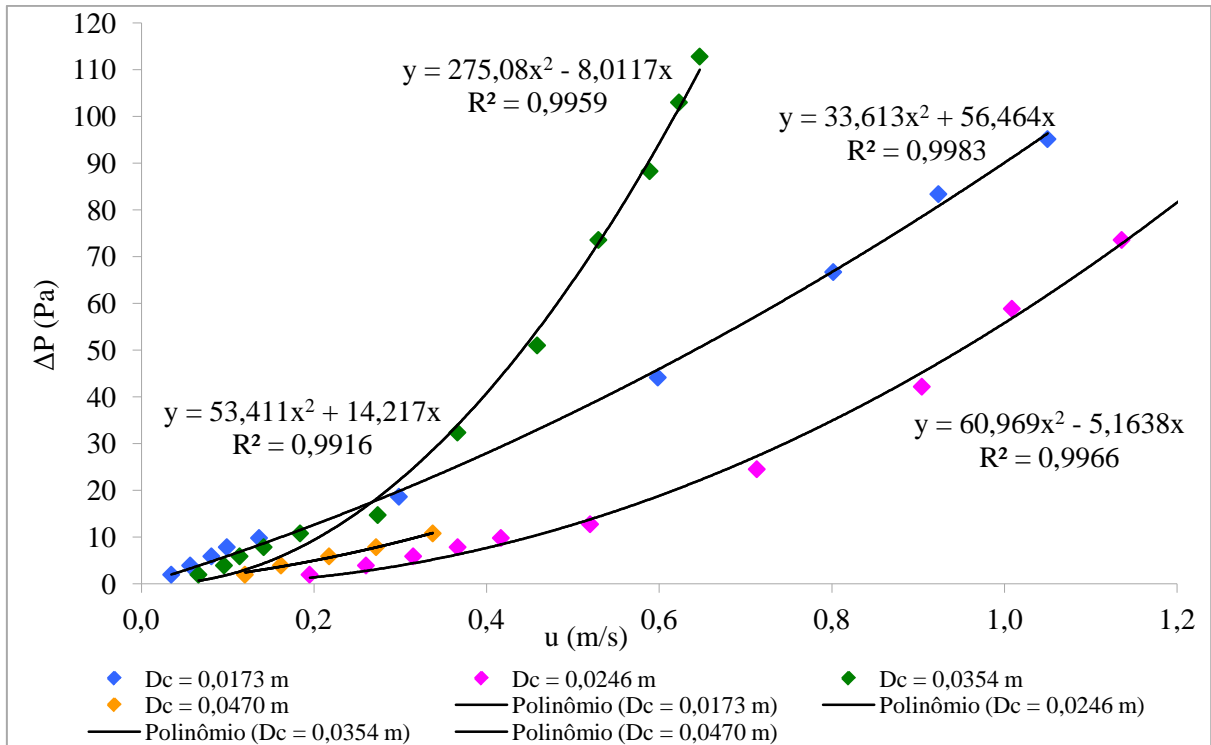


Figura 8: Perda de carga para as colunas vazias.

Fonte: O autor (2012)

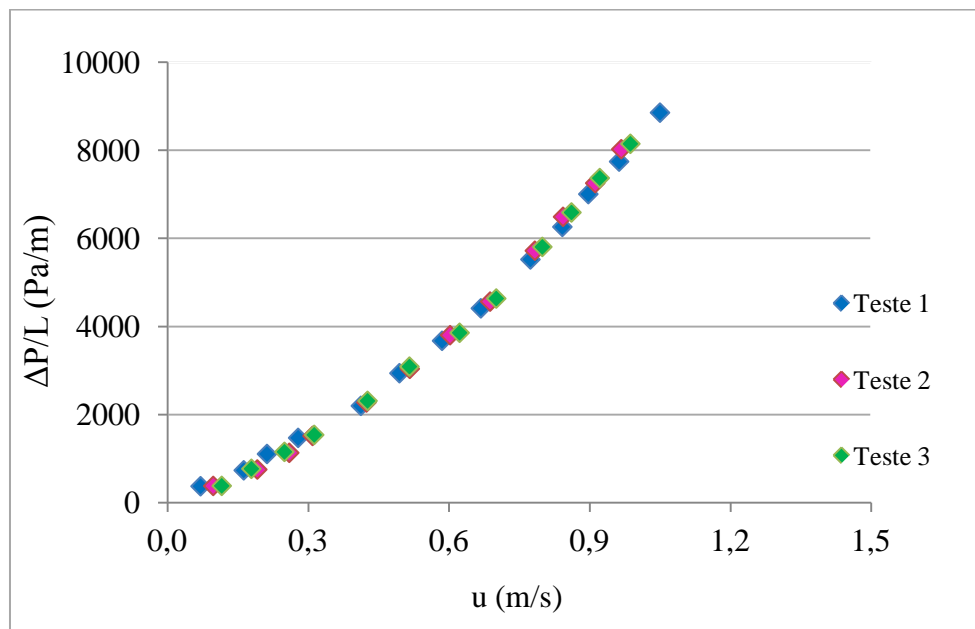


Figura 9 - Triplicatas dos testes referentes a amostra  $f_1$  para a coluna de 0,0173 m.

Fonte: O autor (2012)

Para cada teste, novos sólidos foram carregados na coluna. Pela figura pode-se notar que os testes têm reprodutibilidade, e que a partir da velocidade 0,9 m/s, a pressão torna-se constante, caracterizando o estado do sistema fluidizado. Esse estado, em todos os testes realizados, foi obtido após uma breve expansão no leito seguida do aparecimento de bolhas de gás, características da fluidização borbulhante. Na maioria dos testes realizados, a velocidade máxima utilizada corresponde ao início do borbulhamento, e foi tomada como a velocidade mínima de fluidização que finalizou o experimento.

Constatou-se que, ao longo dos testes realizados, não houve variação significativa da temperatura, sendo esta considerada para o experimento como temperatura em torno de 23 °C. Analisou-se que o desvio padrão referente às triplicatas apresentado pelos dados, com variação entre 0,01 e 1,5%, representou uma reprodutibilidade satisfatória para os dados.

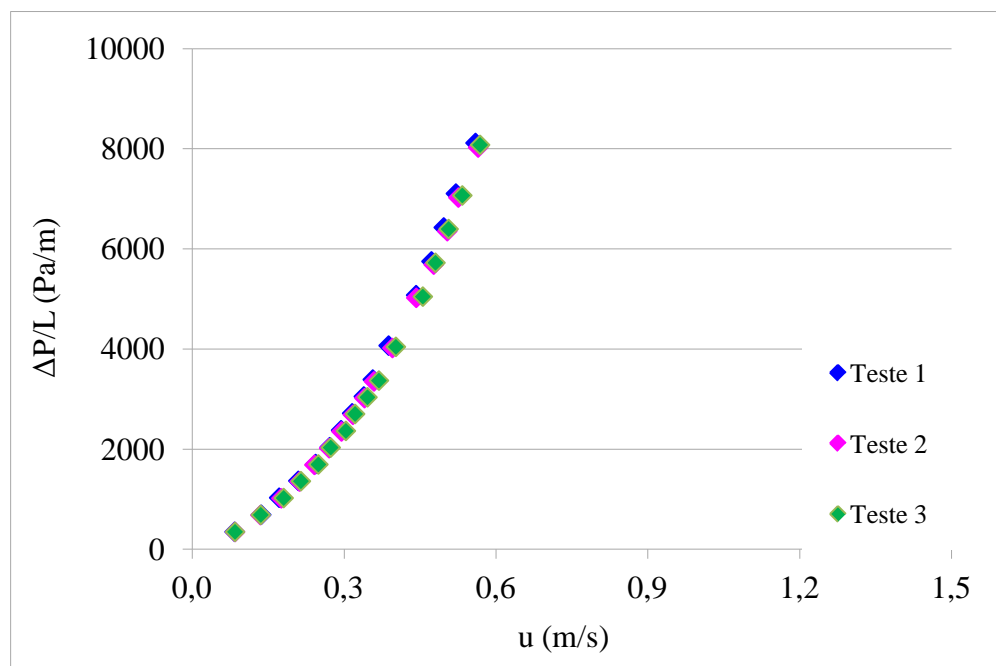


Figura 10 - Triplicatas dos testes referentes a amostra  $f_3$  para a coluna de 0,0354 m.

Fonte: O autor (2012)

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Método de estimação dos parâmetros

Segundo Nemeç e Levec (2005), a aplicação da Equação de Ergun com os valores originais das constantes para partículas de diferentes formas, tem sido avaliada em termos de sua aplicabilidade para prever os dados experimentais e compará-los com outras aproximações existentes.

Os modelos foram ajustados por meio do método dos mínimos quadrados, utilizando a ferramenta Solver do Excel para a minimização dos resíduos. Como estimativas iniciais, foram utilizadas as constantes originais de cada modelo.

Por meio da divisão do valor obtido pelo número de pontos, obtêm-se a variância residual média ( $s^2$ ), considerado um parâmetro adequado para a avaliação dos ajustes.

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{\Delta P}{L} \right)_{\text{calculado}} - \left( \frac{\Delta P}{L} \right)_{\text{experimental}} \right]^2 \quad (4.1)$$

As comparações são feitas por meio da *Mean Relative Deviation*<sup>5</sup> (MRD) como indicador estatístico:

$$MRD(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\left| \left( \frac{\Delta P}{L\rho} \right)_{\text{calculado}} - \left( \frac{\Delta P}{L\rho} \right)_{\text{experimental}} \right|}{\left( \frac{\Delta P}{L\rho} \right)_{\text{experimental}}} \times 100 \quad (4.2)$$

Os critérios estatísticos utilizados para a avaliação dos modelos também incluíram termos como o coeficiente de correlação, que permite concluir se o modelo ajustado representa de maneira aceitável os valores experimentais.

---

<sup>5</sup> Desvio Médio Relativo.

## 5.2 Porosidade do Leito

A porosidade do leito particulado tem uma grande influência na perda de carga e é influenciada, por sua vez, pelo diâmetro e forma das partículas, bem como pelo diâmetro da coluna. Também é alterada pelo modo de carregamento do leito, de forma que foram realizados estudos da porosidade para os diversos sistemas empregados. Para cada coluna e cada faixa granulométrica, foram feitas cinco medidas de porosidade do leito, em média, refazendo-se, o carregamento da coluna em cada uma delas e utilizando massas diferentes. Uma planilha com todos os resultados obtidos encontra-se no Anexo III.

Da Tabela 4 pode-se observar que a porosidade aumenta com a diminuição do tamanho das partículas. Para a maior coluna, 0,0470 m, por exemplo, a porosidade das faixas  $f_1$  e  $f_2$  ficaram em torno de 0,50, enquanto que para as faixas menores  $f_{10}$  e  $f_{11}$ , em torno de 0,56. A faixa  $f_4$  é uma distribuição de partículas mais ampla, englobando as faixas  $f_3$ ,  $f_5$  e  $f_6$ , da mesma forma que a faixa  $f_8$  engloba a faixa  $f_7$  até o início da  $f_9$ . Para essas faixas de distribuição mais ampla, nota-se que a porosidade média fica abaixo porosidade esperada. Esse efeito se dá pela acomodação das partículas menores nos interstícios deixados pelas partículas maiores, o que leva a uma tendência de diminuição de porosidade. Em relação à influência do diâmetro da coluna, pode-se observar que, para as faixas maiores  $f_1$  a  $f_3$ , a porosidade é maior para as colunas menores. Esse efeito é devido à influência das paredes da coluna, que tende a ordenar o empacotamento das partículas, diminuindo a porosidade local. Para as partículas menores, a partir de  $f_4$ , esse efeito não é mais observado.

Para a coluna de 0,0470 m, a Tabela 5 apresenta os dados obtidos para as amostras  $f_1$ ,  $f_5$  e  $f_7$ . Em todos os testes foram realizadas análises estatísticas com 95% de intervalo de confiança, para indicar a confiabilidade do estudo.

Tabela 4 – Porosidades médias para as faixas utilizadas para cada coluna

	$D_c$ ( $10^{-3}$ m)	47,0	$D_c$ ( $10^{-3}$ m)	35,4	$D_c$ ( $10^{-3}$ m)	24,6	$D_c$ ( $10^{-3}$ m)	17,3
<b>Faixa</b>	$\epsilon$	<b>Desvio Padrão</b>	$\epsilon$	<b>Desvio Padrão</b>	$\epsilon$	<b>Desvio Padrão</b>	$\epsilon$	<b>Desvio Padrão</b>
f <sub>1</sub>	0,499	0,004	0,508	0,006	0,525	0,010	0,528	0,005
f <sub>2</sub>	0,499	0,015	0,517	0,003	0,546	0,004	0,530	0,004
f <sub>3</sub>	0,525	0,010	0,533	0,006	0,542	0,017	0,539	0,008
f <sub>4</sub>	0,496	0,018	0,486	0,022	0,491	0,007	0,503	0,003
f <sub>5</sub>	0,504	0,005	0,505	0,012	0,508	0,024	0,500	0,013
f <sub>6</sub>	0,535	0,003	0,541	0,005	0,549	0,026	0,541	0,004
f <sub>7</sub>	0,554	0,003	0,551	0,010	0,558	0,022	0,548	0,005
f <sub>8</sub>	0,531	0,007	0,523	0,006	0,533	0,010	0,529	0,007
f <sub>9</sub>	0,555	0,011	0,548	0,004	0,551	0,012	0,557	0,016
f <sub>10</sub>	0,568	0,011	0,560	0,007	0,562	0,001	0,554	0,005
f <sub>11</sub>	0,562	0,013	0,568	0,003	0,578	0,034	0,551	0,004
f <sub>12</sub>	-	-	0,559	0,009	0,571	0,001	0,572	0,002

Fonte: O autor (2012)

Foram montados gráficos estatísticos para uma melhor compreensão de cada faixa. As Figuras 11, 12 e 13 apresentam os resultados. Nota-se que para cada faixa apresentada foi calculado o valor do desvio padrão, a média e a variância das amostras. Das figuras, pode-se analisar que as porosidades não apresentam distribuição normal, uma vez que o *P-valor* como mostrado nos gráficos é maior que 0,05. Nos intervalos de confiança para a média e mediana, é representado qualitativamente o número de amostras para cada valor, sendo possível obter a curva Gaussiana que é descrita por seus parâmetros de média e desvio padrão, ou seja, conhecendo-se estes, é possível determinar qualquer probabilidade em uma distribuição Normal.

Para a análise da porosidade, foram realizados os testes referentes para cada amostra trabalhada e obtido os valores referentes à altura para cálculo da porosidade.

Tabela 5 – Porosidades do leito para a coluna de 0,0470 m e faixas f<sub>1</sub>, f<sub>5</sub> e f<sub>7</sub>

	<b>Massa (Kg)</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Porosidade</b>	<b>Intervalo de Confiança</b>
	0,321	0,168	0,495	
	0,374	0,196	0,496	
f <sub>1</sub>	0,414	0,220	0,502	
	0,494	0,262	0,501	
	0,532	0,283	0,503	
Média	0,427	0,226	0,499 ± 0,004	0,499 ± 0,004
	0,342	0,182	0,502	
	0,377	0,203	0,509	
f <sub>5</sub>	0,402	0,217	0,510	
	0,434	0,229	0,499	
	0,452	0,239	0,500	
Média	0,402	0,214	0,504 ± 0,005	0,504 ± 0,006
	0,328	0,196	0,558	
	0,365	0,218	0,557	
f <sub>7</sub>	0,380	0,226	0,555	
	0,422	0,250	0,553	
	0,454	0,266	0,549	
Média	0,389	0,231	0,554 ± 0,004	0,554 ± 0,004

Fonte: O autor (2012)

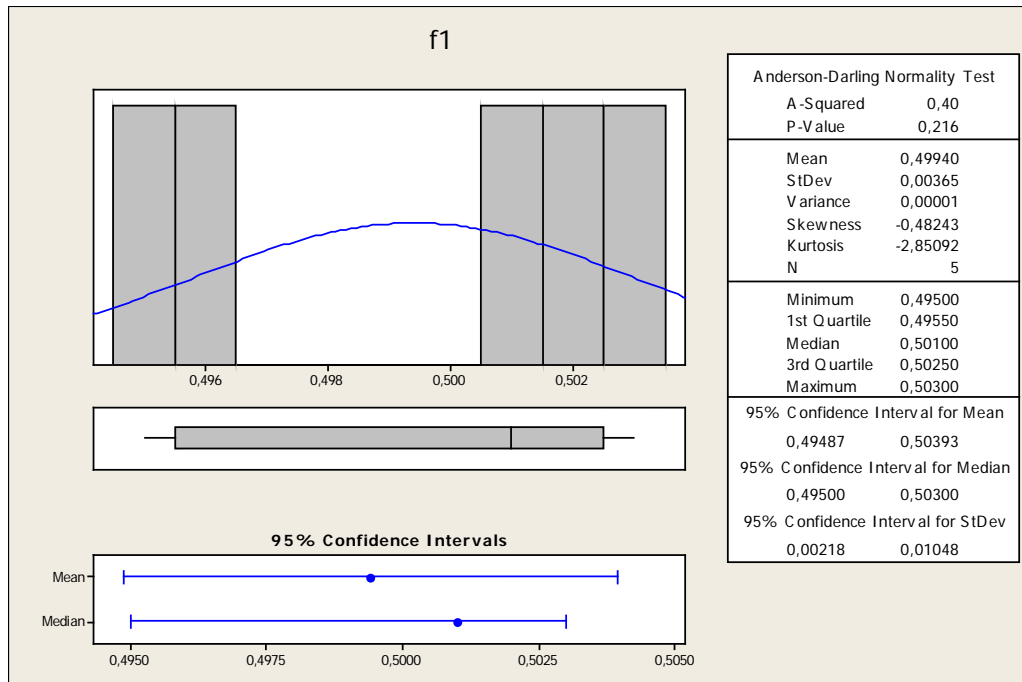


Figura 11 – Análise estatística dos valores de porosidade experimentais referentes à faixa  $f_1$ .

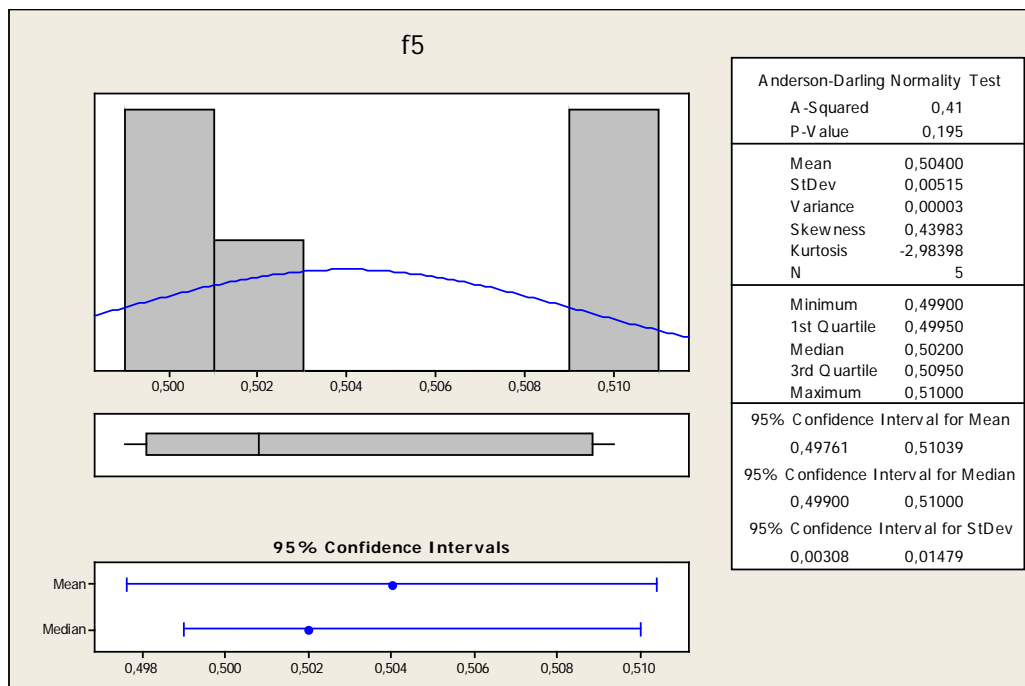


Figura 12 – Análise estatística dos valores de porosidade experimentais referentes à faixa  $f_5$ .

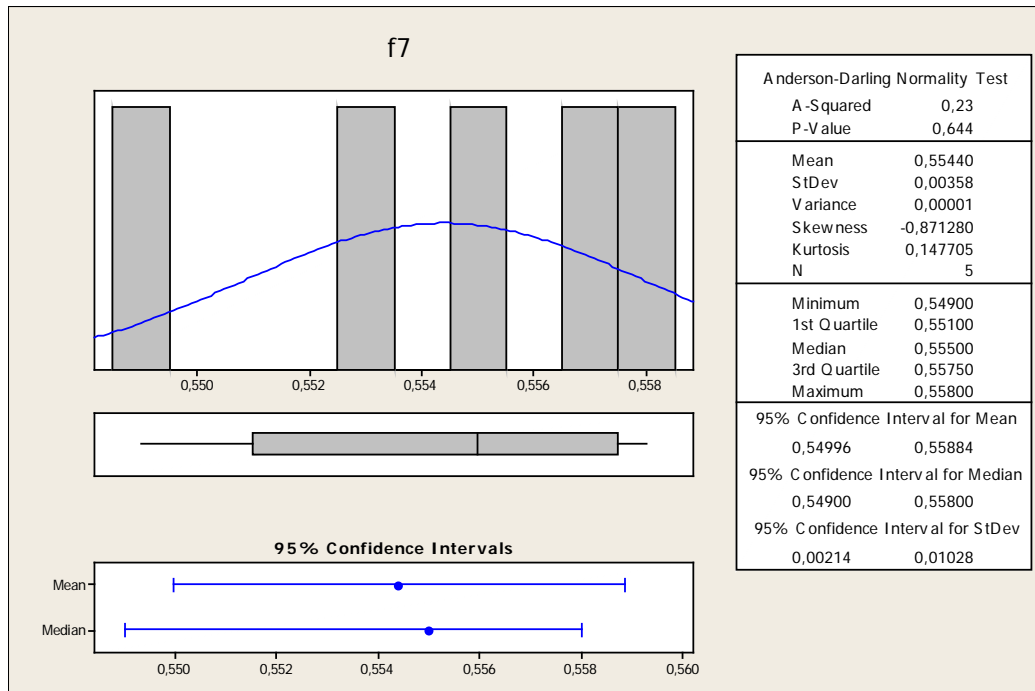


Figura 13 – Análise estatística dos valores de porosidade experimentais referentes à faixa  $f_7$ .

Os valores de porosidade média em cada um dos testes realizados estão apresentados na Figura 14. As porosidades medidas do teste de perda de carga estão mostradas na Figura 15. Na Figura 16 está apresentado o gráfico da porosidade média comparada com a porosidade do teste de perda de carga.

Da Figura 14, observa-se que, com exceção das faixas maiores  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$ , não há uma tendência de variação da porosidade média com o diâmetro da coluna, refletindo o fato que, para partículas pequenas, o efeito de parede da coluna no empacotamento do leito é desprezível. Para partículas maiores, a porosidade é maior para colunas menores, consequência do efeito de ordenamento das partículas causado pela parede da coluna.

Da Figura 14, também se pode observar que as porosidades médias das faixas maiores, são menores que das faixas de menor diâmetro. Isso se deve provavelmente a influência de distribuição da partícula dentro de cada faixa. As faixas maiores  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  tem diferença entre o diâmetro máximo e mínimo de  $7,6 \times 10^{-4} \text{m}$  e  $9,7 \times 10^{-4} \text{m}$ , enquanto que as faixas menores  $f_5$  a  $f_{12}$  tem uma diferença entre  $8,8 \times 10^{-5} \text{m}$  e  $3,8 \times 10^{-4} \text{m}$ . As faixas  $f_4$  e  $f_8$  são compostas por partículas em uma distribuição mais aberta (diferença de  $1,65 \times 10^{-3} \text{m}$  para  $f_4$  e  $8,5 \times 10^{-4} \text{m}$  para  $f_8$ ) que a das faixas vizinhas, refletindo uma queda no valor da porosidade em relação a essas.

A Figura 15 mostra as porosidades pontuais de cada faixa nos experimentos de determinação de perda de carga. Em geral, elas seguem as tendências das porosidades médias apresentadas na Figura 14, com uma dispersão um pouco maior dos dados. Como a porosidade influencia significativamente os modelos de perda de carga, foram usados os valores das porosidades reais de cada experimento, na análise daqueles valores. Uma comparação entre a porosidade média e a porosidade real pode ser vista na Figura 16.

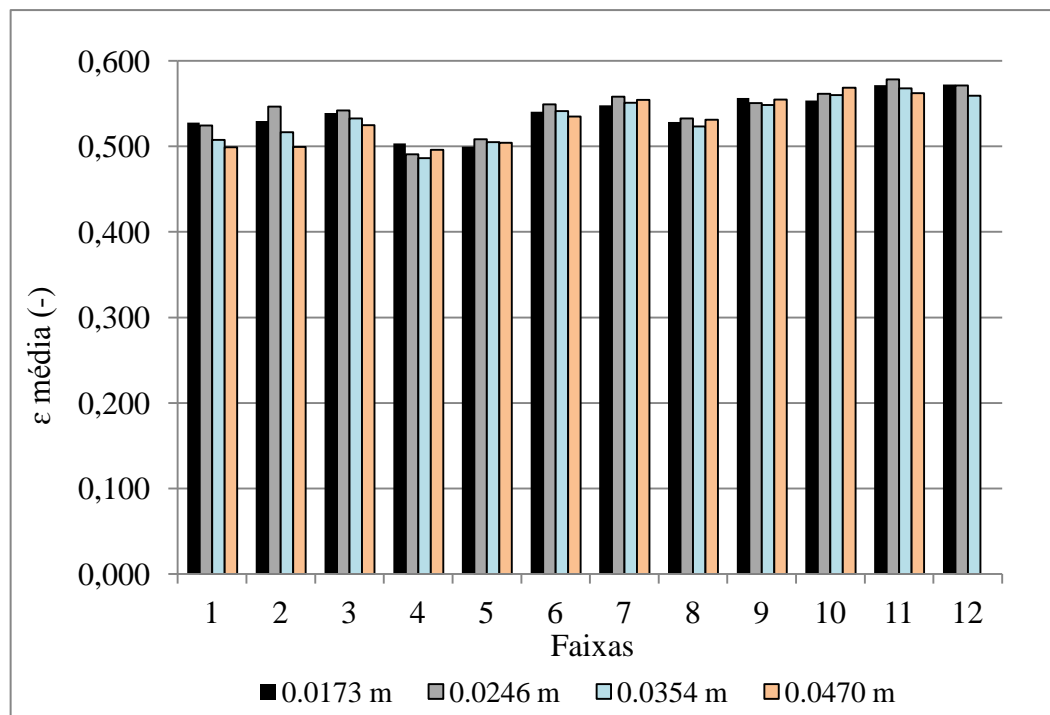


Figura 14 – Porosidade do leito experimental realizada com cinco amostras de cada faixa granulométrica.

Fonte: O autor (2012)

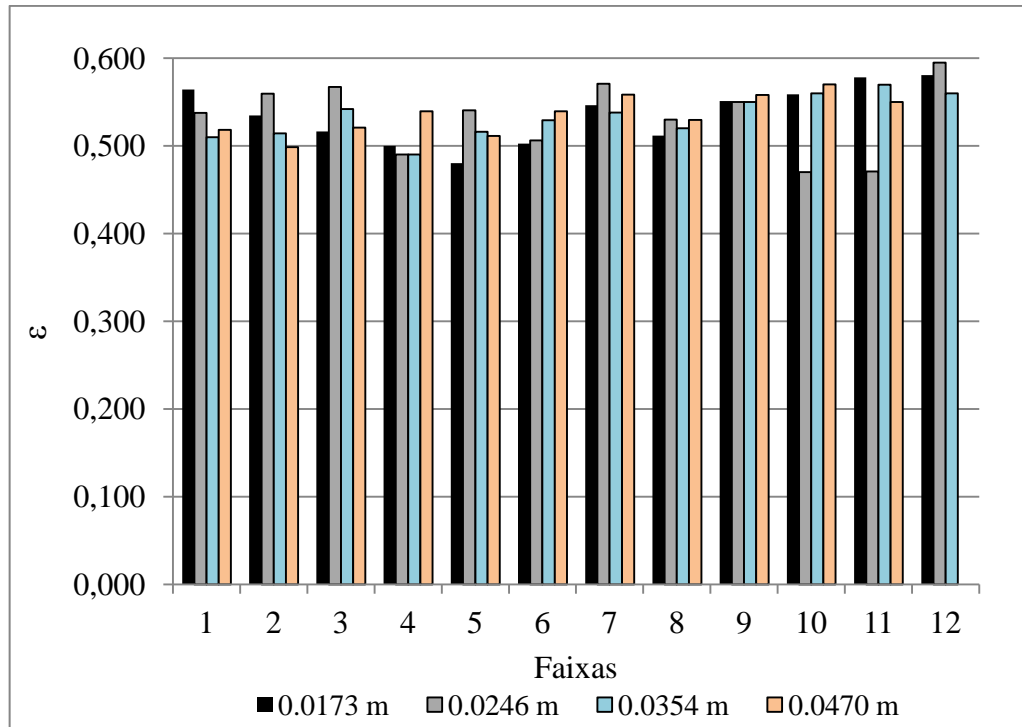


Figura 15 – Porosidade do leito experimental para todas as faixas utilizadas, em função do diâmetro da coluna.

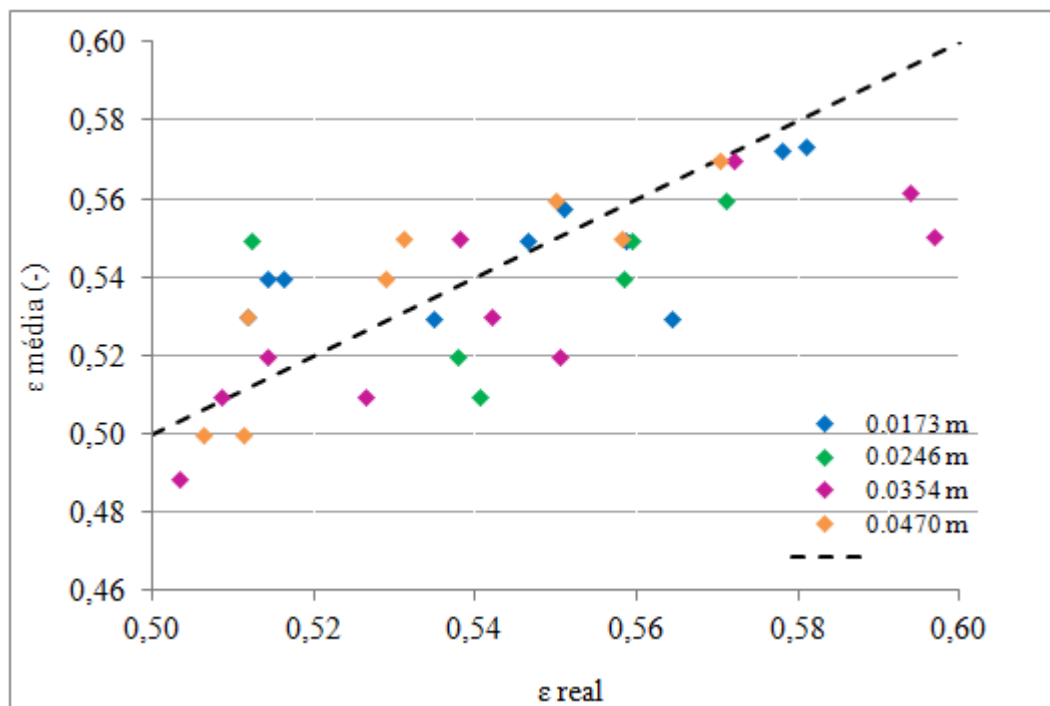


Figura 16 – Comparação entre a porosidade média e a porosidade real dos experimentos de perda de carga.

Para avaliar a influência da utilização de colunas de diferentes diâmetros, foi construída a Tabela 6, que apresenta a variância e o desvio padrão dos valores obtidos a partir de uma média de cinco testes realizados experimentalmente para cada faixa granulométrica trabalhada em relação à porosidade.

A Figura 17 representa a porosidades médias em função do diâmetro da partícula. Observa-se uma correlação entre a porosidade média e o diâmetro da partícula, na qual a porosidade média varia inversamente com o diâmetro da partícula. Nota-se que, em relação ao diâmetro da coluna não houve variação significativa da porosidade.

Tabela 6 – Valores obtidos da variância e desvio padrão (D.P)

$\Delta P$ (mmca)	D <sub>c</sub> 0,0173 m		D <sub>c</sub> 0,0246 m		D <sub>c</sub> 0,0354 m		D <sub>c</sub> 0,0470 m	
	Variância (10 <sup>-3</sup> )	D.P (10 <sup>-2</sup> )	Variância (10 <sup>-3</sup> )	D.P (10 <sup>-2</sup> )	Variância (10 <sup>-3</sup> )	D.P (10 <sup>-2</sup> )	Variância (10 <sup>-3</sup> )	D.P (10 <sup>-2</sup> )
10	0,001	0,118	0,031	0,555	0,084	0,009	0,169	0,013
20	0,026	0,509	0,014	0,369	0,099	0,010	0,478	0,022
30	0,010	0,318	0,023	0,481	0,168	0,013	0,344	0,019
40	0,025	0,499	0,136	1,17	0,185	0,014	0,345	0,019
50	0,048	0,694	0,059	0,770	0,174	0,013	0,410	0,021
60	0,092	0,958	0,051	0,715	0,157	0,012	0,288	0,017
70	0,212	1,460	0,092	0,962	0,147	0,012	-	-
80	0,124	1,110	0,157	1,250	0,197	0,014	-	-
90	0,295	1,710	0,118	1,090	0,077	0,008	-	-
100	0,042	0,650	0,156	1,250	0,139	0,019	-	-
110	-	-	-	-	0,165	0,013	-	-
120	0,0183	1,350	0,054	0,737	0,178	0,013	-	-
130	-	-	-	-	0,220	0,015	-	-
140	-	-	-	-	0,221	0,015	-	-
150	0,404	2,010	0,156	1,250	0,294	0,017	-	-
160	0,159	1,260	0,195	1,400	0,212	0,015	-	-
200	-	-	0,201	1,420	0,232	0,015	-	-
240	-	-	0,210	1,450	0,216	0,015	-	-

Fonte: O autor (2012)

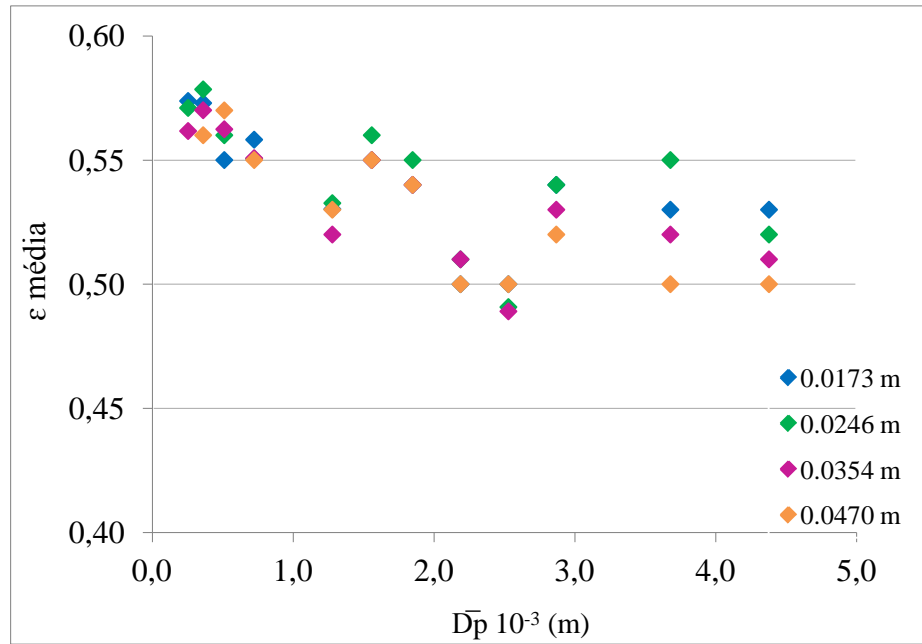


Figura 17 – Porosidades médias em função do diâmetro da partícula.

### 5.3 Testes de Queda de Pressão

Avaliando a importância da distribuição granulométrica na perda de carga do leito fixo, foram realizados testes com diferentes quantidades de faixas de amostras para cada coluna. A Tabela 7 e 8 apresentam todos os dados coletados com os cálculos efetuados da variação da perda de carga e velocidade e porosidade, onde os valores de do diâmetro da coluna estão separados por coluna de 0,0173 m à de 0,0470 m. O restante dos dados obtidos da Tabela 7 encontra-se em Anexo III.

Tabela 7 – Relação dos dados obtidos durante o procedimento experimental

Amostras	Dados	D <sub>c</sub> (m)				Total geral
		0,0173	0,0246	0,0354	0,0470	
f <sub>1</sub>	Média de $\Delta P/L$ (Pa/m)	8338,8	9133,4	8159,4	2844,7	7755.3
	Média de u (m/s)	1,001	1,027	0,668	0,414	0.877
	Média de $\varepsilon$	0,551	0,535	0,526	0,506	0.537
f <sub>2</sub>	Média de $\Delta P/L$ (Pa/m)	9284,0	7911,8	9263,7	3076,5	8017.3
	Média de u (m/s)	0,938	1,027	0,597	0,419	0.809
	Média de $\varepsilon$	0,535	0,559	0,516	0,499	0.530
f <sub>3</sub>	Média de $\Delta P/L$ (Pa/m)	9429,6	7947,9	8113,3	4543,6	8148.9
	Média de u (m/s)	0,728	0,860	0,560	0,421	0.671
	Média de $\varepsilon$	0,515	0,558	0,542	0,508	0.526
f <sub>4</sub>	Média de $\Delta P/L$ (Pa/m)	9254,8	5691,2	3371,9	6433,9	6636.4
	Média de u (m/s)	0,665	0,798	0,303	0,390	0.587
	Média de $\varepsilon$	0,500	0,490	0,490	0,526	0.505
f <sub>5</sub>	Média de $\Delta P/L$ (Pa/m)	10767,0	7741,1	8764,7	4150,2	8826.2
	Média de u (m/s)	0,635	0,758	0,536	0,389	0.598
	Média de $\varepsilon$	0,485	0,540	0,508	0,511	0.503
f <sub>6</sub>	Média de $\Delta P/L$ (Pa/m)	11172,2	9623,6	10295,3	4501,2	9656.1
	Média de u (m/s)	0,548	0,539	0,429	0,338	0.492
	Média de $\varepsilon$	0,507	0,506	0,483	0,529	0.507
f <sub>7</sub>	Média de $\Delta P/L$ (Pa/m)	9630,9	7863,2	9119,4	7195,5	8845.1
	Média de u (m/s)	0,527	0,588	0,425	0,394	0.498
	Média de $\varepsilon$	0,550	0,571	0,538	0,531	0.549
f <sub>8</sub>	Média de $\Delta P/L$ (Pa/m)	6316,1	6999,9	8744,2	11236,6	8324.2
	Média de u (m/s)	0,267	0,399	0,369	0,387	0.356
	Média de $\varepsilon$	0,515	0,537	0,515	0,521	0.522
f <sub>9</sub>	Média de $\Delta P/L$ (Pa/m)	6968,0	7091,5	8420,4	9579,1	7928.5
	Média de u (m/s)	0,168	0,175	0,240	0,361	0.227
	Média de $\varepsilon$	0,500	0,556	0,557	0,558	0.548
f <sub>10</sub>	Média de $\Delta P/L$ (Pa/m)	7112,0	7395,5	8287,8	9769,4	8459.4
	Média de u (m/s)	0,087	0,135	0,186	0,162	0.140
	Média de $\varepsilon$	0,549	0,470	0,560	0,609	0.565
f <sub>11</sub>	Média de $\Delta P/L$ (Pa/m)	6679,9	8069,7	9188,4	9254,0	8616.6
	Média de u (m/s)	0,066	0,067	0,074	0,069	0.069
	Média de $\varepsilon$	0,578	0,471	0,570	0,552	0.546
f <sub>12</sub>	Média de $\Delta P/L$ (Pa/m)	6366,5	10573,9	8118,4	*	8908.2
	Média de u (m/s)	0,027	0,039	0,026	*	0.033
	Média de $\varepsilon$	0,581	0,595	0,560	*	0.583

Total Média de $\Delta P/L$ (Pa/m)	8946,5	7732,4	8358,0	7430,0	8195,0
Total Média de $u$ (m/s)	0,575	0,550	0,359	0,303	0,467
Total Média de $\varepsilon$	0,526	0,531	0,531	0,541	0,531

Fonte: O autor (2012)

\* Testes não realizados devido ao tamanho muito grande da coluna em relação à quantidade de massa, resultando em altura insuficiente.

Tabela 8 – Relação dos dados obtidos durante o procedimento experimental para coluna de 0,0173 m

$D_p$	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$u$ (m/s)	$\varepsilon$
$f_{12}$	6366,5	0,027	0,581
$f_{11}$	6679,9	0,066	0,578
$f_{10}$	7208,6	0,104	0,559
$f_9$	6968,0	0,168	0,500
$f_8$	6237,0	0,272	0,500
$f_7$	9688,5	0,514	0,548
$f_6$	11280,3	0,547	0,502
$f_5$	10667,8	0,633	0,490
$f_4$	10890,2	0,696	0,500
$f_3$	9363,3	0,733	0,515
$f_2$	9390,3	0,925	0,535
$f_1$	8143,8	0,987	0,541

Fonte: O autor (2012)

#### 5.4 Comparações da perda de carga para diferentes faixas granulométricas

Procedimentos de fluidização em leito fixo, em que o aumento da velocidade superficial do gás ocorre em pequenos crescimentos e, em seguida, diminui, foram realizados em colunas de diâmetros diferentes para investigar o atrito no efeito de parede sobre a queda de pressão e altura do leito. A grande parte das definições e correlações, foram de início feitas para partículas esféricas, com o objetivo de adequar este trabalho a estes conceitos. Portanto, será considerado que a variável referente ao tamanho da partícula ( $d_p$ ), será substituída pela

multiplicação desta pela esfericidade ( $\phi$ ). Por convenção, essa substituição somente não ocorrerá nos modelos que predizem os valores de  $\Delta P/L$ , utilizando a relação  $D/d_p$ . Nestas situações, a dependência que os modelos propõem para  $d_p$  será substituída por  $d_p\phi$ , enquanto que a dependência em relação a  $D/d_p$  será mantida.

A partir dos dados coletados, são apresentados os gráficos que relacionam a perda de carga para o sistema relacionando com a variação de velocidade nas Figuras 18 até a de número 25. Para cada gráfico, encontra-se o mesmo confeccionado estatisticamente pelo programa Minitab<sup>6</sup> 16, evidenciando a margem de erro com 95% de intervalo de confiança apresentados para alguns dos gráficos de cada coluna. O conjunto completo de dados encontra-se no Anexo I.

Nas figuras de número 18, 20, 22 e 24 são mostrados testes de perda de carga variando em função da velocidade. Pode-se observar que a perda de carga aumenta com a diminuição do diâmetro da partícula, e conseqüentemente a velocidade de mínima fluidização diminui. Dos dados observa-se também que a perda de carga é praticamente linear com a velocidade, o que caracteriza o estado de escoamento viscoso.

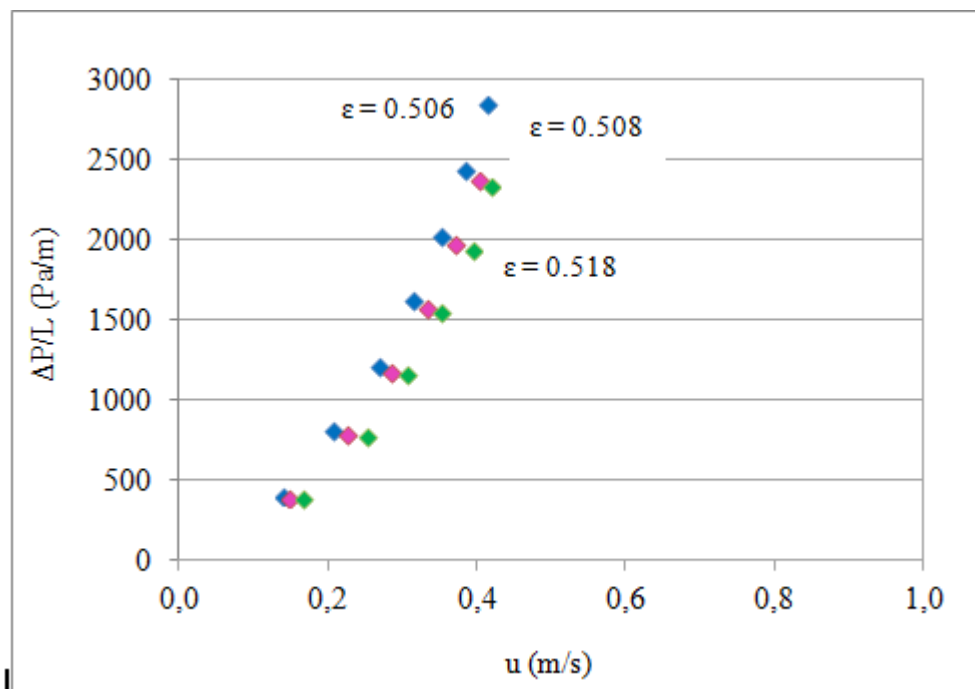


Figura 18 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_1$  referentes à coluna de 0,0470 m de diâmetro.

<sup>6</sup> Programa utilizado para auxiliar a interpretar os resultados, estimando a validade das suposições estatísticas.

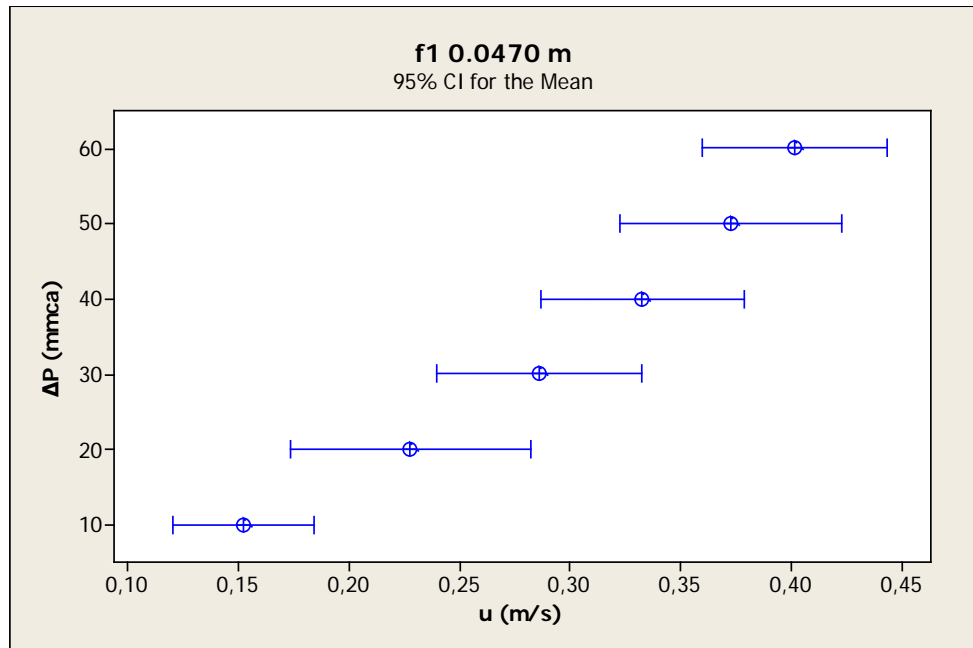


Figura 19 - Barra de erro dos dados experimentais para partículas  $f_1$  referentes à coluna de 0,0470 m de diâmetro com 95% de confiança.

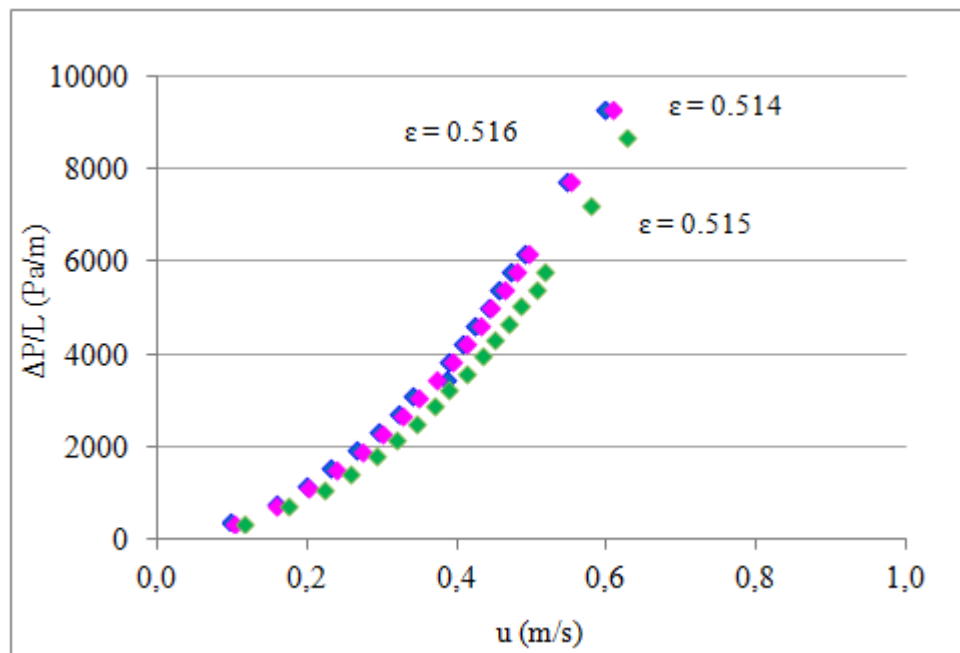


Figura 20 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_2$  referentes à coluna de 0,0354 m de diâmetro.

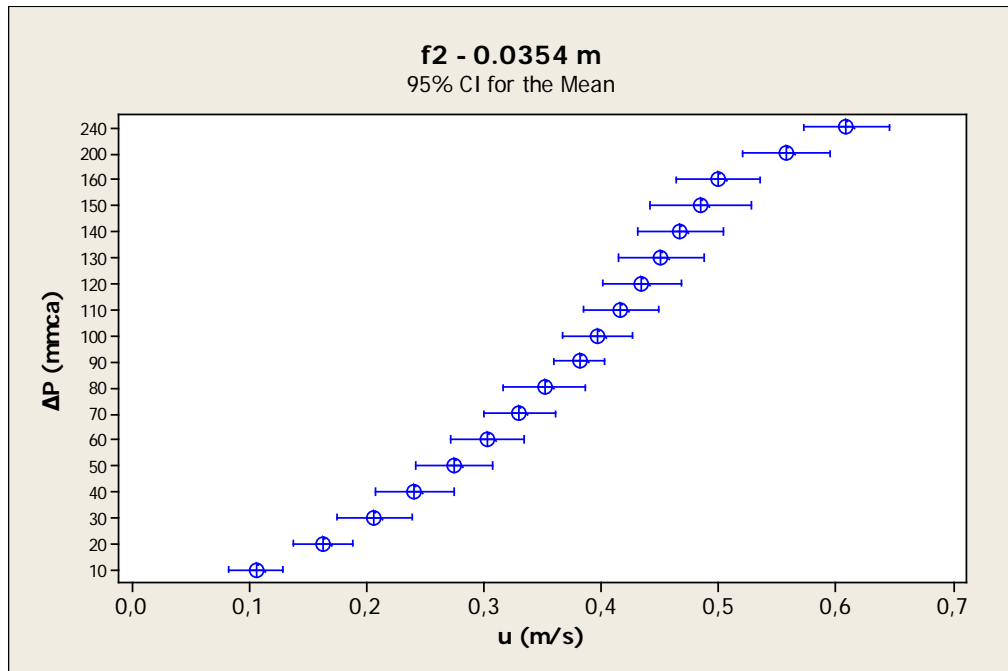


Figura 21 - Barra de erro dos dados experimentais para partículas  $f_2$  referentes à coluna de 0,0354 m de diâmetro com 95% de confiança.

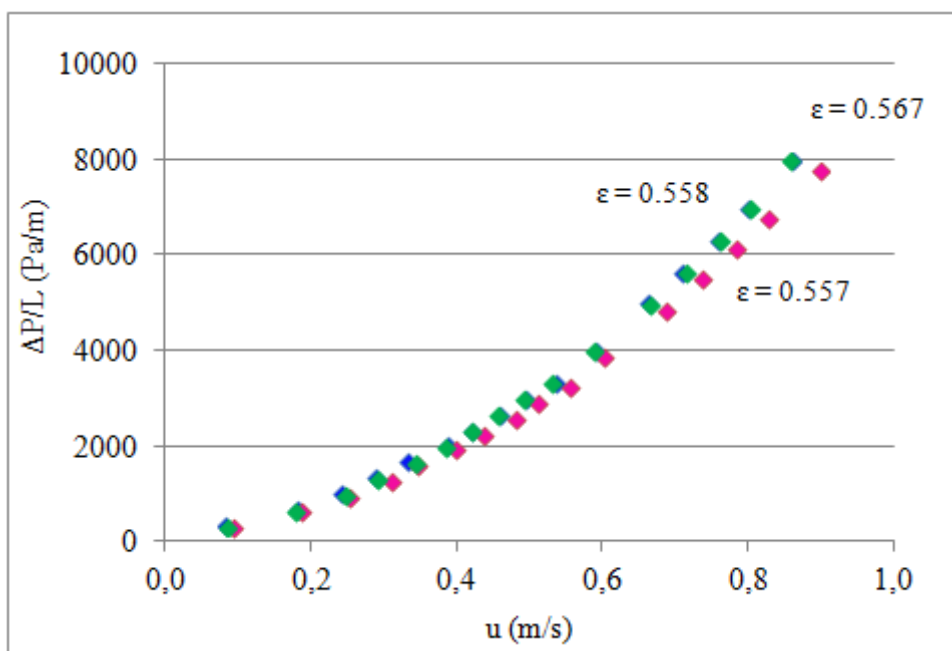


Figura 22 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_3$  referentes à coluna de 0,0246 m de diâmetro.

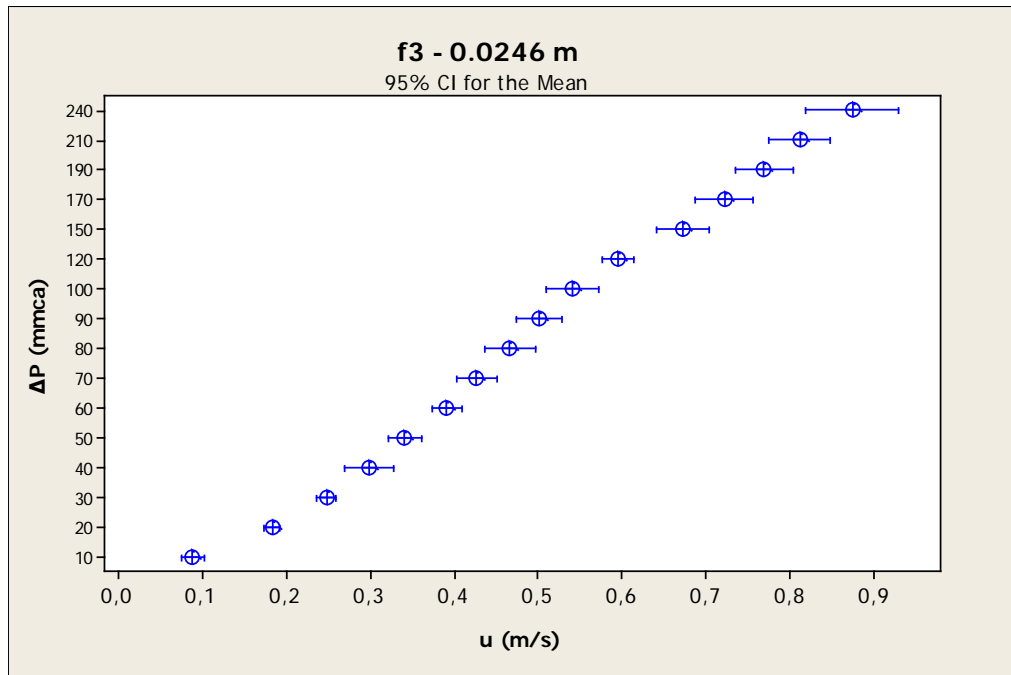


Figura 23 - Barra de erro dos dados experimentais para partículas  $f_3$  referentes à coluna de 0,0246 m de diâmetro com 95% de confiança.

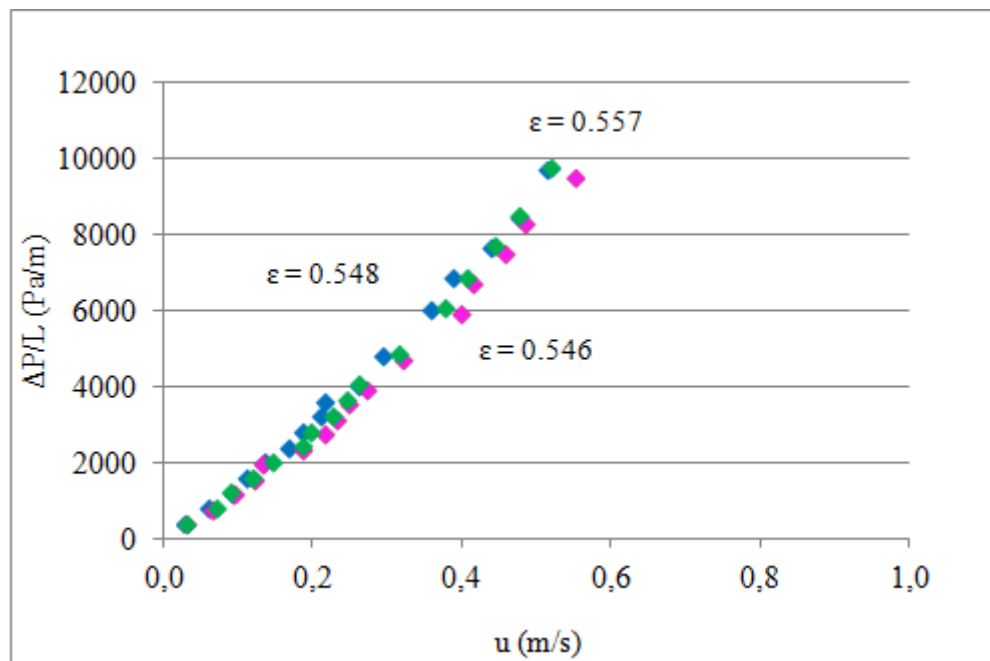


Figura 24 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_7$  referentes à coluna de 0,0173 m de diâmetro.

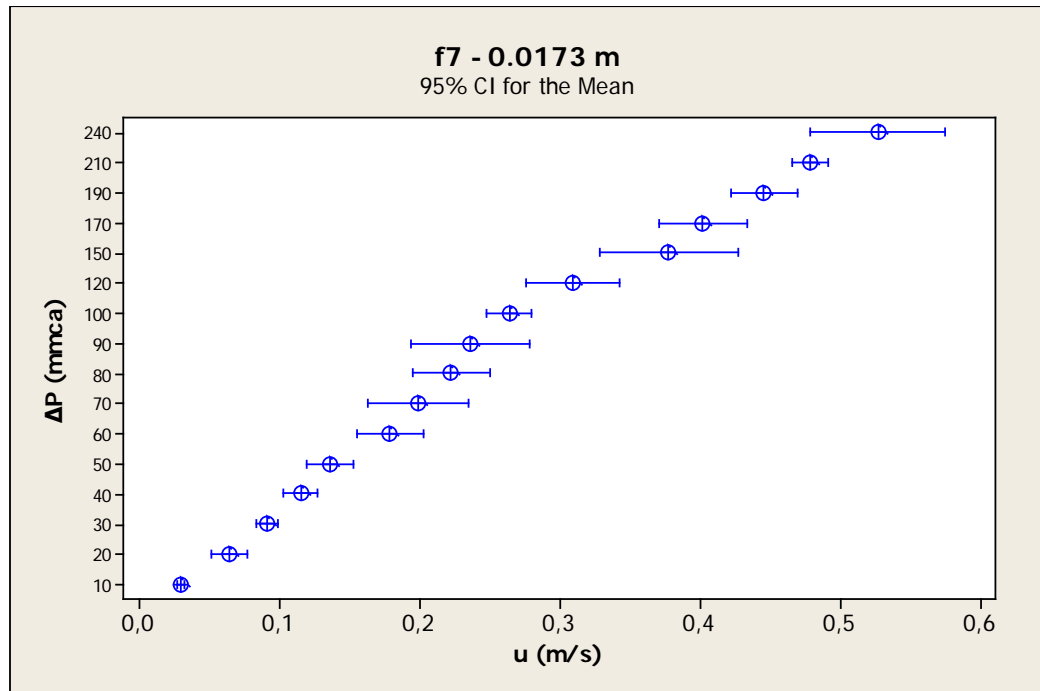


Figura 25 - Barra de erro dos dados experimentais para partículas  $f_7$  referentes à coluna de 0,0173 m de diâmetro com 95% de confiança.

Pode-se dizer que, entre os testes apresentados para partículas maiores, a perda de carga aumenta conforme o leito aumenta. O aumento na porosidade do leito faz com que a perda de carga do sistema se torne menor. Assim, se a porosidade sofrer pequenas alterações, devido ao empacotamento particular do leito no teste específico, a queda de pressão será grandemente afetada.

### 5.5 Relações sem efeito de parede e modelos matemáticos

O ajuste de modelos matemáticos é proposto partindo dos resultados experimentais em comparação aos modelos obtidos da literatura. Para estimar a perda de carga, são testados diferentes modelos citados na literatura, avaliando a modelagem dos dados experimentais.

A partir da relação entre o diâmetro da coluna e o diâmetro da partícula, montou-se a Tabela 9, relacionando as faixas com e sem o efeito de parede, divididas em duas classes. Foram separadas as faixas assumindo a classificação de  $f_1$  até  $f_7$  para faixas de maior

granulometria, que apresentam o efeito de parede e as demais,  $f_8$  até  $f_{12}$ , em que podemos avaliar pelos gráficos que o efeito parede é inexistente.

Para ajustar os modelos matemáticos adaptados ao sistema em estudo, as constantes A e B da equação de Ergun foram ajustadas utilizando os dados experimentais. Para a análise deste trabalho, foram considerados dados referentes à coluna de 0,0470 m, uma vez que para colunas de maiores diâmetros o efeito de parede torna-se menor. Para cada faixa granulométrica foi realizada uma regressão linear encontrando-se valores ajustados de A e B. O parâmetro A representa a perda de carga devido à energia viscosa enquanto B representa a perda de carga devida a forças cinéticas. A atuação das forças viscosas é efetiva apenas no regime laminar. Na Tabela 10, encontram-se os valores calculados.

Tabela 9 - Relação entre diâmetro da coluna pelo diâmetro da partícula

Faixas	Diam. médio	$D_c (10^{-3} \text{ m})$	$D_c (10^{-3} \text{ m})$	$D_c (10^{-3} \text{ m})$	$D_c (10^{-3} \text{ m})$
	$D_p (10^{-3} \text{ m})$	17,3	24,6	35,4	47,0
$f_1$	4,38	3,95	5,62	8,08	10,73
$f_2$	3,68	4,70	6,68	9,62	12,77
$f_3$	2,87	6,03	8,57	12,33	16,38
$f_4$	2,53	6,84	9,72	13,99	18,58
$f_5$	2,19	7,90	11,23	16,16	21,46
$f_6$	1,85	9,35	13,30	19,14	25,41
$f_7$	1,56	11,09	15,77	22,69	30,13
$f_8$	1,28	13,52	19,22	27,66	36,72
$f_9$	0,725	23,86	33,93	48,83	64,83
$f_{10}$	0,513	33,72	47,95	69,01	91,62
$f_{11}$	0,363	47,66	67,77	97,52	129,48
$f_{12}$	0,256	67,58	96,09	138,28	183,59

Fonte: O autor (2012)

Nas Figuras 26 a 29, são apresentados os dados experimentais e as curvas geradas pelos modelos encontrados na literatura, com o objetivo de avaliar o quanto a equação proposta é capaz de reproduzir os dados experimentais.

Tabela 10 – Valores das constantes A e B para o ajuste de modelos

Coluna 0,0470 m	A	B
$f_1$	138,8	8,90
$f_3$	276,5	7,99
$f_6$	400,3	6,06
$f_7$	335,8	7,65

Fonte: O autor (2012)

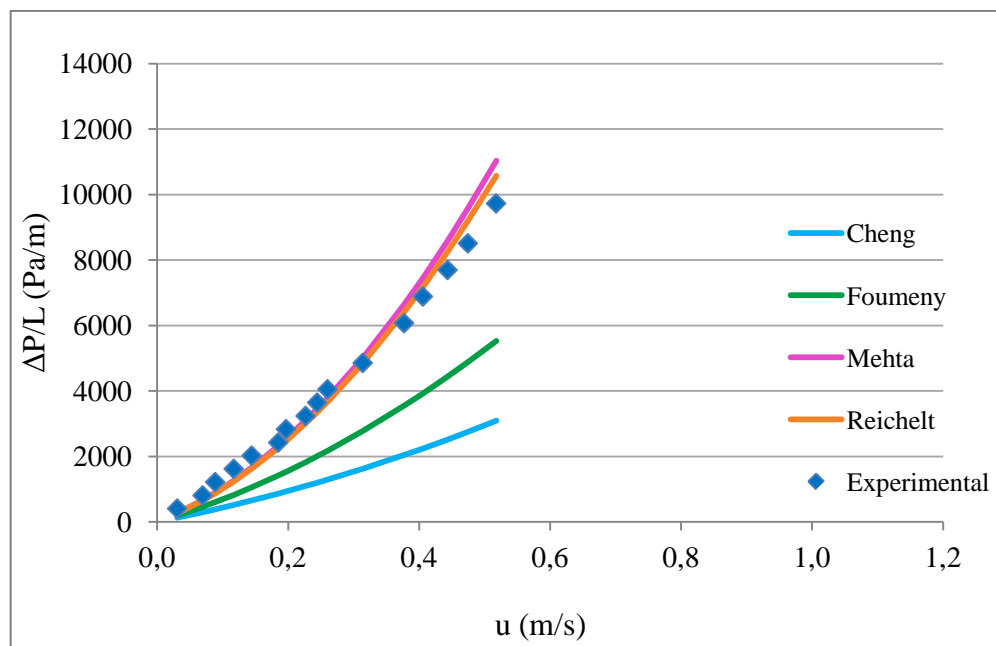


Figura 26 - Dados experimentais e modelos da literatura, leito composto por partículas  $f_7$  e coluna de 0,0173 m de diâmetro.

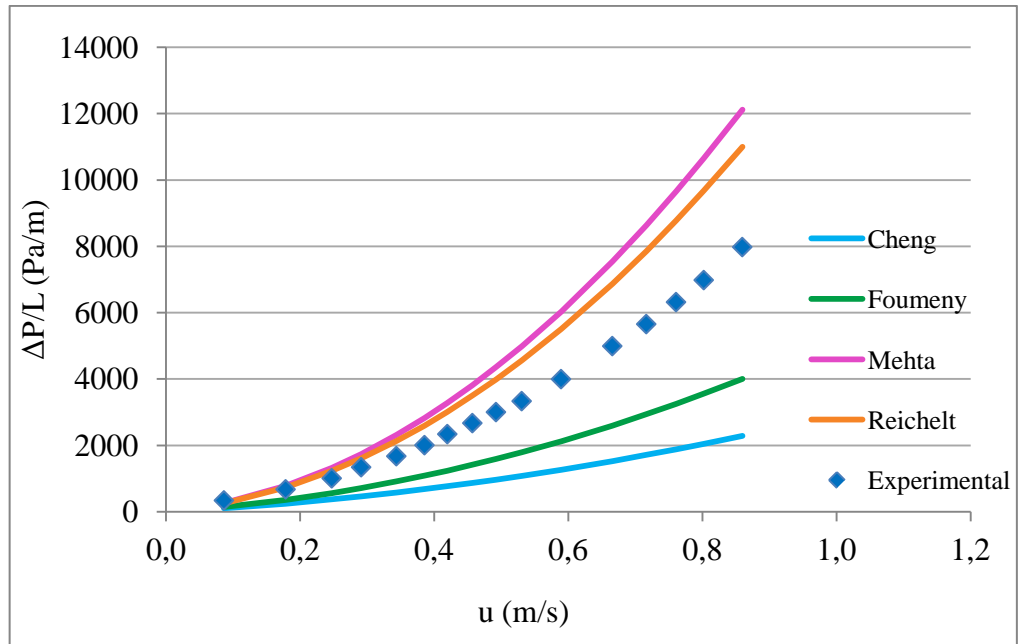


Figura 27 - Dados experimentais e modelos da literatura, leito composto por partículas  $f_3$  e coluna de 0,0246 m de diâmetro.

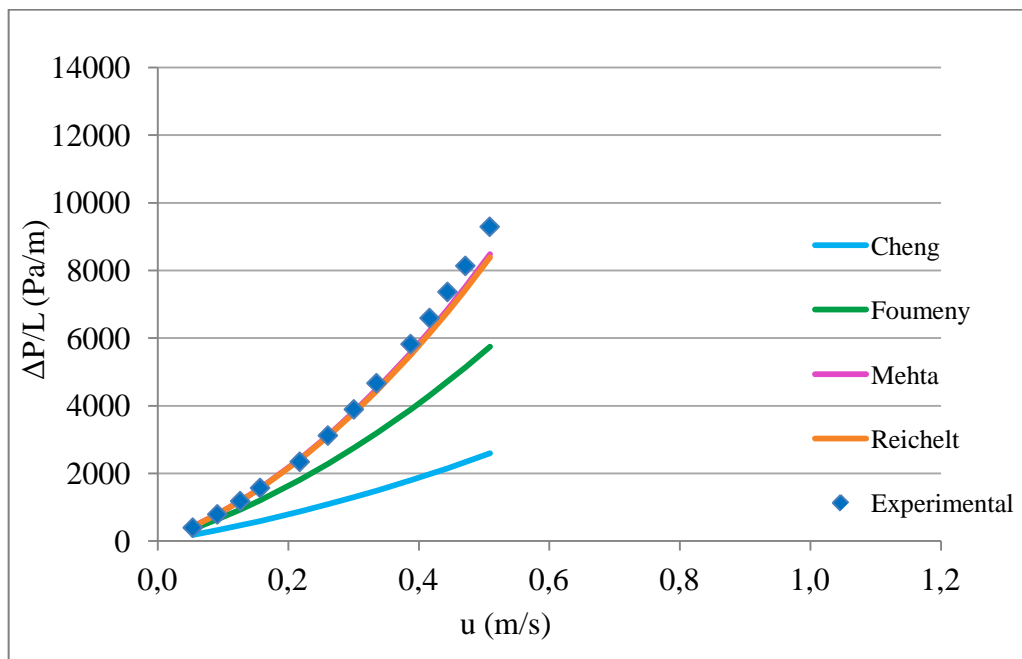


Figura 28 - Dados experimentais e modelos da literatura, leito composto por partículas  $f_6$  e coluna de 0,0354 m de diâmetro.

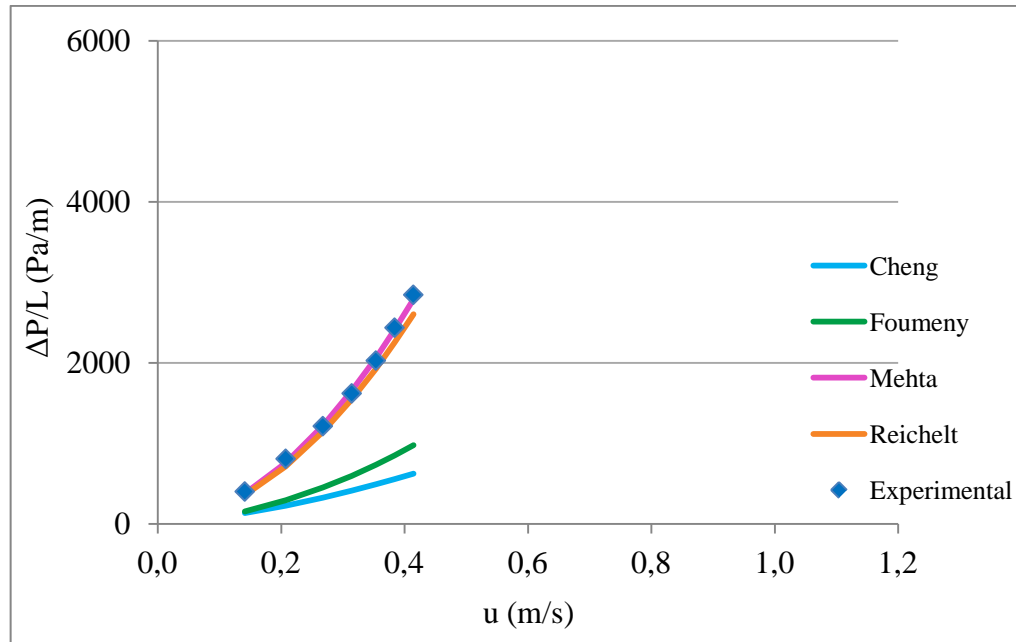


Figura 29 - Dados experimentais e modelos da literatura, leito composto por partículas  $f_1$  e coluna de 0,0470 m de diâmetro.

Comparando com os modelos da literatura, o modelo de Cheng não representa uma forma adequada para o efeito de parede. O modelo de Foumeny é adequado para partículas menores e colunas maiores, ou, conforme os resultados pode-se verificar que o método de Cheng (2011) não representa uma forma adequada para o efeito de parede. Já o modelo de Foumeny et al. (1993) é adequado para partículas menores e colunas maiores, ou seja, onde o efeito de parede é menor. Metha et al. (1969) e de Reichelt (1972) apresentam resultados semelhantes e, de forma geral, representam bem o efeito de parede para partículas irregulares. Desse modo, o método de Reichelt (1972) tem o melhor resultado, uma vez que, o procedimento de Metha et al. (1969) apresenta uma tendência de sobreestimar a perda de carga para partículas maiores em colunas menores, ou seja, quando o efeito de parede é mais acentuado.

Assim, para a modelagem foram adaptados os valores de A e B, de forma que com o novo ajuste possa representar as partículas em estudo. Utilizando o método de minimização de resíduos, foi encontrado o valor de A igual a 433. Para a constante B, representado por Reichelt (1972) na equação 2.15 houve uma adaptação na segunda parte da mesma considerando que para a faixa estimada sem o efeito de parede (0,0128 m - 0,00256 m), por exemplo, o diâmetro da coluna é muito maior que o diâmetro da partícula  $D \gg d_p$ , e com isso,

o primeiro termo da equação torna-se insignificante resultando o termo B igual à constante do modelo de Ergun. Por outro lado, a intervalos que apresentam efeito de parede, para o valor da função de B adaptado sem o efeito de parede é esperado para ser encontrada. Neste caso, o valor admitido foi 4,0, valor utilizado por MacDonald para partículas rugosas.

## 5.6 Modelagem do Sistema com Efeito de Parede

O modelo original de Reichelt (1972) considera a correção do efeito de parede aplicada apenas à constante B. Ele pode ser expresso pelas equações:

$$A_w = 150 \quad (5.1)$$

$$B_w = \left[ \frac{1,5}{(D/dp)^2} + \frac{1}{(B^2)} \right]^{-2} \quad (5.2)$$

Neste modelo, observa-se que a constante  $A_w$  é igual a constante de Ergun (1952). Para o presente trabalho, uma vez que a constante original de Ergun (1952), não representa bem o sistema específico de partículas, o valor de  $A_w$  foi tomado como o valor da constante do termo viscoso do modelo de perda de carga, mostrado na Tabela 11. Da mesma forma, observa-se que, para um sistema onde o efeito de parede torna-se desprezível, o valor de  $B_w$  no modelo de Reichelt (1972), equação 2.15, tende a 1,29. O valor da constante B do modelo de perda de carga para o sistema em estudo foi tomado como 4,0 para ausência do efeito de parede. Assim, o modelo de Reichelt (1972) foi adaptado para tender a este valor quando o efeito de parede tornar-se desprezível. O modelo de Reichelt (1972) adaptado, utilizado neste trabalho toma a forma:

$$A_w = 433 \quad (5.3)$$

$$B_w = \left[ \frac{1,5}{(D/dp)^2} + 0,50 \right]^{-2} \quad (5.4)$$

Para melhor adequar a equação de Ergun para o sistema utilizado, foi ajustado um novo valor da constante apresentado na Tabela 11, que fosse normalizado para qualquer diâmetro da partícula a ser analisado. Com isso, foi adaptado o primeiro termo da equação, mantendo o valor da constante de MacDonald no segundo termo da equação.

Tabela 11 – Valores ajustados para a constante A da equação de Ergun

A	B
433	4,0

Fonte: O autor (2012)

Assim, com o valor da constante de A ajustada, foram obtidos gráficos comparando os dados experimentais, os dados ajustados com o modelo de Ergun (1952) e MacDonald (1979) nas Figuras 30 a 33.

Aplicando os modelos matemáticos da literatura, optou-se pelo ajuste das equações de Ergun (1952) e MacDonald (1979), pois tais equações com os valores originais das constantes apresentaram um bom resultado. A equação de MacDonald (1979) apresentou bons resultados, mas por ter a mesma forma funcional do modelo de Ergun (1952), este foi escolhido pelo ajuste das constantes.

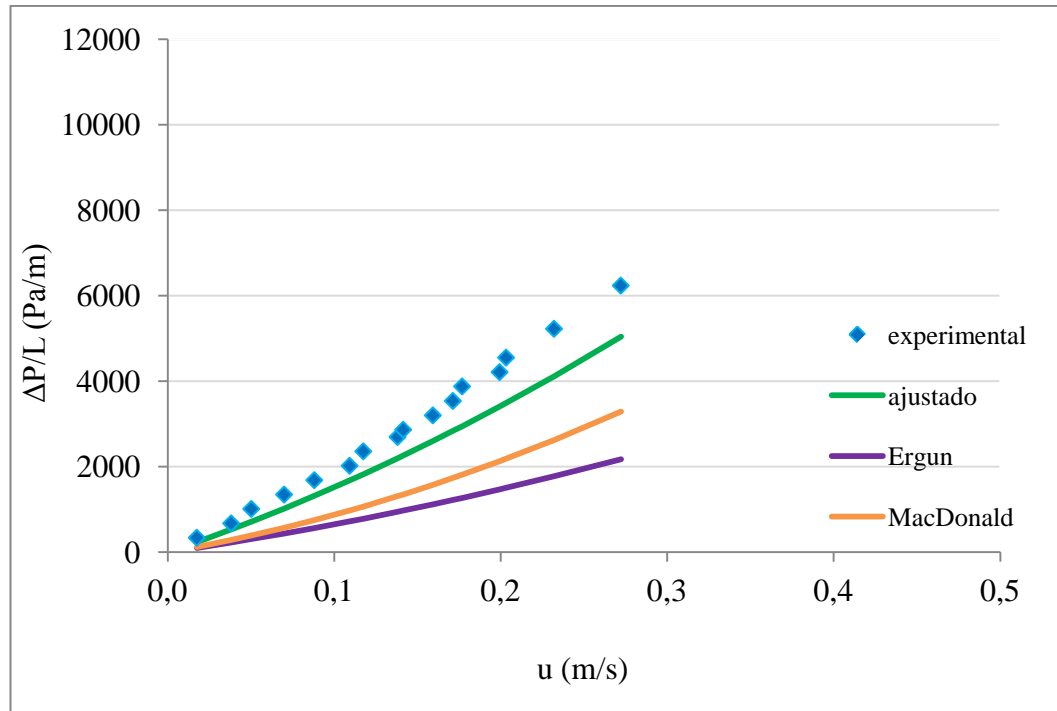


Figura 30 – Relação entre a perda de carga e velocidade da partícula  $f_8$  para o diâmetro da coluna 0,0173 m.

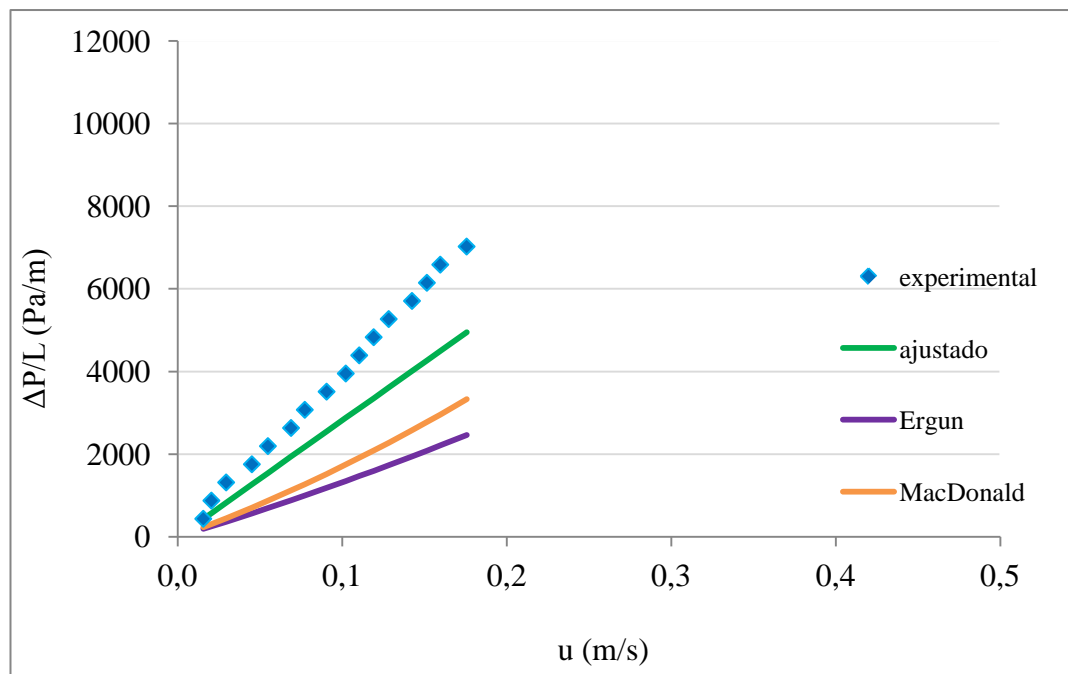


Figura 31 – Relação entre a perda de carga e velocidade da partícula  $f_9$  para o diâmetro da coluna 0,0246 m.

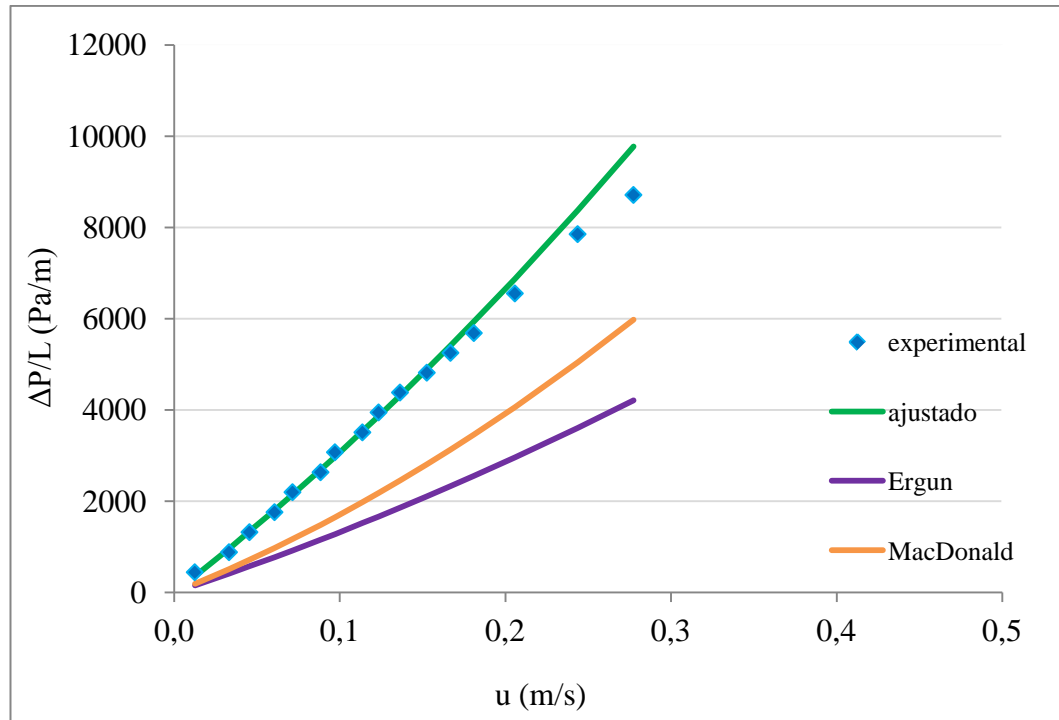


Figura 32 – Relação entre a perda de carga e velocidade da partícula  $f_9$ , para o diâmetro da coluna 0,0354 m.

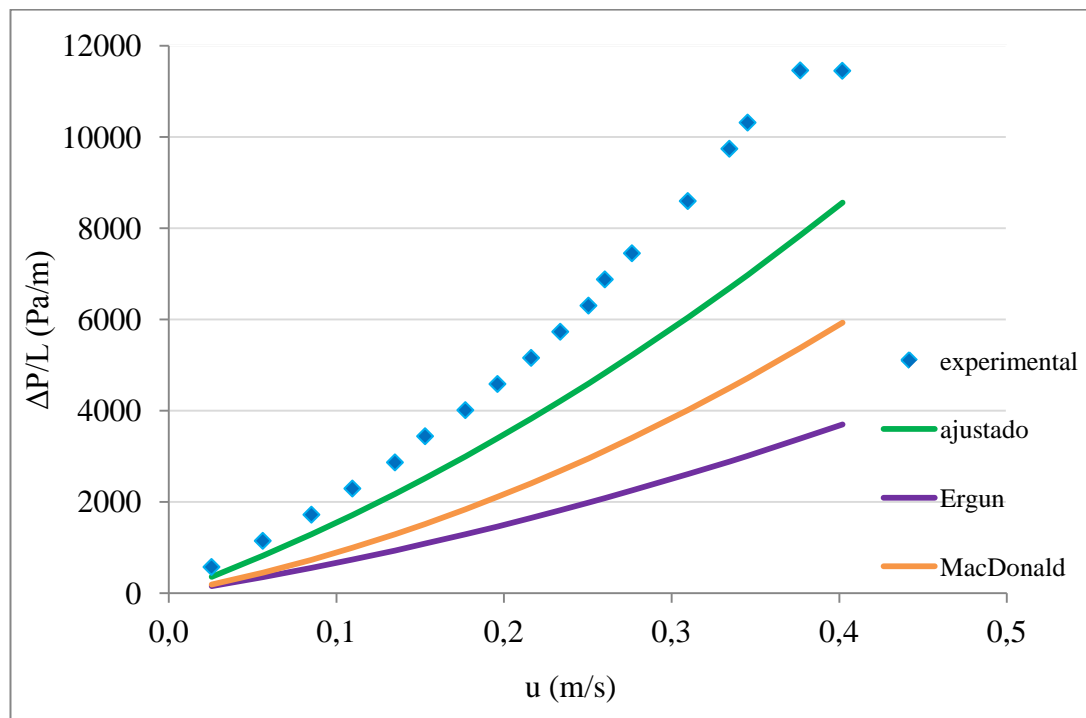


Figura 33 – Relação entre a perda de carga e velocidade da partícula  $f_8$ , para o diâmetro da coluna 0,0470 m.

Da mesma forma, o modelo de Foumeny et al. (1993), equações 2.18 e 2.19, também foi adaptado. Para o termo da constante A também foi considerado o valor ajustado de 433, uma vez que representa o ajuste de todas as faixas trabalhadas. Para o termo cinético da equação foi utilizado o valor de 4,0 para a constante B (Tabela 11). Dessa forma, o modelo fica igual ao modelo original de Foumeny et al. (1993), como mostrado nas equações 2.18 e 2.19, com os valores de A e B apresentados na Tabela 11. O valor de M é calculado de acordo com a equação 2.12.

$$A_w = \frac{A}{M^2} \quad (5.5)$$

$$B_w = \frac{D/d}{2,28 + (1/B)(D/d)} \frac{1}{M} \quad (5.6)$$

Seguindo a mesma abordagem, as equações de Einfeld e Schnitzlein (2001), equações (2.14) e (2.15) também foram adaptadas. O valor de  $A_w$  foi assumido como sendo de A ajustada (Tabela 11), e o modelo de  $B_w$  foi adaptado de forma a convergir para o valor de B, quando o efeito de parede torna-se desprezível.

$$A_w = 433 \quad (5.7)$$

$$B_w = \left[ \frac{1,15}{(D/dp)^2} + 0,5 \right]^{-2} \quad (5.8)$$

De forma a comparar a capacidade dos modelos adaptados representando o efeito de parede, as Figuras 34 a 41 representam os gráficos a partir das novas equações modeladas, comparando os modelos teóricos com os novos modelos através dos dados experimentais.

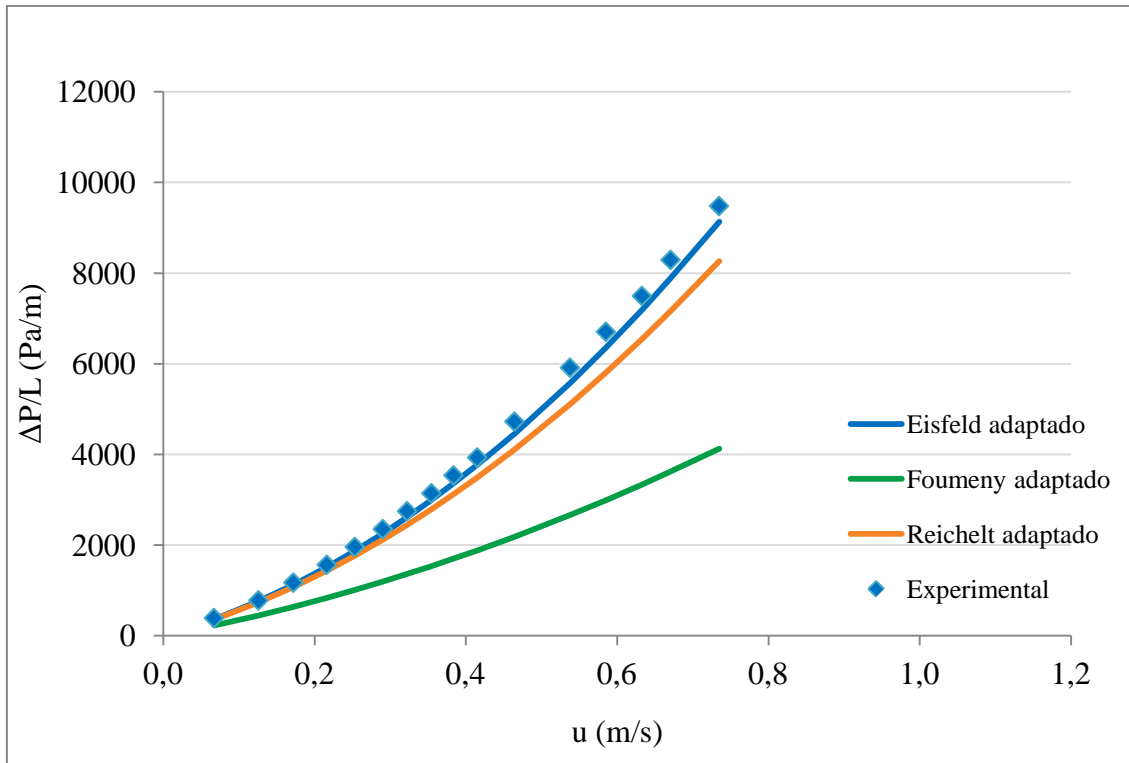


Figura 34: Modelagem do efeito de parede: partículas de faixa  $f_3$ , colunas de 0,0173 m, relação de  $D/d_p = 6,1$ .

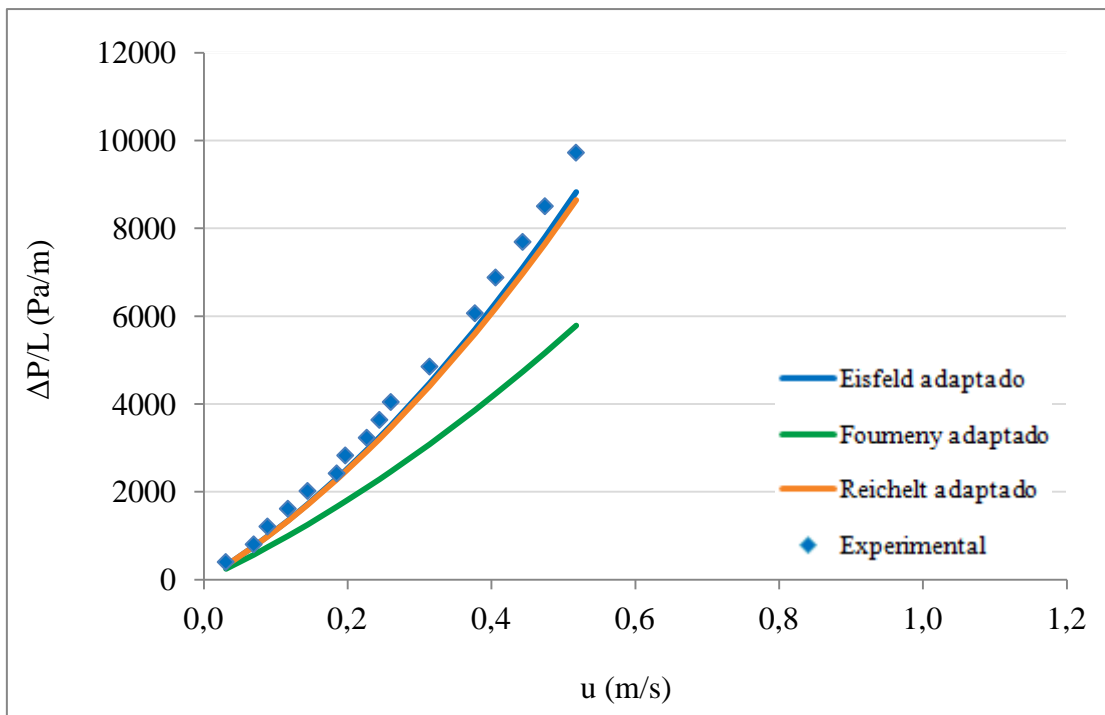


Figura 35: Modelagem do efeito de parede: partículas de faixa  $f_7$ , coluna de 0,0173 m, relação de  $D/d_p = 11,1$ .

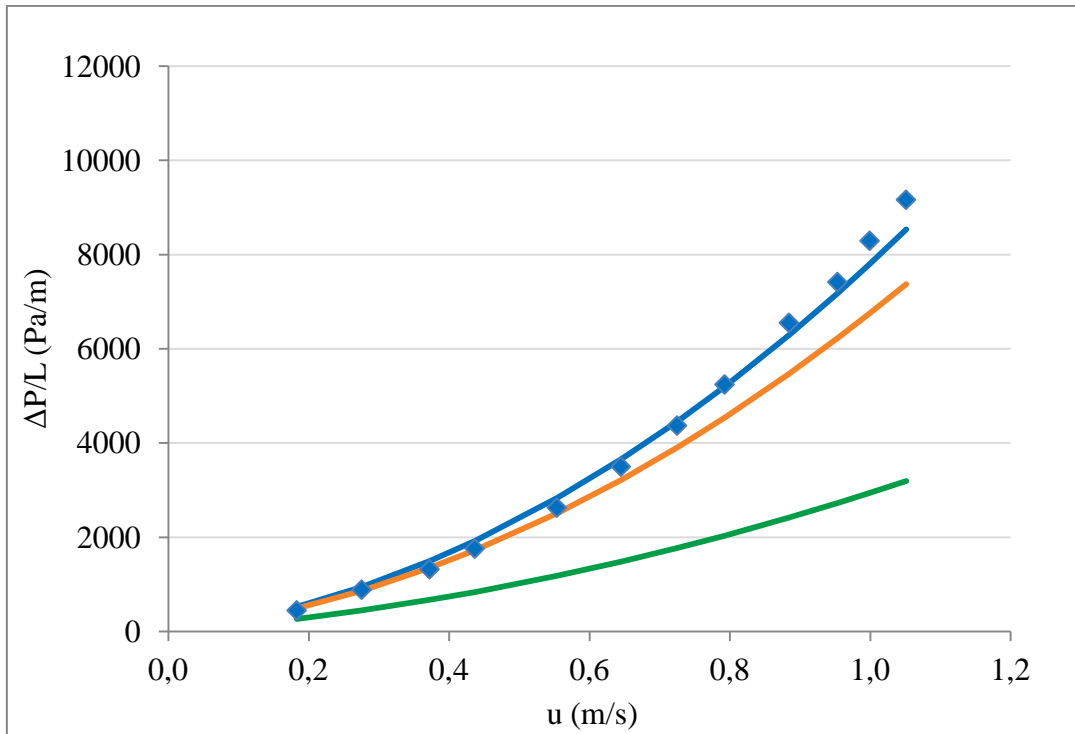


Figura 36: Modelagem do efeito de parede: partículas de faixa  $f_1$ , colunas de 0,0246 m, relação de  $D/d_p = 5,6$ .

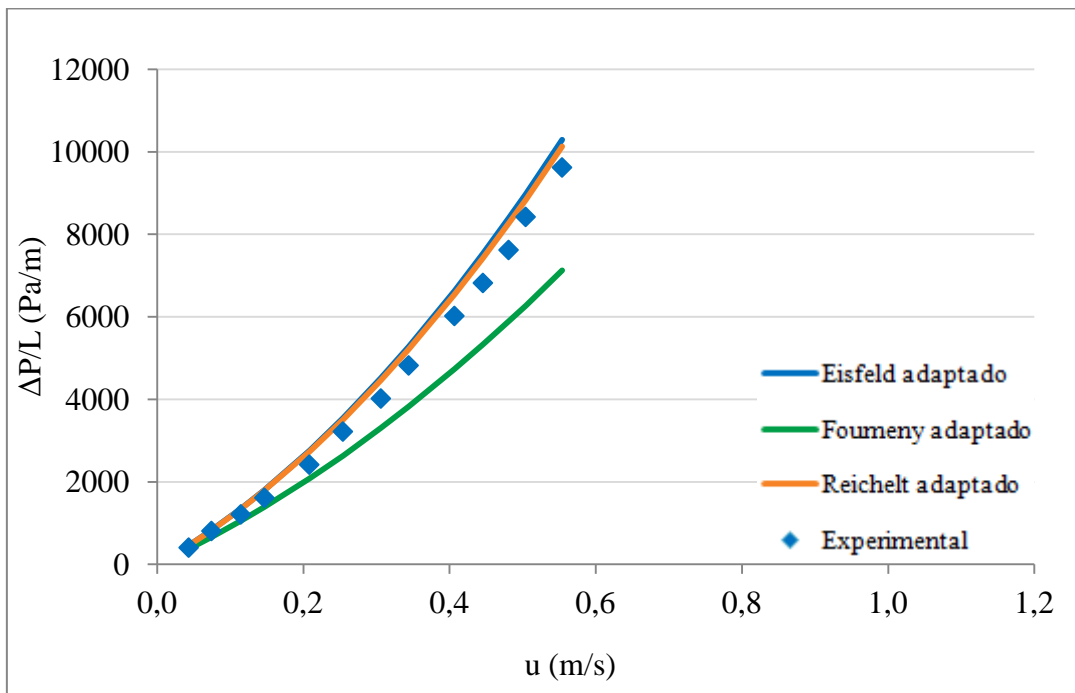


Figura 37: Modelagem do efeito de parede: partículas de faixa  $f_6$ , colunas de 0,0246 m, relação de  $D/d_p = 13,3$ .

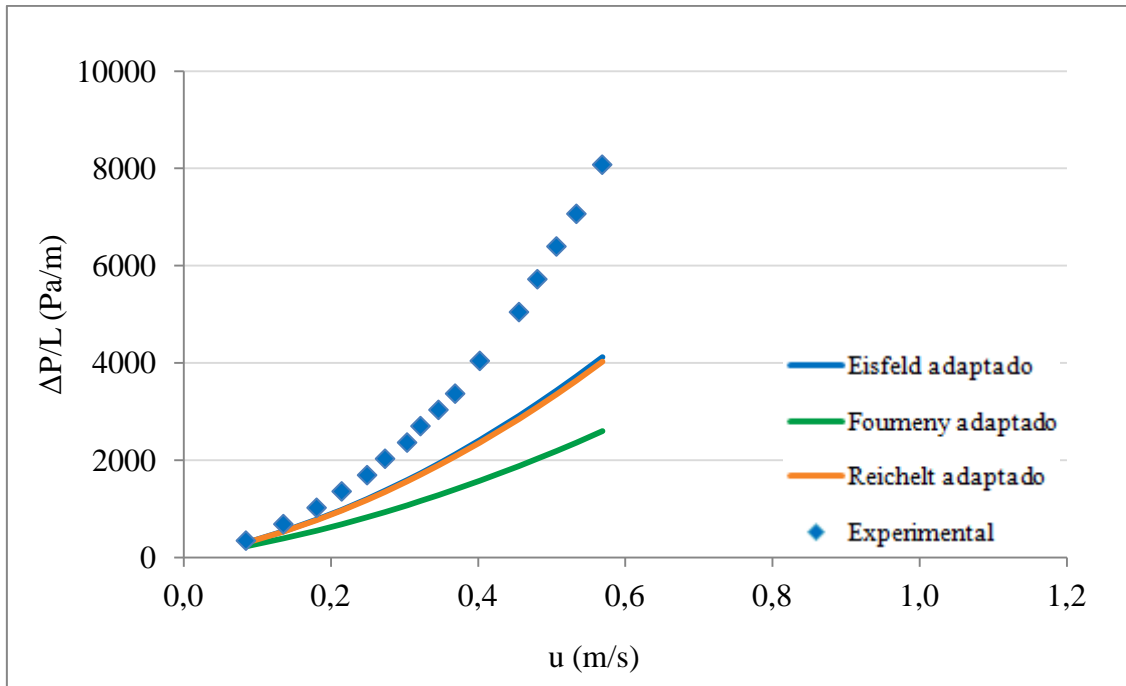


Figura 38: Modelagem do efeito de parede: partículas de faixa  $f_3$ , coluna de 0,0354 m, relação de  $D/d_p=12,3$ .

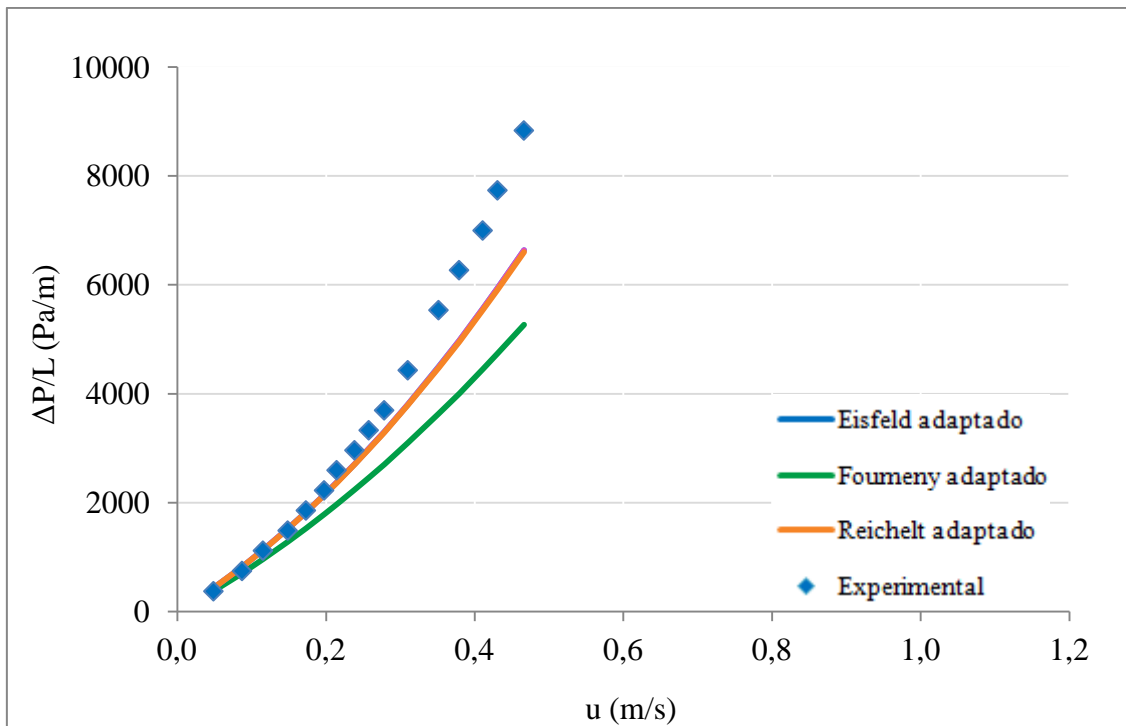


Figura 39: Modelagem do efeito de parede: partículas de faixa  $f_7$ , coluna de 0,0354 m, relação de  $D/d_p=22,3$ .

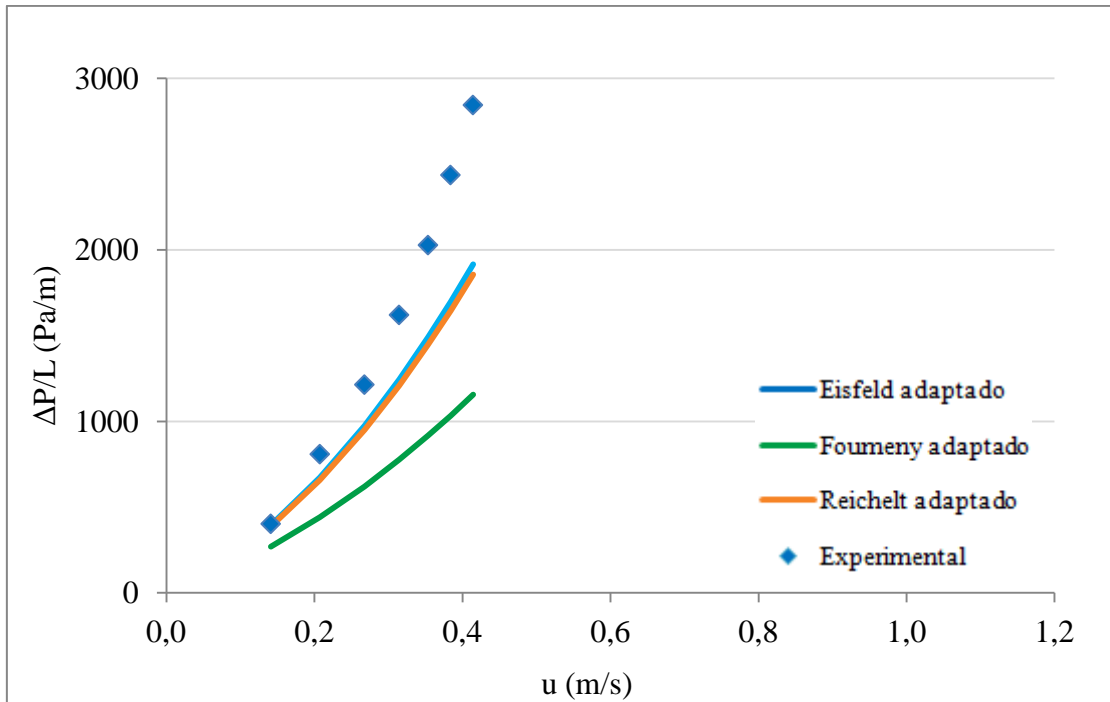


Figura 40: Modelagem do efeito de parede: partículas de faixa  $f_1$ , colunas de 0,0470 m, relação de  $D/d_p = 10,7$ .

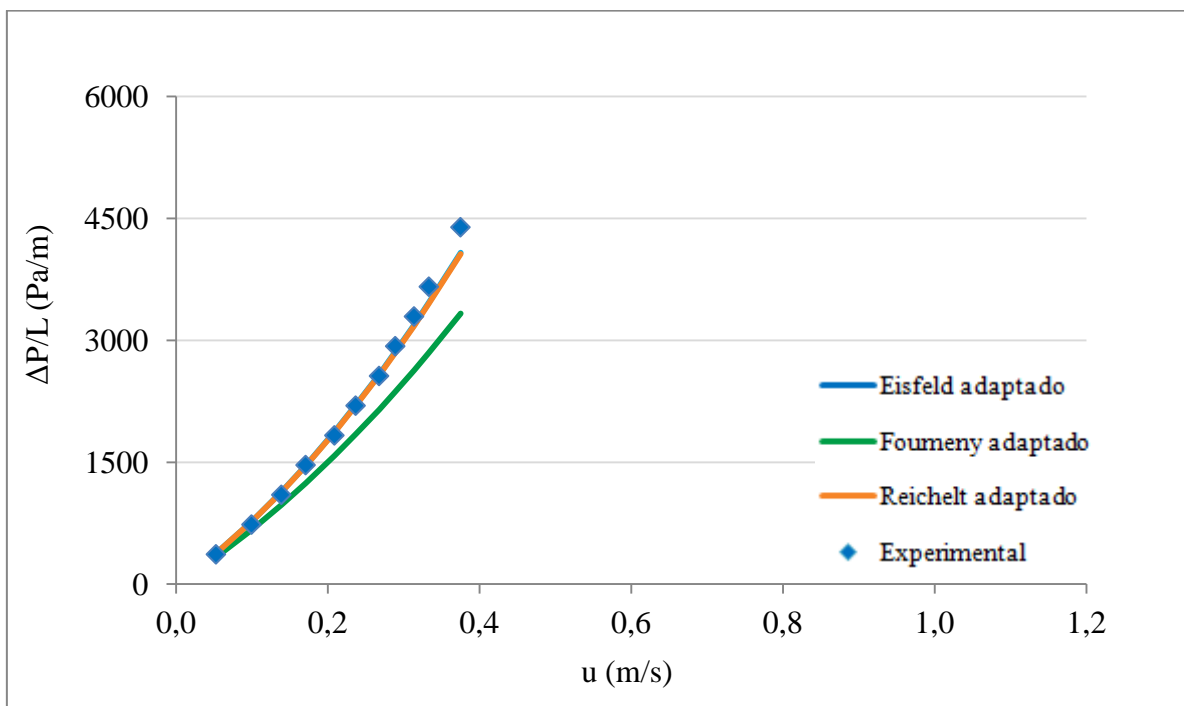


Figura 41: Modelagem do efeito de parede: partículas de faixa  $f_6$ , colunas de 0,0470 m, relação de  $D/d_p = 25,4$ .

Pode-se analisar que, para colunas menores, há uma melhor adaptação com os dados experimentais em relação ao efeito de parede. Sendo o efeito de parede a representação da presença de parede e influência sobre o movimento da partícula, entre os gráficos apresentados, o que melhor explica o conceito é os gráficos de número 34 e 36, pelo fato de quanto menor a relação de  $D/d_p$ , menor será o efeito de parede e mais livremente a partícula cai na coluna.

A partir da análise das figuras é possível notar que o melhor modelo foi o de Reichelt (1972) modificado, o que apresenta maior proximidade com os dados experimentais. Assim, as Figuras 42 a 45 ilustram os gráficos obtidos da relação dos dados experimentais em comparação com o modelo de Reichelt (1972) adaptado.

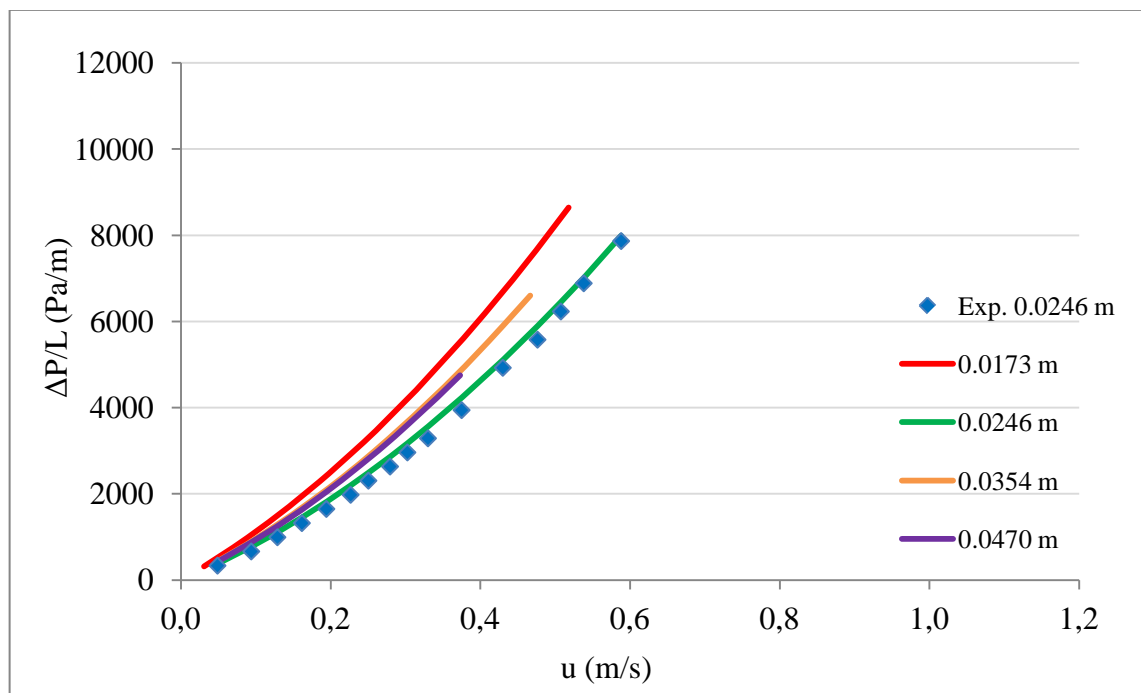


Figura 42: Curvas do modelo de Reichelt (1972) adaptado, aplicado para amostra  $f_7$  em função do diâmetro da coluna.

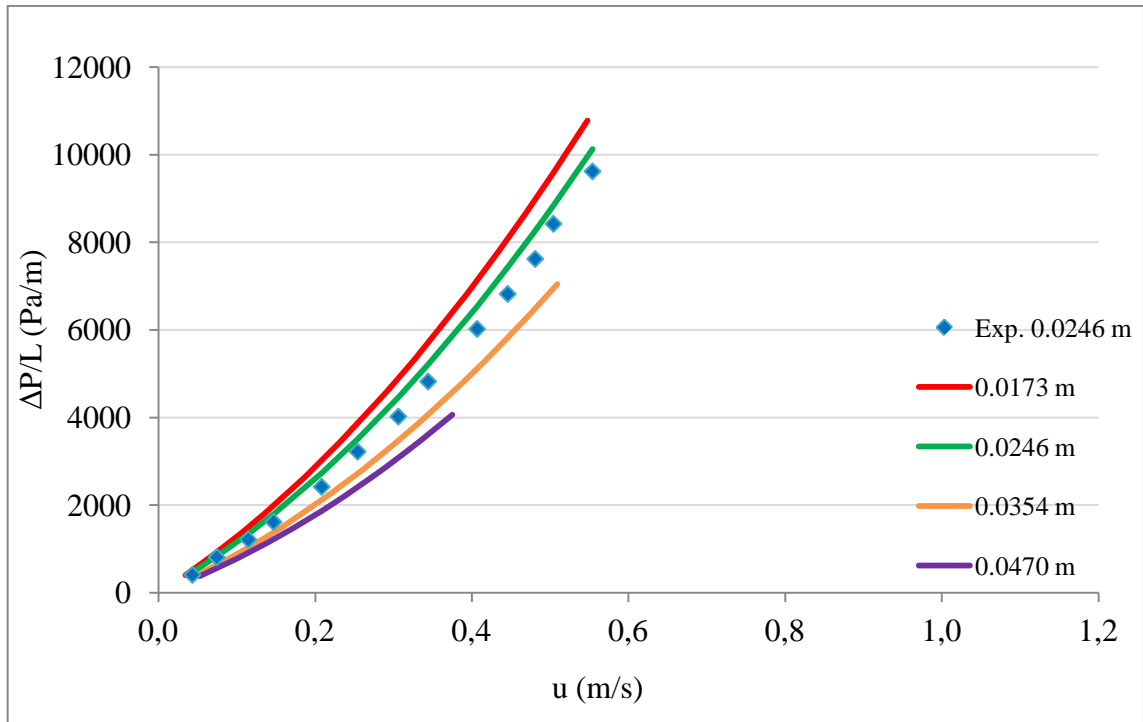


Figura 43: Curvas do modelo de Reichelt (1972) adaptado, aplicado para amostra  $f_6$  em função do diâmetro da coluna.

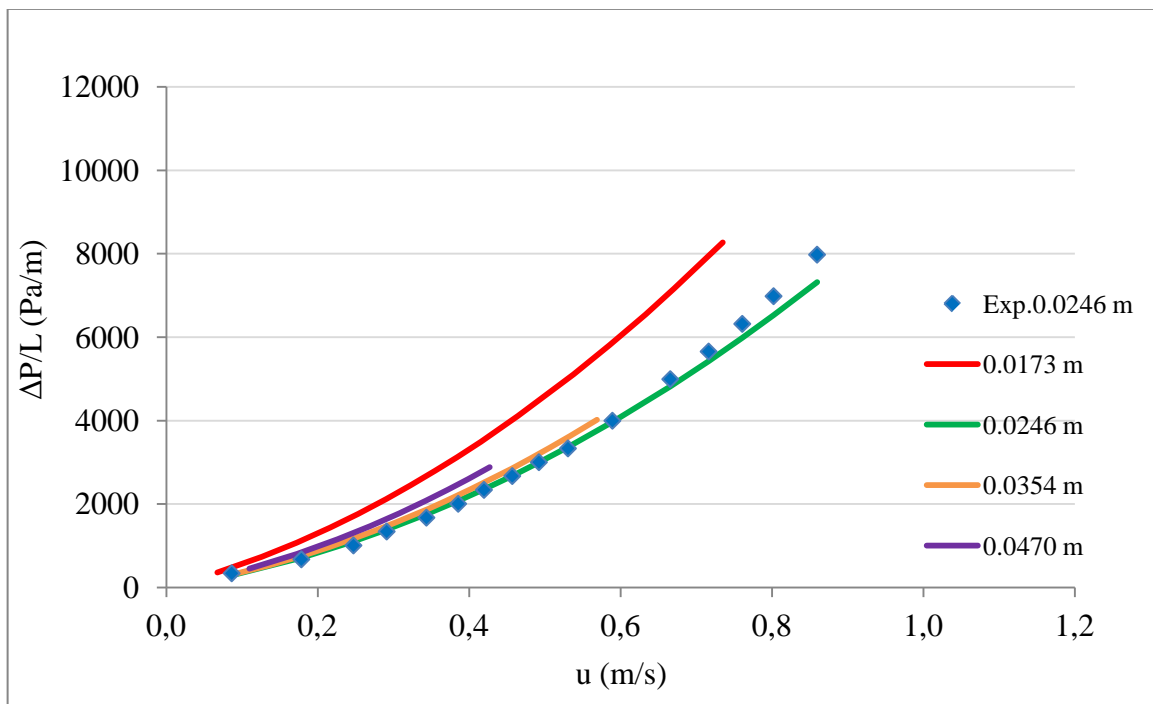


Figura 44: Curvas do modelo de Reichelt (1972) adaptado, aplicado para amostra  $f_3$  em função do diâmetro da coluna.

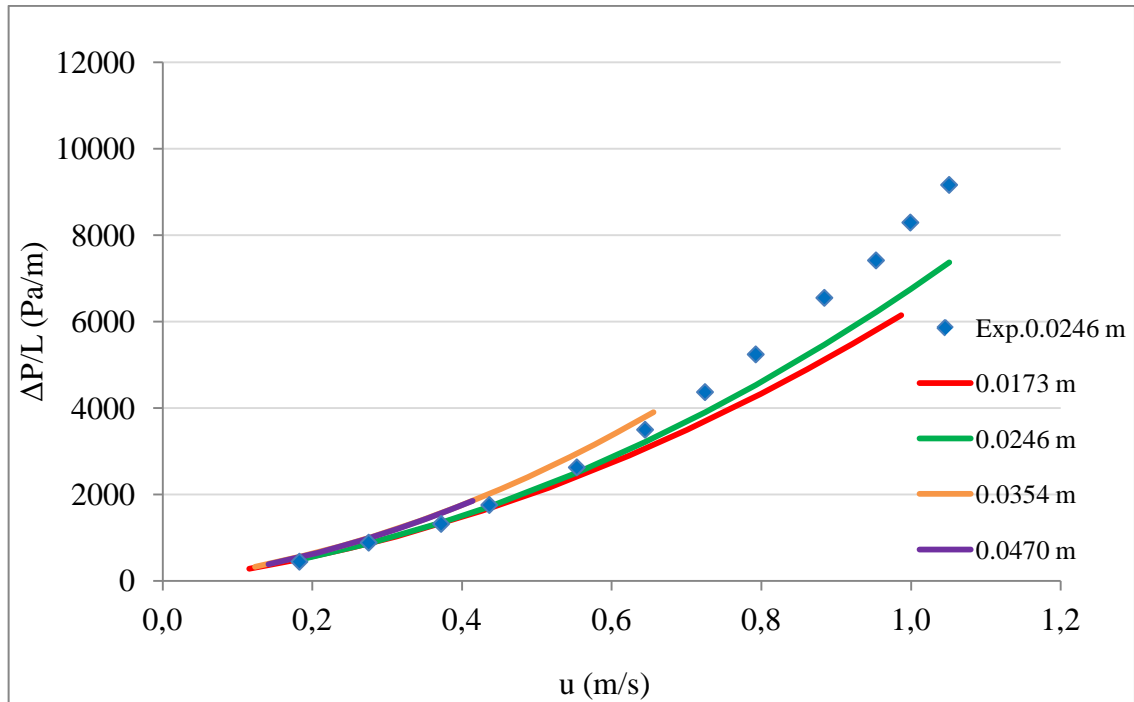


Figura 45: Curvas do modelo de Reichelt (1972) adaptado, aplicado para amostra  $f_1$  em função do diâmetro da coluna.

### 5.7 Comportamento do Sistema através da análise da equação de Ergun

Considerando o estudo para Reynolds menor que 10 ( $Re < 10$ ) considera-se o regime laminar, Reynolds entre 10 e 300 ( $10 < Re < 300$ ) regime transiente e Reynolds maior que 300 ( $Re > 300$ ) regime turbulento, (Ziólkowska *et al.*, 1988) neste estudo, a pesquisa se enquadra no regime laminar iniciando no fluxo intermediário.

Pode-se observar nas Figuras 30 a 33 que a perda de carga experimental é maior comparada aos modelos. A representação dos dados experimentais utilizando uma equação tipo de Ergun é possível ajustando-se os parâmetros A e B deste modelo para o sistema específico. O parâmetro A representa a perda de carga devido à energia viscosa, predominante em baixas velocidades, enquanto B representa a perda de carga devido às forças cinéticas, mais significativo a altas velocidades. Calculou-se o valor de Reynolds para caracterizar o regime de escoamento, valores mostrados na Tabela 12.

Através dos valores obtidos dos dados experimentais, foram construídos gráficos a fim de observar o comportamento do sistema para algumas faixas granulométricas relacionando o

número de Reynolds com a variação da perda de carga. Os valores estão apresentados nas Figuras 46 a 49.

Tabela 12 – Limites inferior e superior relacionando o número de Reynolds para os testes realizados

	D <sub>c</sub> 0,0173 m		D <sub>c</sub> 0,0246 m		D <sub>c</sub> 0,0354 m		D <sub>c</sub> 0,0470 m					
Faixas												
f <sub>1</sub>	34,5	–	294,9	54,6	–	314,0	36,8	–	195,7	42,3	–	124,2
f <sub>2</sub>	24,9	–	240,1	36,3	–	263,3	26,0	–	152,1	32,1	–	107,9
f <sub>3</sub>	13,2	–	144,6	17,0	–	169,4	16,6	–	111,4	21,6	–	84,1
f <sub>4</sub>	8,8	–	119,1	9,3	–	134,4	14,1	–	106,8	11,0	–	65,3
f <sub>5</sub>	5,5	–	94,3	11,0	–	114,5	9,6	–	84,5	9,5	–	57,2
f <sub>6</sub>	4,3	–	68,6	5,5	–	69,8	6,8	–	64,2	6,7	–	47,4
f <sub>7</sub>	3,3	–	55,4	5,3	–	63,6	5,2	–	50,2	5,2	–	41,7
f <sub>8</sub>	1,5	–	23,5	4,2	–	40,9	2,1	–	23,9	3,4	–	32,4
f <sub>9</sub>	0,6	–	8,2	0,76	–	8,6	0,6	–	13,6	0,9	–	17,4
f <sub>10</sub>	0,2	–	3,6	0,59	–	4,7	0,4	–	6,5	0,4	–	5,9
f <sub>11</sub>	0,1	–	1,7	0,2	–	1,6	0,1	–	1,8	0,1	–	1,7
f <sub>12</sub>	0,1	–	0,5	0,1	–	1,0	0,1	–	0,5	-		-

Fonte: O autor (2012)

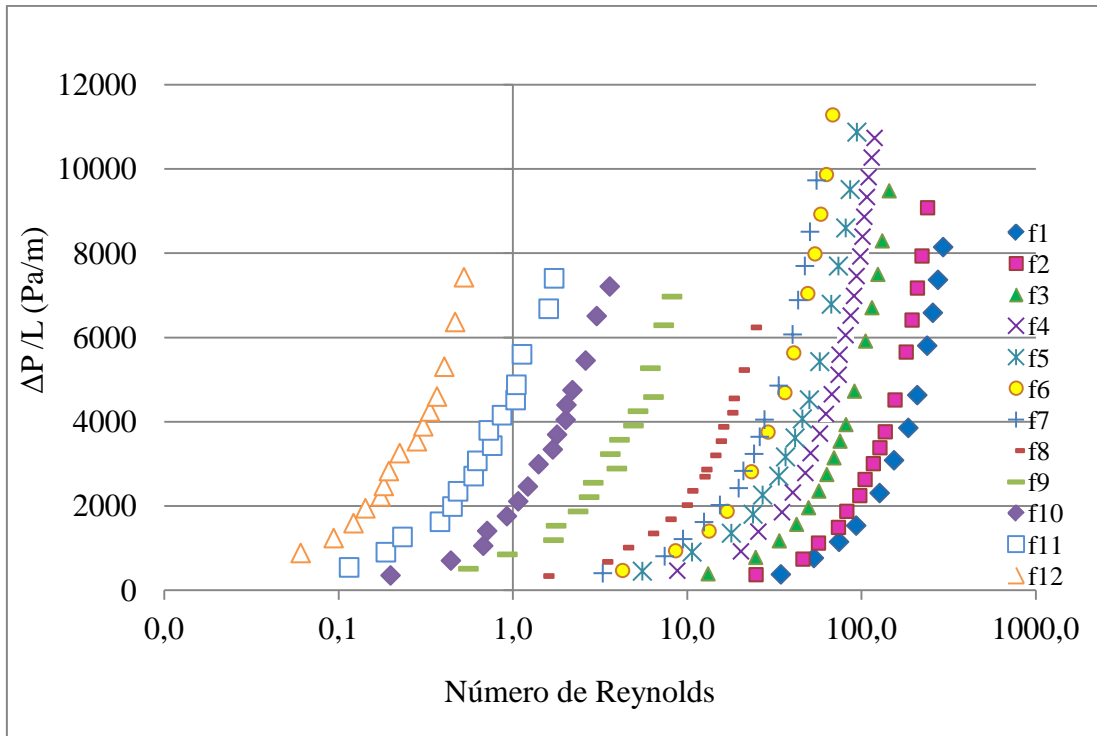


Figura 46 – Relação entre a perda de carga e o número de Reynolds para o diâmetro da coluna 0,0173 m.

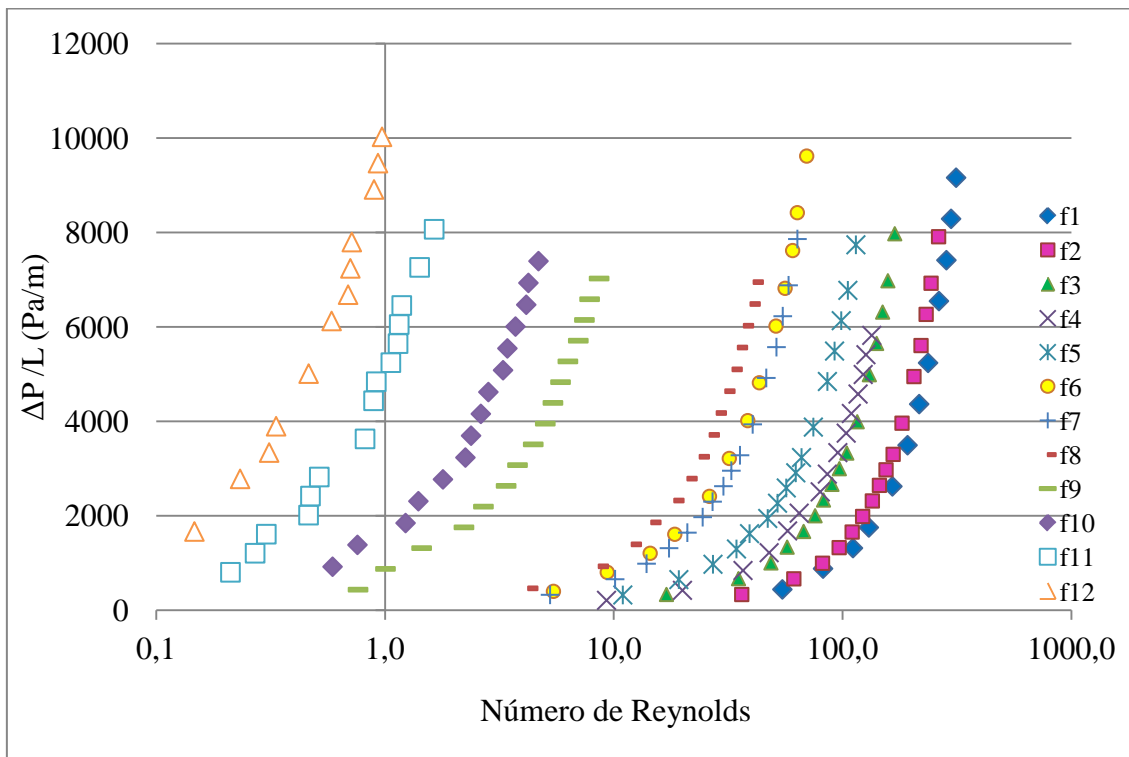


Figura 47 – Relação entre a perda de carga e o número de Reynolds para o diâmetro da coluna 0,0246 m.

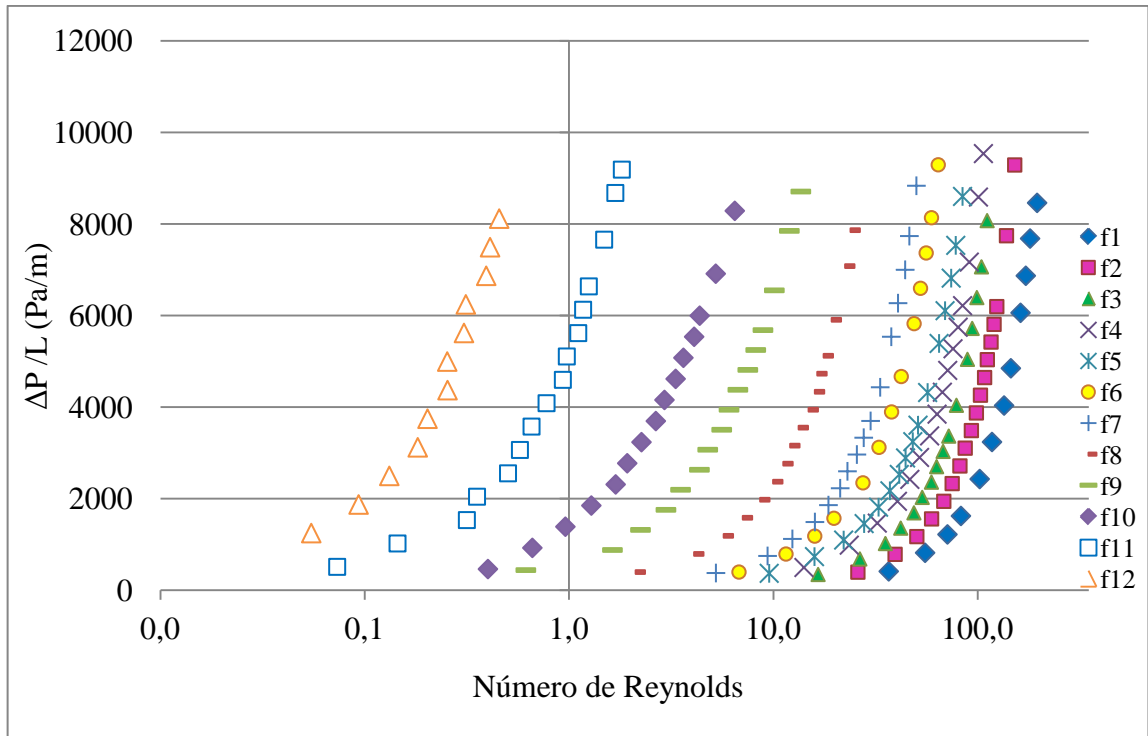


Figura 48 – Relação entre a perda de carga e o número de Reynolds para o diâmetro da coluna 0,0354 m.

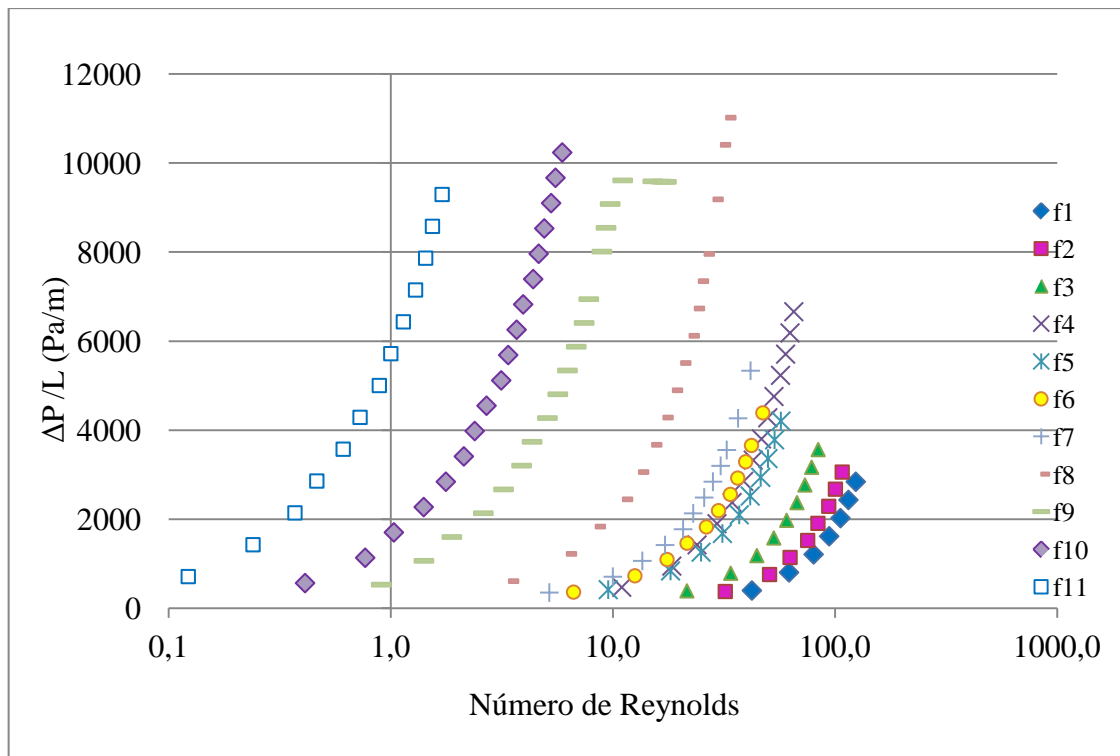


Figura 49 – Relação entre a perda de carga e o número de Reynolds para o diâmetro da coluna 0,0470 m.

Estas relações apresentadas graficamente nas figuras 46 a 49 são semelhantes às apresentadas por Foumeny (1996) em seu trabalho. Das figuras, pode-se observar que a perda de carga aumenta com o número de Reynolds de uma forma semelhante à prevista pelo modelo de Ergun (1952). A influência do diâmetro médio da faixa é muito marcante, sendo que partículas menores que faixas vizinhas exibem uma influência maior que partículas maiores das faixas vizinhas.

Depois de ajustada a constante de Ergun  $A$  normalizada, foi feito o gráfico com desvio dos dados experimentais pelo maior valor obtido. Essa comparação está indicada na Figura 50, em que as linhas pontilhadas correspondem a um desvio de  $\pm 20\%$ .

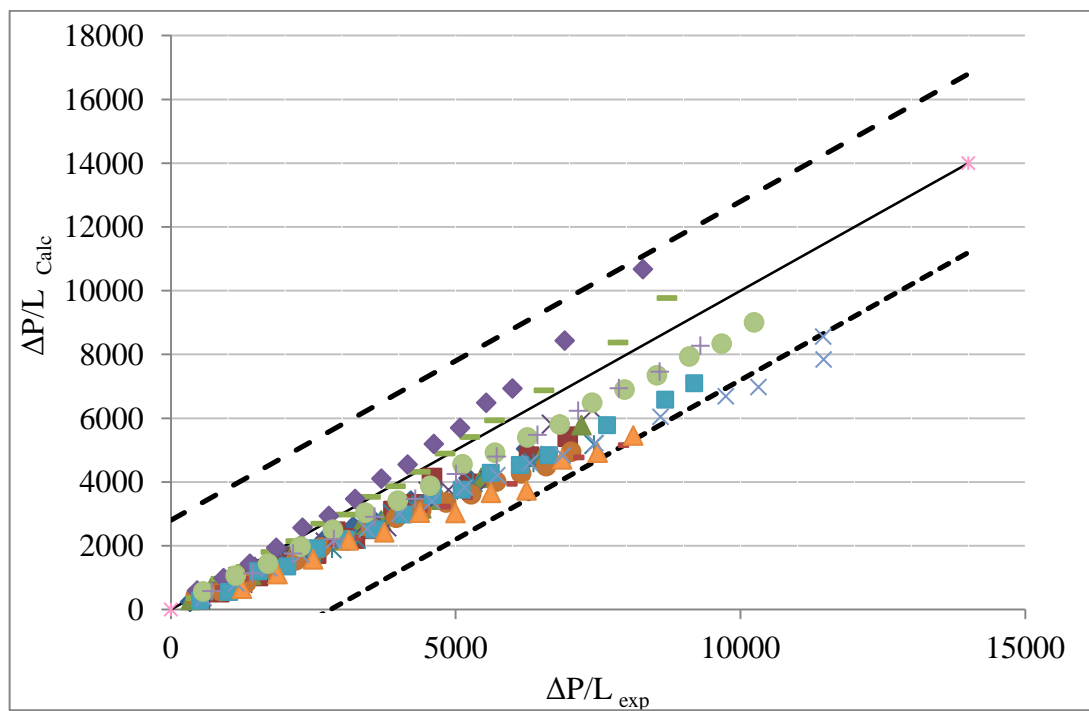


Figura 50 – Comparação entre os dados experimentais e da Equação de Ergun com a constante  $A$  ajustada.

## 6. CONCLUSÃO

Para um preciso estudo do leito é de fundamental importância conhecer as especificações da partícula em questão. Os dados de suma importância são o diâmetro, a esfericidade e a porosidade do leito.

Finalizado a preparação das amostras de xisto, Calcularam-se os valores de porosidade para todas as faixas granulométricas. Os resultados obtidos são numericamente parecidos e indiferentes da distribuição de tamanhos escolhidos.

Em virtude da irregularidade superficial das partículas do sistema em questão, é de suma importância conhecer a esfericidade do mesmo visando prever o comportamento do sistema.

Para cada sistema em questão faz-se necessário o ajuste das constantes. Optou-se pela Equação de Ergun com as constantes ajustadas para ajustar as misturas por apresentar a melhor capacidade de reproduzir os dados experimentais para as frações puras.

Partindo do leito fixo e aumentando a velocidade do gás observa-se inicialmente uma leve expansão do leito, seguida do regime borbulhante, ou seja, com a movimentação do sólido mais dinâmico e após pelo regime pistonado que segue de aumento de maior da vazão de ar, sendo possível o xisto atingir até o topo da coluna. Observa-se que o sinal de pressão, na fluidização, fica constante, porém esse valor é difícil de ser determinado devido às oscilações da pressão no regime empistonado.

A queda de pressão no leito fixo é maior para as partículas menores, o que resulta em menores velocidades de mínima fluidização. Em relação ao diâmetro da coluna, para partículas maiores observa-se o aumento da queda de pressão de gás no leito para a coluna de menor diâmetro, o que leva a uma diminuição da velocidade de mínima fluidização em relação à coluna de 0,0246 m. As diferenças entre os valores encontrados para as velocidades de mínima fluidização, em função do diâmetro da coluna, indicam uma provável influência na porosidade do leito fixo e na determinação do tipo de fluidização borbulhante ou pistonada.

O modelo proposto pode ser utilizado para a validação de modelos matemáticos uma vez que, o modelo de Ergun é o mais aceito para previsão de queda de pressão em leitos fixos com variados tamanhos de partículas sejam uniformes ou não uniformes.

## **6.1 SUGESTÕES FUTURAS**

- Utilizar o mesmo método trabalhando com mistura de biomassa e areia;
- Comparar as velocidades de mínima fluidização com os modelos da literatura;
- Estudar o efeito de largura e trabalhar com mistura das faixas granulométricas.

**REFERÊNCIAS**

BASU SUDDHASATWA. Wall effect in laminar flow of non-Newtonian fluid through a packed bed, **Chemical Engineering Journal**, v. 81, p. 323-329, 2001.

BRINES LA.; BRIENS CL.; MARGARITIS A.; HAY J. Minimum liquid fluidization velocity in gas-liquid-solid fluidized beds of low-density particles, **Chemical Engineering Science**, v. 52, p. 4231-4238, 1997.

CAIRNS, E.J.; PRAUSNITZ J.M. E.J.; Prausnitz, J.M. Velocity profiles in packed and fluidized beds, **Industrial and Engineering Chemistry**, v.51, p. 1441–1444, 1959.

ÇARPINLIOĞLU M.Ö.; ÖZAHİ E. A simplified correlation for fixed bed pressure drop, **Powder Technology**, v.187, p. 94–101, 2008.

CHENG NS. Wall effect on pressure drop in packed beds, **Powder Technology**, v. 210, p. 261- 266, 2011.

CHOI, SEOK Y.; KIM, JIN S.; KIM, DUCKJONG. A semi-empirical correlation for pressure drop in packed beds of spherical particles, **Transp. Porous Med.** v.75, p.133-149, 2008.

COULSON J.M.; RICHARDSON, J.F. Tecnologia Química, Operações Unitárias. v. II, p.11-12,748-751, 1968.

DE KLERK, A. Voidage variation in packed beds at small column to particle diameter ratios, **AicheE Journal**. v. 49 p. 2022–2029, 2003.

DI FELICE R.; GIBILARO LG. Wall effects for the pressure drop in fixed beds, **Chemical Engineering Science**, v. 59, p. 3037-3040, 2004.

EISFELD B.; SCHNITZLEIN K. The influence of confining walls on the pressure drop in packed beds, **Chemical Engineering Science**, v. 59, p. 4321-4329, 2001.

ERGUN, S. Flow Through Packed Columns. **Chemical Engineering Progress**, v. 48, n.2, p. 89-94, 1952.

FOUMENY E.A., BENYAHIA F., CASTRO J.A.A., MOALLEMI H.A., ROSHANI S. Correlations of pressure-drop in packed-beds taking into account the effect of confining wall, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 36 n.2, p.536–540, 1993.

FREUND, H. et al. Numerical simulations of single phase reacting flows in randomly packed fixed-bed reactors and experimental validation, **Chemical Engineering Science**, Netherlands, v. 58, p. 903-910, 2003.

GELDART, D. Power Processing – The Overall View, In RHODES, M., **Principles of Powder technology**. Ed. John Wiley & Sons Ltd. p. 1-7, 1990.

GAUTHIER D.; ZERGUERRAS S.; FLAMANT G.; HAY J. Influence of the particle size distribution of powders on the velocities of minimum and complete fluidization, **Chemical Engineering Journal**, v. 74, p. 181-196, 1999.

HLUSHKOU D.; TALLAREK U. Transition from creeping via viscous-inertial to turbulent flow in fixed beds, **Journal of Chromatography A**, v. 1126, p. 70-85, 2006.

HOWARD J.R. Fluidized bed technology Principles and Applications, **Adam Hilger**, Bristol and New York, p. 1-69, 1989.

HUANG Q.; ZHANG H.; ZHU J. Onset of an innovative gasless fluidized bed-comparative study on the fluidization of fine powders in a rotating drum and a traditional fluidized bed, **Chemical Engineering Science**, v. 65, p. 1261-1273, 2010.

KAVECKIJ G.D.; PLANOVSKIJ A.N; Flow study of solids in up flowing gas in packed columns (in Russian), **Khim. Technology. Toplivo Masel**, v. 11, p. 8–12, (1962).

LANFREY P.-Y.; KUZELJEVIC Z.V.; DUDUKOVIC M.P. Tortuosity model for fixed beds randomly packed with identical particles, **Chemical Engineering Science**, v.65, p. 1891-1896, 2010.

MACDONALD, I. F. *et al.* Flow through porous media: the ERGUN equation revisited. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, Washington, v.18 n.3, p. 199-208, 1979.

MALDONADO J.G. *et al.* Effect of solid characteristics on hydrodynamic and mass transfer in a fixed bed reactor operating in co-current gas–liquid up flow, **ScienceDirect**, v.47. p. 1190-1200, 2008.

MAWATARI Y.; TATEMOTO Y.; K.C. NODA K. Prediction of minimum fluidization velocity for vibrated fluidized bed, **Powder Technology**, v. 131, p.66-70, 2002.

MEHTA; DEVENDRA; HAWLEY; MARTIN C. Wall effect in packed columns, **Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development**, v. 8 no 2, p. 280-282, 1969.

MONTILLET A. Flow Through a Finite Packed Bed of Spheres: A Note on the Limit of Applicability of the Forchheimer Type Equation, **Journal of Fluids Engineering**, v. 126, p. 139-143, 2004.

MONTILLET A.; AKKARI E.; COMITI J. About a correlating equation for predicting pressure drops through packed beds of spheres in a large range of Reynolds numbers, **Chemical Engineering and Processing Science**, v. 46, p. 329-333, 2007.

MONTILLET A., LE COQ L. Characteristics of fixed beds packed with anisotropic particles—Use of image analysis, **Powder Technology**, v. 121, p. 138-148, 2001.

MOTTA, E.P. Queda de pressão em um leito de partículas de xisto: Avaliação de modelos de modelos para distribuição granulométrica e diâmetros médios equivalentes, estudo do efeito da altura do leito e avaliação de modelos para predição da queda de pressão. Dissertação de mestrado submetido à Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curitiba, 2009.

NEMEC, D.; LEVEC, J. Flow through packed bed reactors: single-phase flow. **Chemical Engineering Science**, Netherlands, v. 60, p. 6947-6957, 2005.

NIKAČEVIĆ N.M.; PREDOJEVIĆ Z.; PETROVIĆ D.; DUDUKOVIĆ A. Static holdup in Gas – Flowing solids – Fixed bed contactors, **Powder Technology**, v. 191, p. 121-129, 2009.

NODA K.; UCHIDA S.; MAKINO T.; KAMO H. Minimum fluidization Velocity of Binary Mixture of Particles with large Size Ratio, **Powder Technology**, v. 46, p. 149-154, 1986.

PARISE J.A.R.; SODRÉ J.R. Fluid flow pressure drop through an annular bed of spheres with wall effects, **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 17, p. 265-275, 1998.

PAZIN, E. Estudo da perda de carga em um leito de xisto betuminoso composto por partículas de diferentes granulometrias. Dissertação de mestrado submetido à Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curitiba, 2011.

RABINOVICH E.; KALMAN H. Flow regime diagram for vertical pneumatic conveying and fluidized bed systems, **Powder Technology**, v. 207, p.119–133, 2011.

REICHELT W. Calculation of pressure-drop in spherical and cylindrical packings for single-phase flow, **Chemie Ingenieur Technik**, v. 44 (18), p.1068–1071, 1972.

REINA J.; VELO E.; PUIGJNAER L. Predicting the minimum fluidization velocity of polydisperse mixtures of scrap-wood particles, **Powder Technology**, v. 111, p. 245-251, 2000.

SAU D.C.; MOHANTY S.; BISWAL K.C. Minimum fluidization velocities and maximum bed pressure drops for gas–solid tapered fluidized beds, **Chemical Engineering Journal**, v. 132, p. 151-157, 2007.

SINGH R.K.; ROY G.K. Prediction of minimum bubbling velocity, fluidization index and range of particulate fluidization for gas–solid fluidization in cylindrical and non-cylindrical beds, **Powder Technology**, v. 159, p. 168-172, 2005.

SOBRAL Y.D.; CUNHA F.R. Efeitos Hidrodinâmicos na estabilização de ondas de concentração em leitos fluidizados, **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**, v. 9, p. 23-36, 2004.

SUNDARESAN S.; LOEZOS P.N.; COSTAMAGNA P. The role of contact stresses and wall friction on fluidization, **Chemical Engineering Science**, v. 57, p. 5123-5141, 2002.

THEUERKAUF J.; WITT P.; SCHWESIG D. Analysis of particle porosity distribution in fixed beds using the discrete element method, **Powder Technology**, v. 165, p. 92-99, 2006.

TÜZÜN U.; HOSSEINI-ASHRAFI ME.; MACCUAIG N. Measurement of bed porosity distribution in particulate flows using photon transmission tomography, *Process Tomography*, Chapter 18, p. 393-418, 1995.

WINTERBERG M.; TSOTSAS E. Impact of tube-to-particle-diameter ratio on pressure drop in packed beds, **AIChE Journal** v.46, p.1084–1088, 2000.

YE M.; VAN DER HOEF M.A.; KUIPERS J.A.M. The effects of particle and gas properties on the fluidization of GeldartA particles, **Chemical Engineering Science**, v. 60, p. 4567-4580, 2005.

ZHANG W.L., THOMPSON KE., REED AH., BEENKEN L. Relationship between packing structure and porosity in fixed beds of equilateral cylindrical particles, **Chemical Engineering Science**, v.61, p. 8060-8074, 2006.

ZOU, R.P., YU, A.B. The packing of spheres in a cylindrical container: the thickness effect, **Chemical Engineering Science**, v. 50, p. 1504–1507, 1995.

NOGUERA, Jorge O. Cuellar. **Notas de aula:** Disciplina de Processos Químicos Industriais II. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM.

Disponível em: [www.oocities.org/br/giovanitonel/chemical\\_eng\\_files/process\\_xisto.htm](http://www.oocities.org/br/giovanitonel/chemical_eng_files/process_xisto.htm). Acesso em: 09 de julho de 2012.

FRANCISCO, Wagner de Cerqueira. Graduado em Geografia. **Equipe Brasil Escola**. Disponível em: [www.brasilecola.com/geografia/xisto-betuminoso.htm](http://www.brasilecola.com/geografia/xisto-betuminoso.htm). Acesso em: 10 de julho de 2012.

Mídia do Petróleo.

Disponível em: <http://www.euleionn.com.br/noticias/gas-natural/brasil-podera-ser-o-segundo-maior-produtor-de-gas-xisto>. Acesso em: 11 de julho de 2012.

MOREIRA, Regina de Fátima Peralta Muniz. **Notas de aula:** Operações Unitárias de Transferência de Quantidade de Movimento I. Santa Catarina. UFSC. Disponível em: <http://www.enq.ufsc.br/disci/eqa5313/Fluidizacao.htm>. Acesso em: 21 de outubro de 2012.

Revista Escola de Minas. Vol. 63, nº 4

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672010000400012>. Acesso em: 20 de janeiro de 2013.

União dos Produtores de Bioenergia

Disponível em: <http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=1103413#nc>. Acesso em: 24 de julho de 2013.

## 7. ANEXOS

### 7.1 Comparações de perda de carga para todas as faixas e colunas

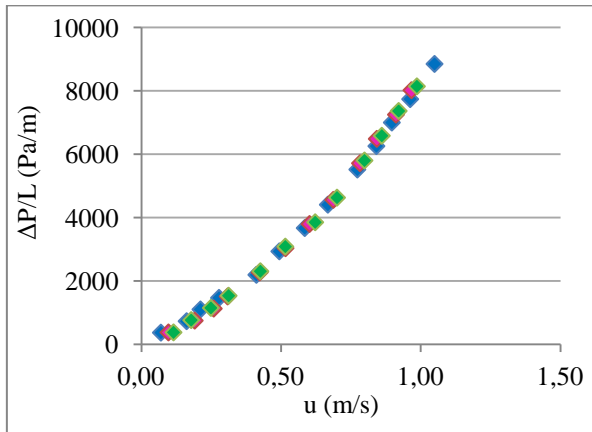


Figura 1 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_1$  correspondentes à coluna de 0,0173 m de diâmetro.

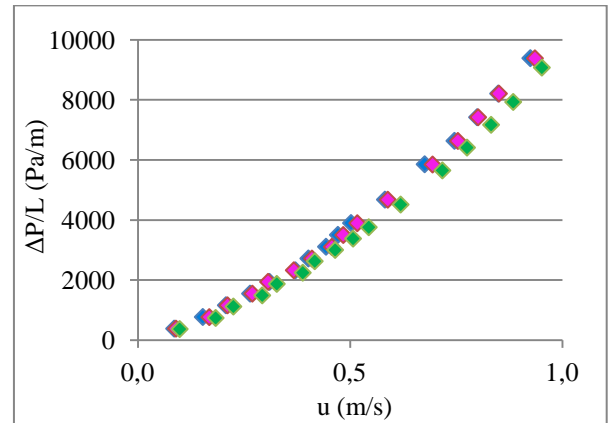


Figura 2 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_2$  correspondentes à coluna de 0,0173 m de diâmetro.

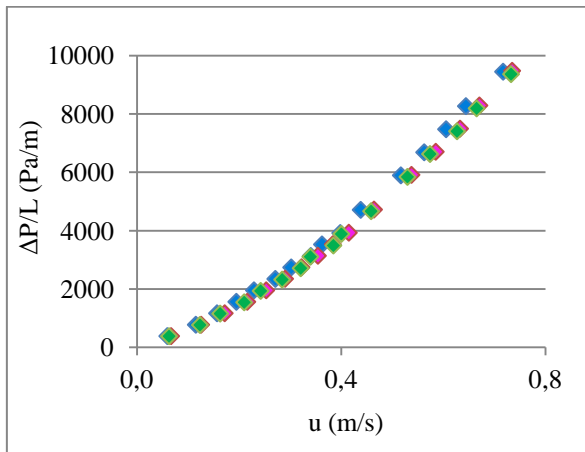


Figura 3 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_3$  correspondentes à coluna de 0,0173 m de diâmetro.

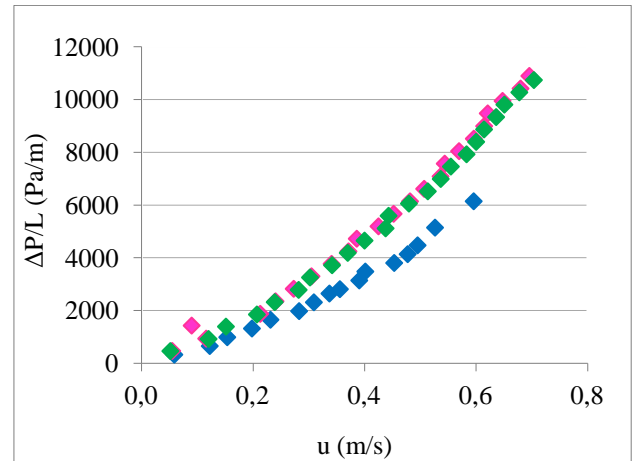


Figura 4 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_4$  correspondentes à coluna de 0,0173 m de diâmetro.

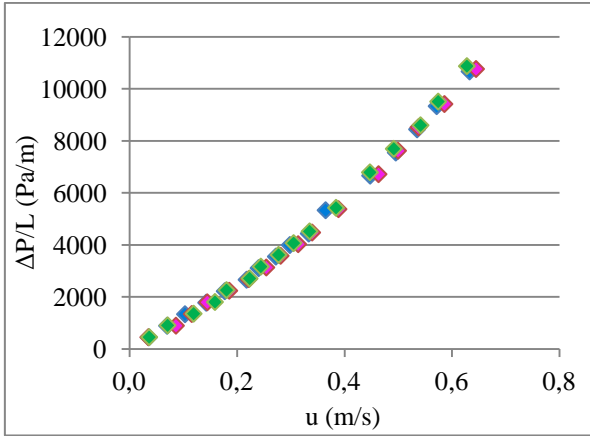


Figura 5 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_5$  correspondentes à coluna de 0,0173 m de diâmetro.

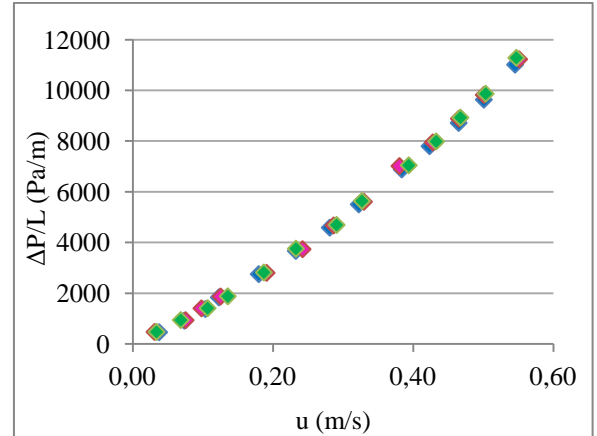


Figura 6 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_6$  correspondentes à coluna de 0,0173 m de diâmetro.

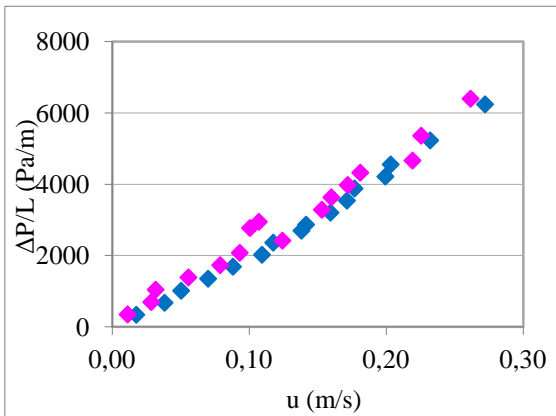


Figura 7 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_8$  correspondentes à coluna de 0,0173 m de diâmetro.

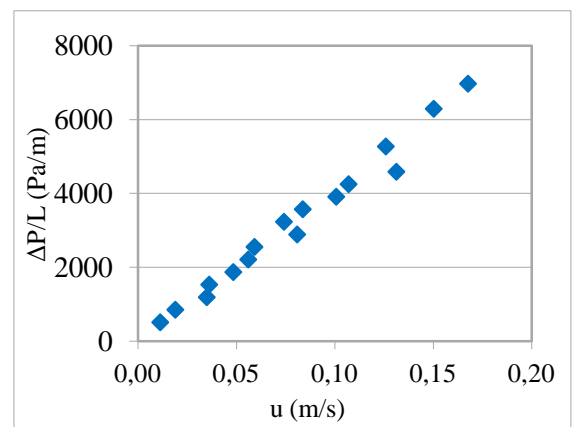


Figura 8 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_9$  correspondentes à coluna de 0,0173 m de diâmetro.

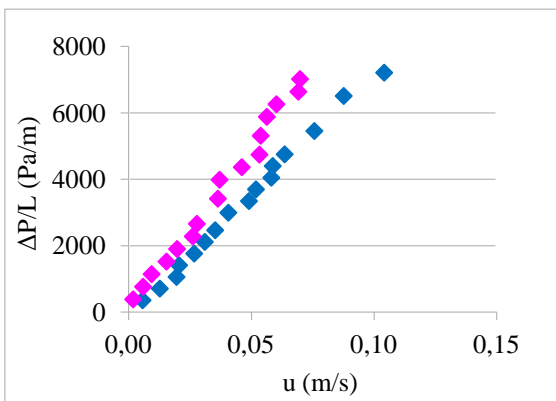


Figura 9 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_{10}$  correspondentes à coluna de 0,0173 m de diâmetro.

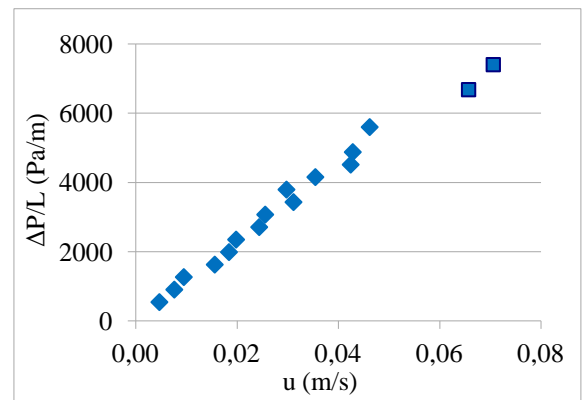


Figura 10 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_{11}$  correspondentes à coluna de 0,0173 m de diâmetro.

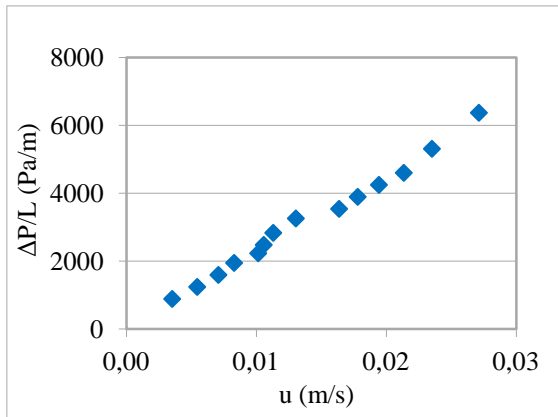


Figura 11 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_{12}$  correspondentes à coluna de 0,0173 m de diâmetro.

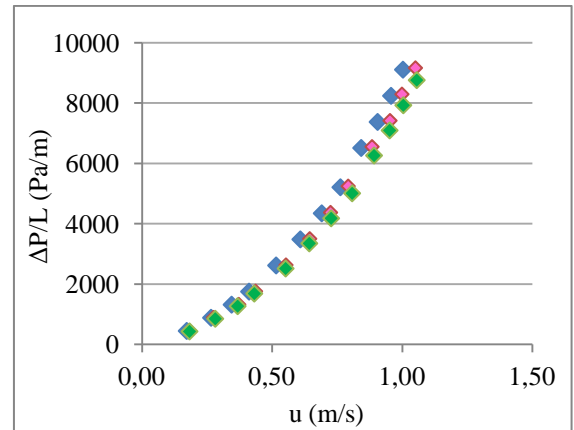


Figura 12 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_1$  correspondentes à coluna de 0,0246 m de diâmetro.

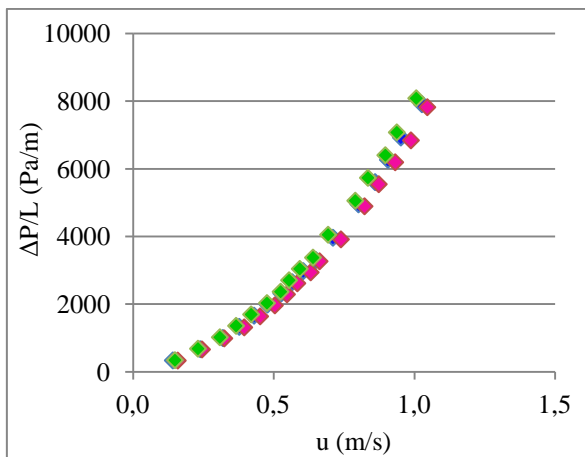


Figura 13 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_2$  correspondentes à coluna de 0,0246 m de diâmetro.

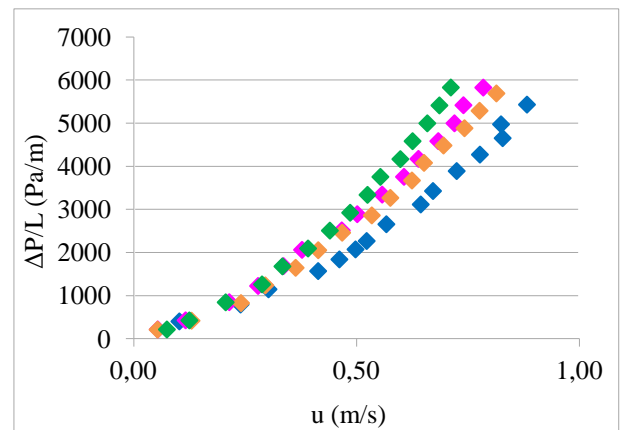


Figura 14 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_4$  correspondentes à coluna de 0,0246 m de diâmetro.

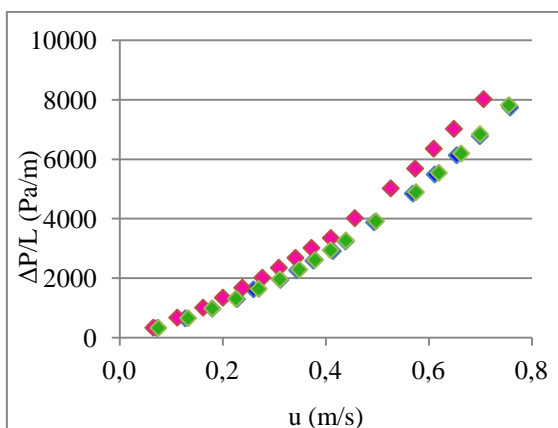


Figura 15 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_5$  correspondentes à coluna de 0,0246 m de diâmetro.

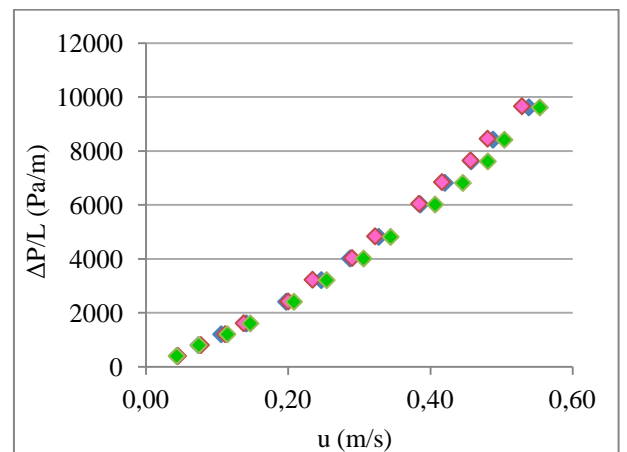


Figura 16 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_6$  correspondentes à coluna de 0,0246 m de diâmetro.

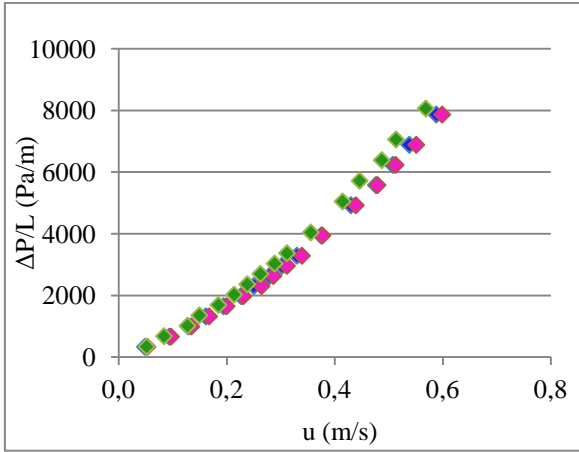


Figura 17 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_7$  correspondentes à coluna de 0,0246 m de diâmetro.

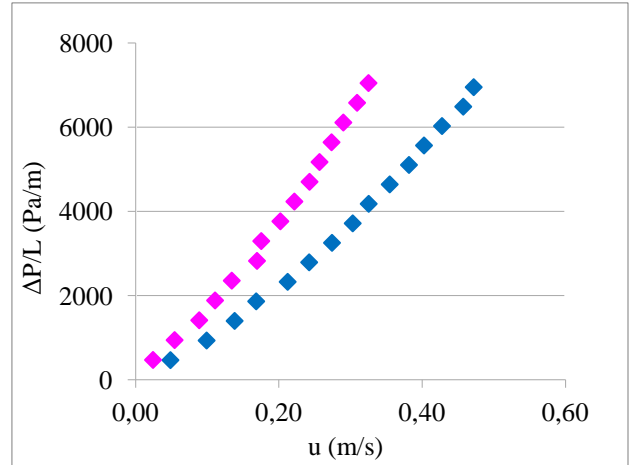


Figura 18 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_8$  correspondentes à coluna de 0,0246 m de diâmetro.

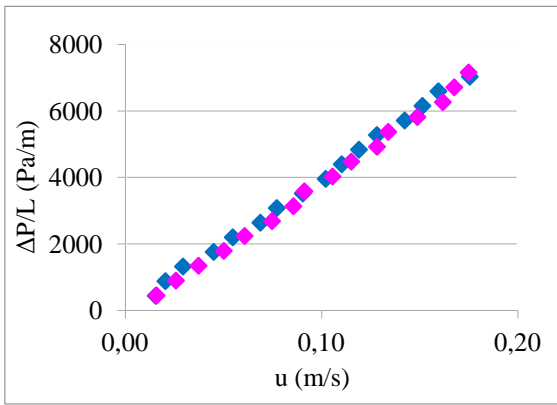


Figura 19 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_9$  correspondentes à coluna de 0,0246 m de diâmetro.

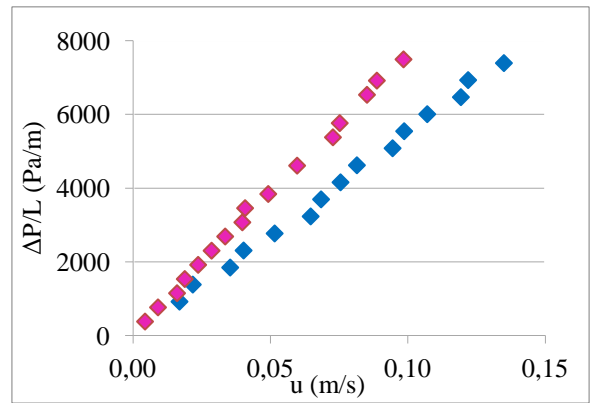


Figura 20 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_{10}$  correspondentes à coluna de 0,0246 m de diâmetro.

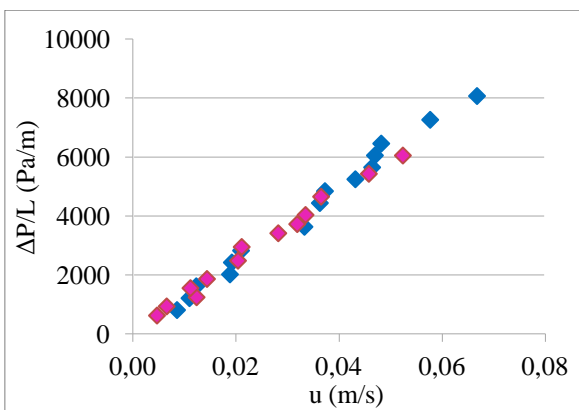


Figura 21 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_{11}$  correspondentes à coluna de 0,0246 m de diâmetro.

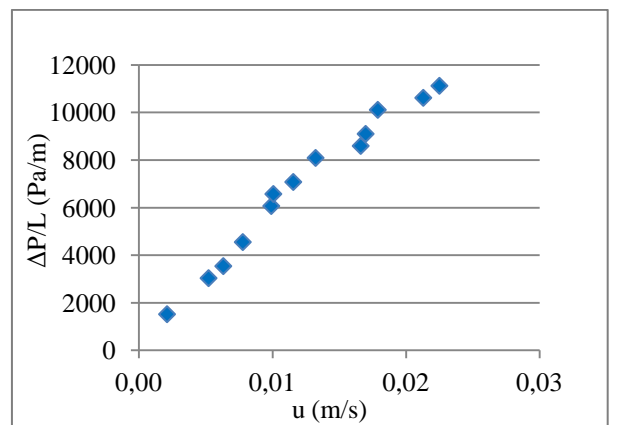


Figura 22 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_{12}$  correspondentes à coluna de 0,0246 m de diâmetro.

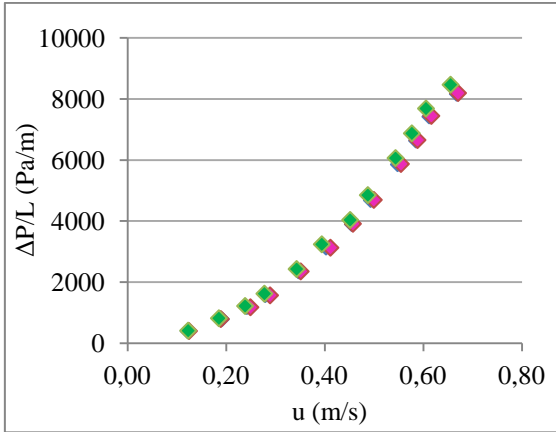


Figura 23 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_1$  correspondentes à coluna de 0,0354 m de diâmetro.

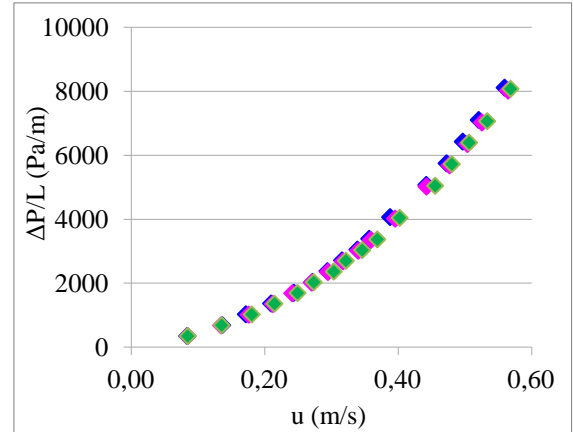


Figura 24 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_3$  correspondentes à coluna de 0,0354 m de diâmetro.

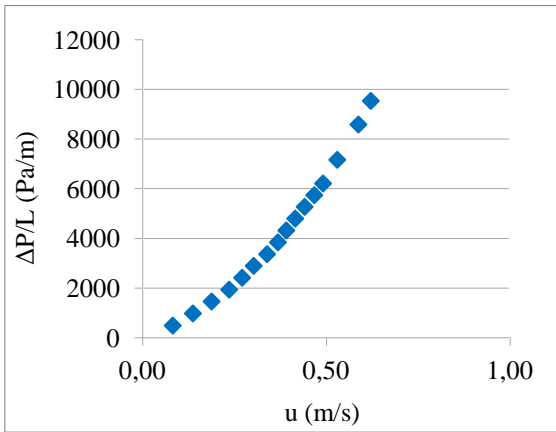


Figura 25 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_4$  correspondentes à coluna de 0,0354 m de diâmetro.

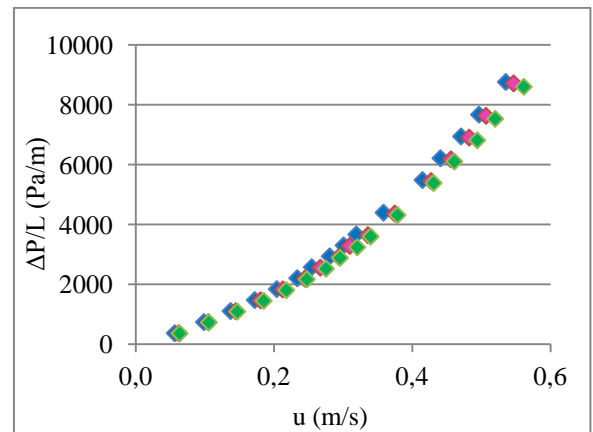


Figura 26 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_5$  correspondentes à coluna de 0,0354 m de diâmetro.

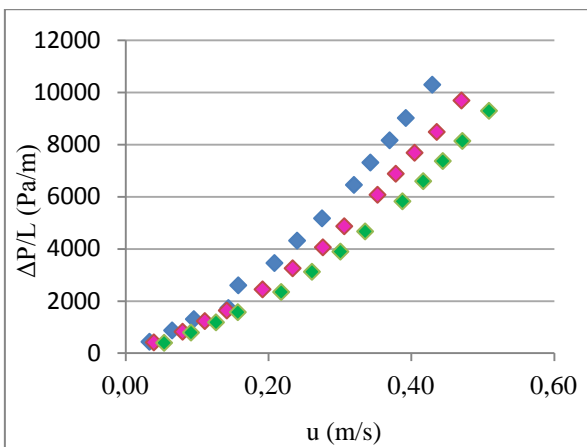


Figura 27 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_6$  correspondentes à coluna de 0,0354 m de diâmetro.

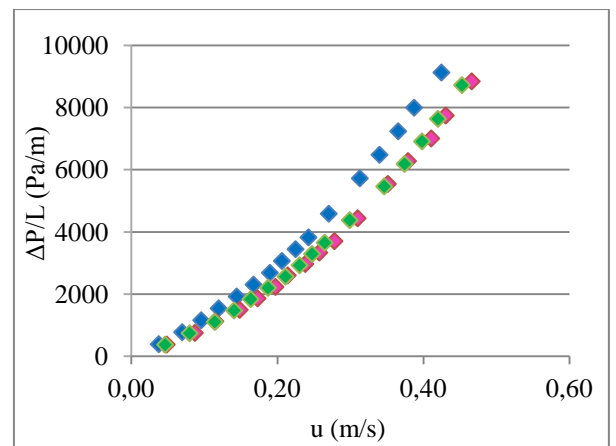


Figura 28 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_7$  correspondentes à coluna de 0,0354 m de diâmetro.

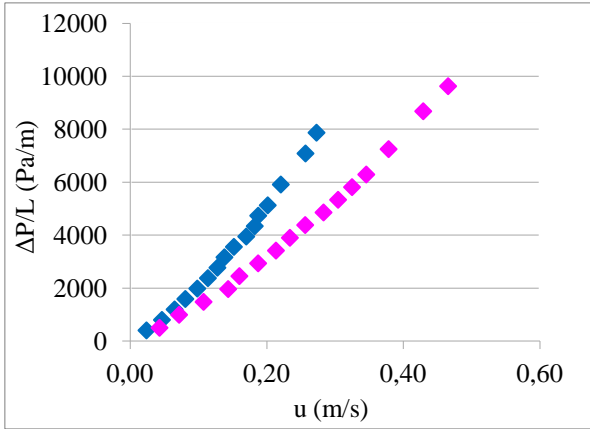


Figura 29 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_8$  correspondentes à coluna de 0,0354 m de diâmetro.

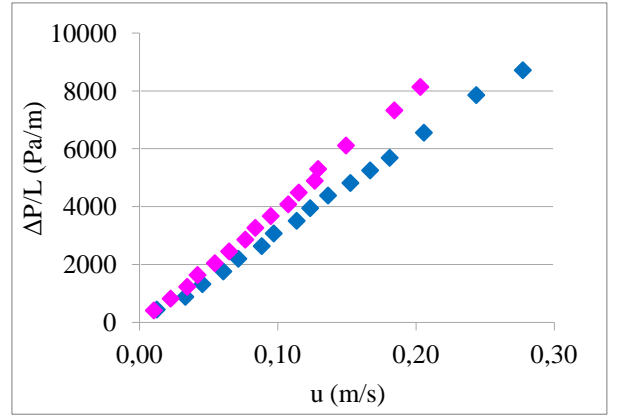


Figura 30 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_9$  correspondentes à coluna de 0,0354 m de diâmetro.

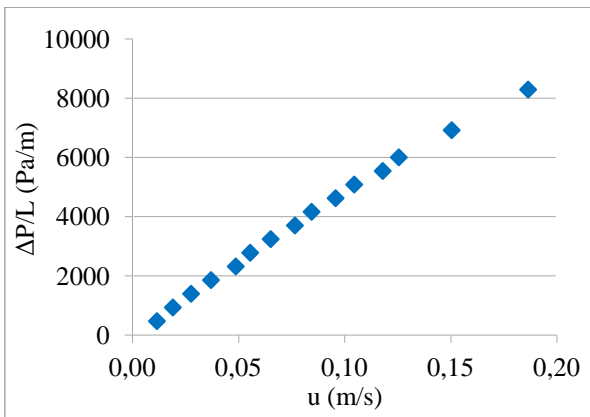


Figura 31 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_{10}$  correspondentes à coluna de 0,0354 m de diâmetro.

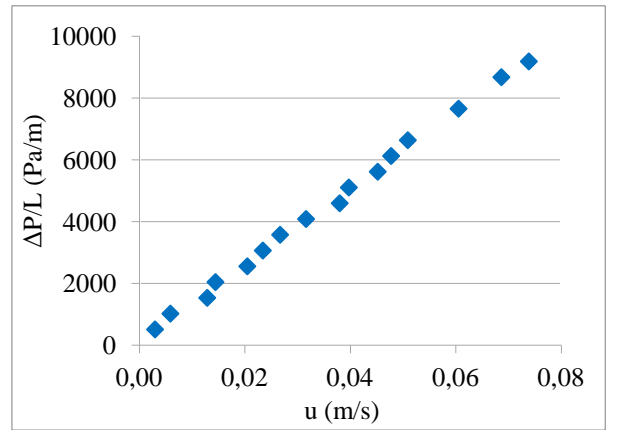


Figura 32 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_{11}$  correspondentes à coluna de 0,0354 m de diâmetro.

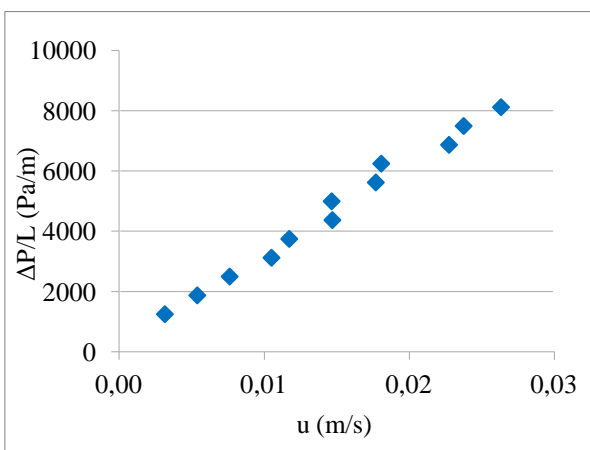


Figura 33 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_{12}$  correspondentes à coluna de 0,0354 m de diâmetro.

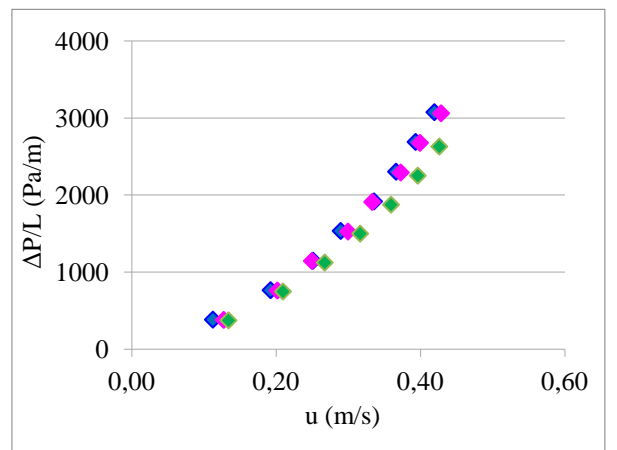


Figura 34 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_2$  correspondentes à coluna de 0,0470 m de diâmetro.

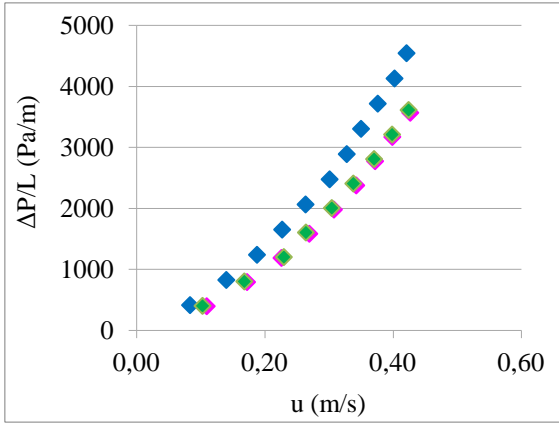


Figura 35 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_3$  correspondentes à coluna de 0,0470 m de diâmetro.

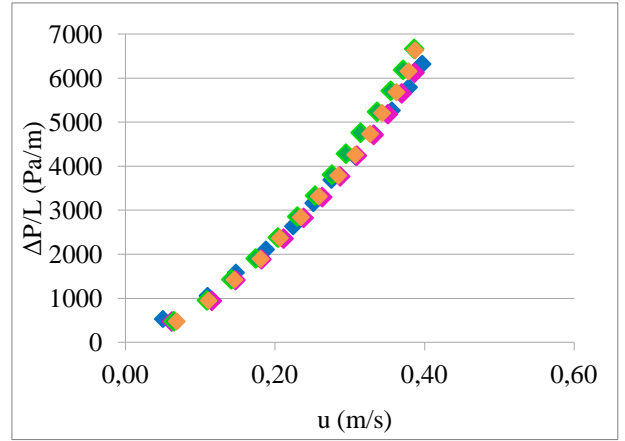


Figura 36 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_4$  correspondentes à coluna de 0,0470 m de diâmetro.

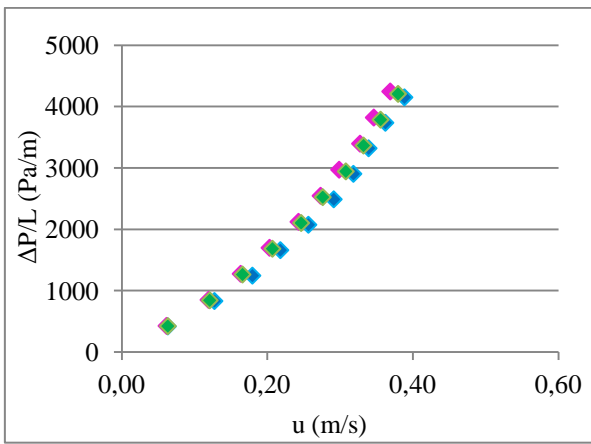


Figura 37 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_5$  correspondentes à coluna de 0,0470 m de diâmetro.

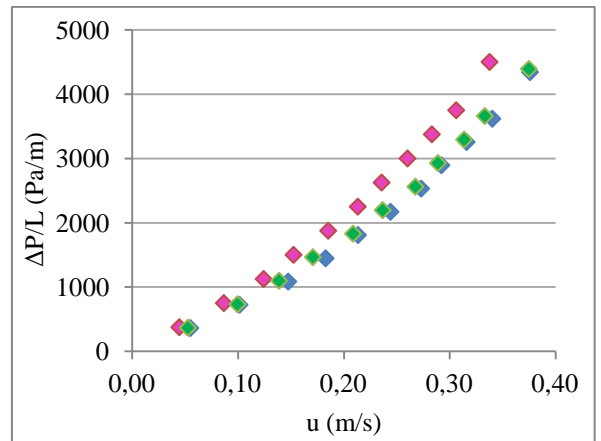


Figura 38 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_6$  correspondentes à coluna de 0,0470 m de diâmetro.

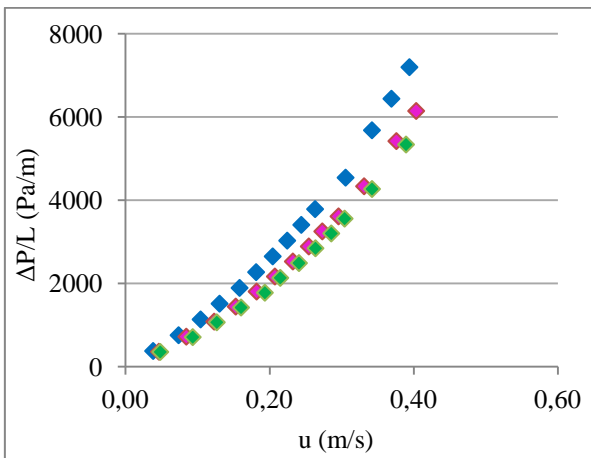


Figura 39 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_7$  correspondentes à coluna de 0,0470 m de diâmetro.

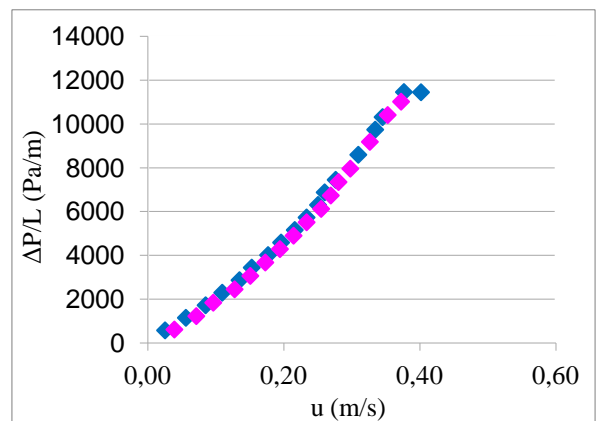


Figura 40 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_8$  correspondentes à coluna de 0,0470 m de diâmetro.

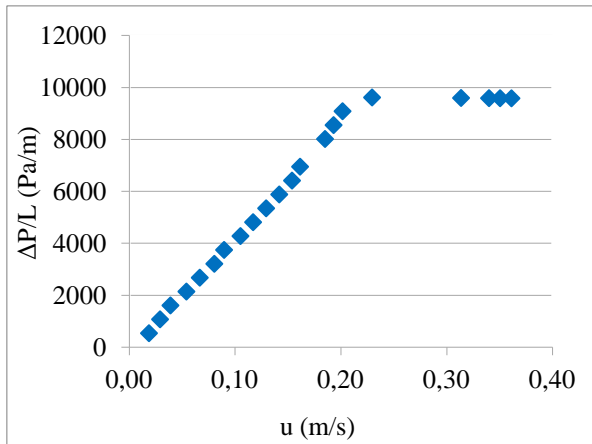


Figura 41 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_9$  correspondentes à coluna de 0,0470 m de diâmetro.

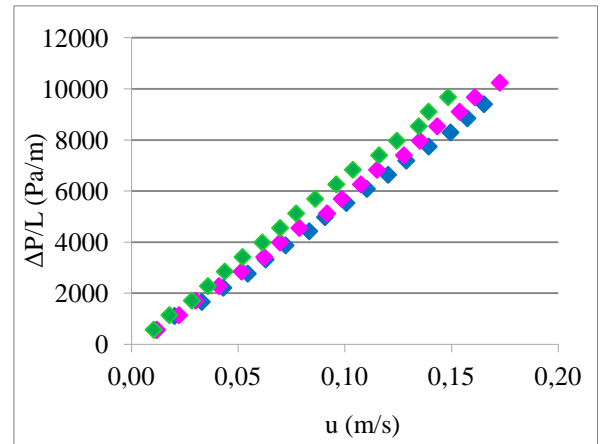


Figura 42 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_{10}$  correspondentes à coluna de 0,0470 m de diâmetro.

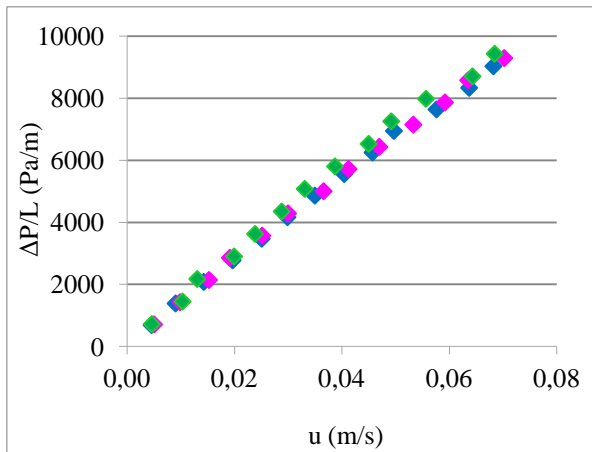


Figura 43 - Comparação entre dados experimentais para partículas  $f_{11}$  correspondentes à coluna de 0,0470 m de diâmetro.

## 7.2 Modelos Aplicados às partículas

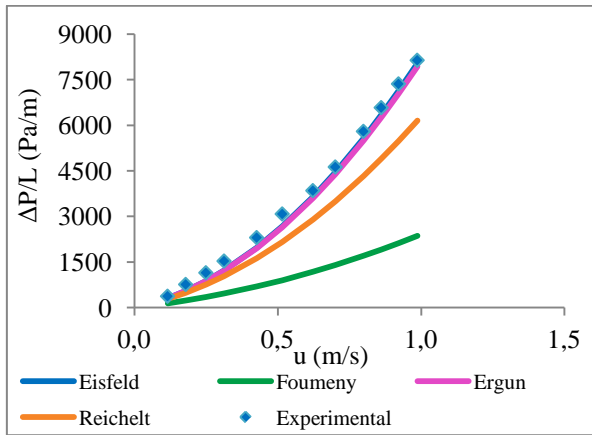


Figura 44. Partículas  $f_1$  com os modelos aplicados à coluna de 0.0173 m.

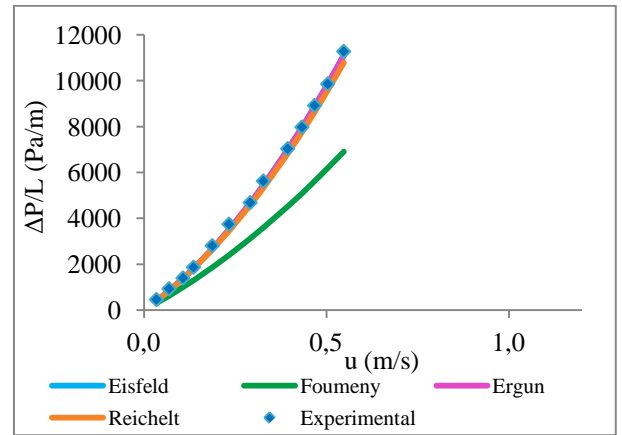


Figura 45. Partículas  $f_6$  com os modelos aplicados à coluna de 0.0173 m.

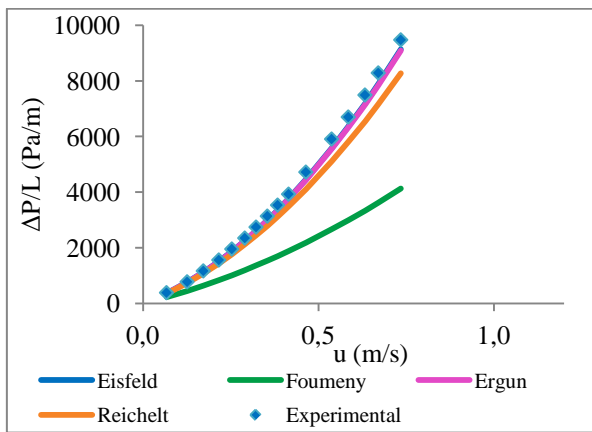


Figura 46. Partículas  $f_3$  com os modelos aplicados à coluna de 0.0173 m.

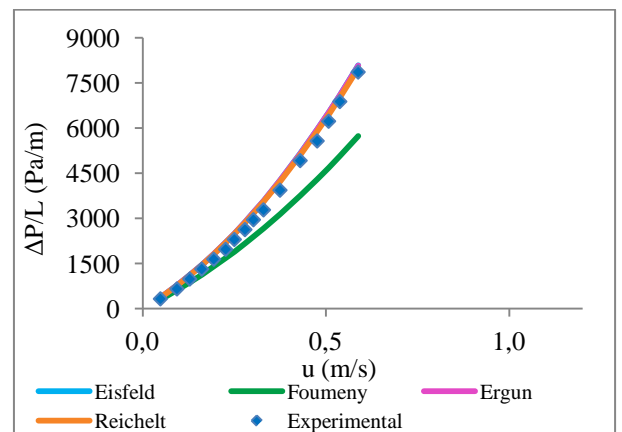


Figura 47. Partículas  $f_7$  com os modelos aplicados à coluna de 0.0246 m.

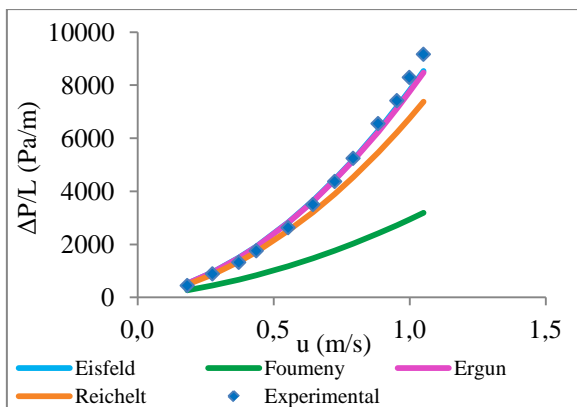


Figura 48. Partículas  $f_1$  com os modelos aplicados à coluna de 0.0246 m.

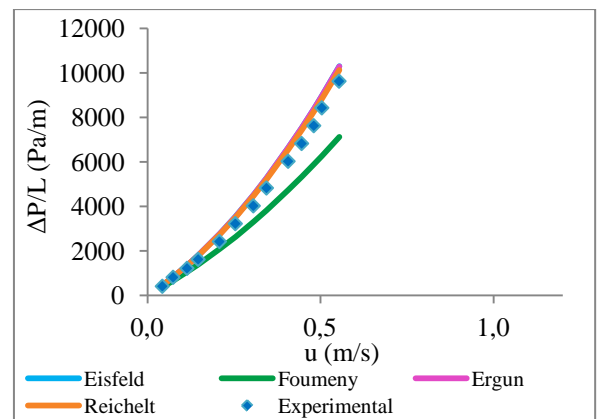


Figura 49. Partículas  $f_6$  com os modelos aplicados à coluna de 0.0246 m.

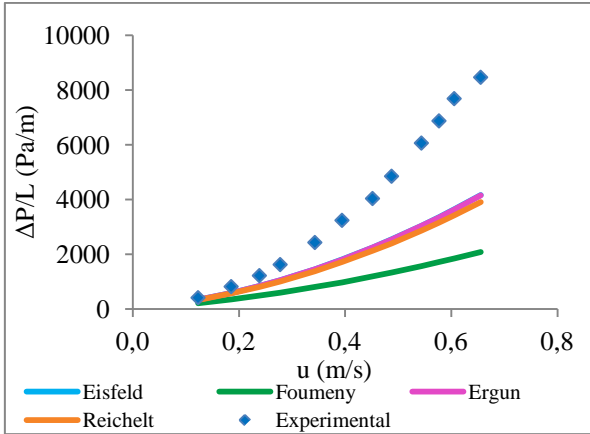


Figura 50. Partículas  $f_1$  com os modelos aplicados à coluna de 0.0354 m.

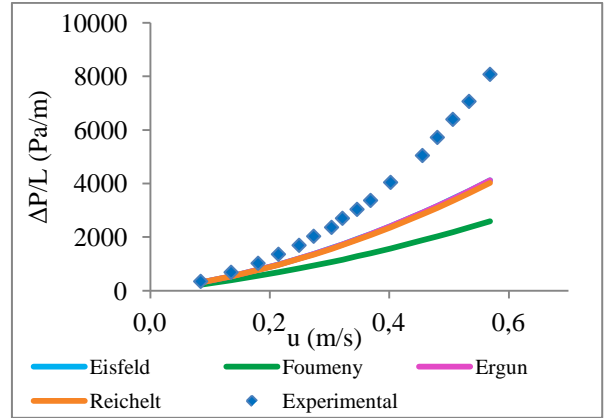


Figura 51. Partículas  $f_3$  com os modelos aplicados à coluna de 0.0354 m.

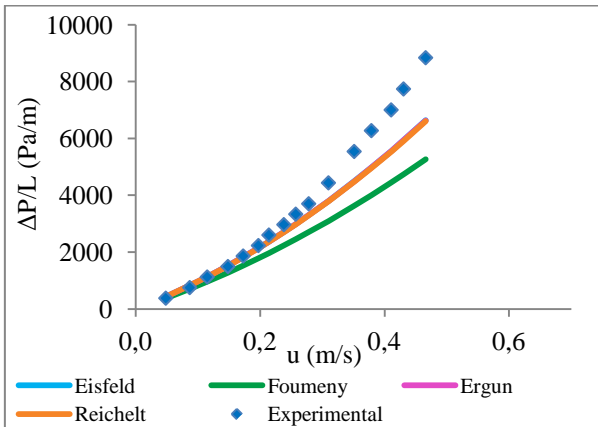


Figura 52. Partículas  $f_7$  com os modelos aplicados à coluna de 0.0354 m.

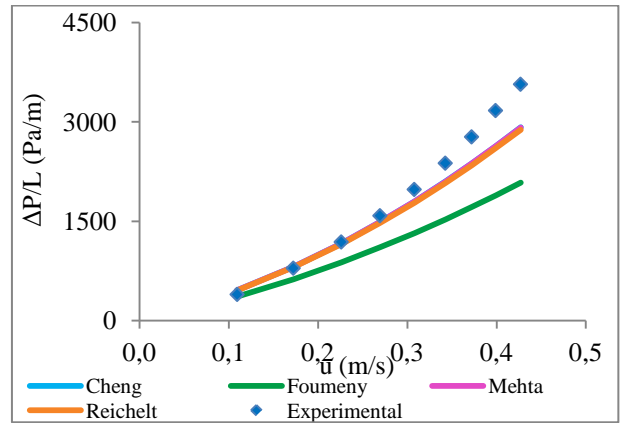


Figura 53. Partículas  $f_3$  com os modelos aplicados à coluna de 0.0470 m.

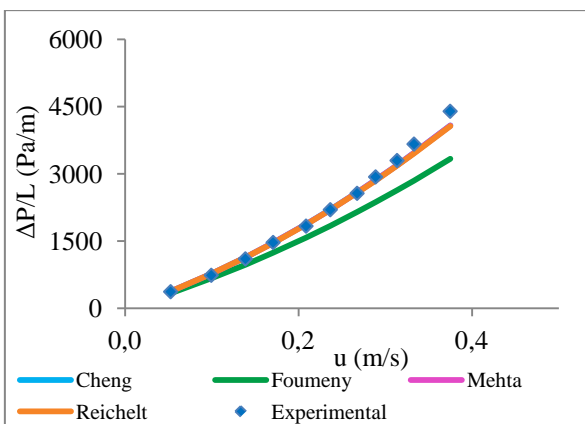


Figura 54. Partículas  $f_6$  com os modelos aplicados à coluna de 0.0470 m.

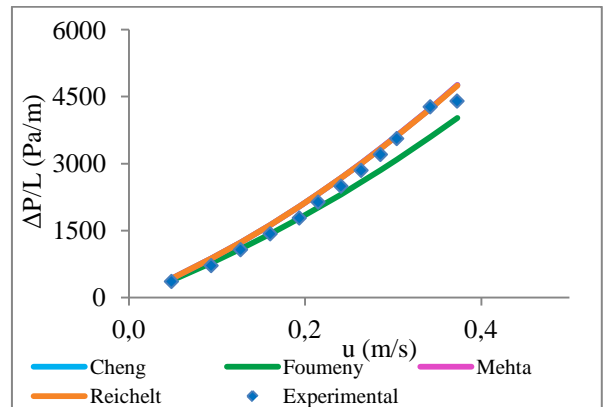


Figura 55. Partículas  $f_7$  com os modelos aplicados à coluna de 0.0470 m.

### 7.3 Tabelas

Tabela 1 – Relação dos dados obtidos durante o procedimento experimental

$D_c$ ( $10^{-3}$ m)	$D_p$	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$u$ (m/s)	$\varepsilon$
17,3	f <sub>12</sub>	6366,5	0,027	0,581
17,3	f <sub>11</sub>	6679,9	0,066	0,578
17,3	f <sub>10</sub>	7208,6	0,104	0,559
17,3	f <sub>10</sub>	7015,5	0,070	0,540
17,3	f <sub>9</sub>	6968,0	0,168	0,500
17,3	f <sub>8</sub>	6237,0	0,272	0,500
17,3	f <sub>8</sub>	6395,2	0,262	0,530
17,3	f <sub>7</sub>	9688,5	0,514	0,548
17,3	f <sub>7</sub>	9476,5	0,549	0,557
17,3	f <sub>7</sub>	9727,7	0,518	0,546
17,3	f <sub>6</sub>	11012,5	0,546	0,514
17,3	f <sub>6</sub>	11223,7	0,551	0,505
17,3	f <sub>6</sub>	11280,3	0,547	0,502
17,3	f <sub>5</sub>	10667,8	0,633	0,490
17,3	f <sub>5</sub>	10761,9	0,645	0,485
17,3	f <sub>5</sub>	10871,4	0,628	0,480
17,3	f <sub>4</sub>	6140,7	0,596	0,500
17,3	f <sub>4</sub>	10890,2	0,696	0,500
17,3	f <sub>4</sub>	10733,6	0,704	0,500
17,3	f <sub>3</sub>	9447,1	0,717	0,516
17,3	f <sub>3</sub>	9478,5	0,735	0,515
17,3	f <sub>3</sub>	9363,3	0,733	0,515
17,3	f <sub>2</sub>	9390,3	0,925	0,535
17,3	f <sub>2</sub>	9385,0	0,936	0,535
17,3	f <sub>2</sub>	9076,8	0,952	0,535
17,3	f <sub>1</sub>	8851,4	1,050	0,564
17,3	f <sub>1</sub>	8021,1	0,967	0,548
17,3	f <sub>1</sub>	8143,8	0,987	0,541
24,6	f <sub>12</sub>	10027,8	0,056	0,595
24,6	f <sub>12</sub>	11120,0	0,023	0,595

24,6	f <sub>11</sub>	8069,7	0,067	0,471
24,6	f <sub>10</sub>	7395,5	0,135	0,470
24,6	f <sub>9</sub>	7027,3	0,176	0,550
24,6	f <sub>9</sub>	7155,7	0,175	0,563
24,6	f <sub>8</sub>	6951,2	0,472	0,530
24,6	f <sub>8</sub>	7048,7	0,325	0,543
24,6	f <sub>7</sub>	7863,2	0,588	0,571
24,6	f <sub>7</sub>	7860,8	0,599	0,571
24,6	f <sub>7</sub>	8057,5	0,569	0,561
24,6	f <sub>6</sub>	9623,6	0,539	0,506
24,6	f <sub>6</sub>	9665,8	0,529	0,504
24,6	f <sub>6</sub>	9619,7	0,554	0,506
24,6	f <sub>5</sub>	7741,1	0,758	0,540
24,6	f <sub>5</sub>	8023,0	0,706	0,525
24,6	f <sub>5</sub>	7820,0	0,755	0,536
24,6	f <sub>4</sub>	5428,2	0,882	0,490
24,6	f <sub>4</sub>	5823,3	0,784	0,490
24,6	f <sub>4</sub>	5687,9	0,814	0,490
24,6	f <sub>4</sub>	5825,3	0,712	0,490
24,6	f <sub>3</sub>	7947,9	0,860	0,558
24,6	f <sub>3</sub>	7773,9	0,898	0,567
24,6	f <sub>3</sub>	7975,3	0,860	0,557
24,6	f <sub>2</sub>	7911,8	1,027	0,559
24,6	f <sub>2</sub>	7822,9	1,046	0,564
24,6	f <sub>2</sub>	8087,4	1,007	0,550
24,6	f <sub>1</sub>	9104,8	1,003	0,538
24,6	f <sub>1</sub>	9162,0	1,051	0,533
24,6	f <sub>1</sub>	8757,4	1,056	0,554
35,4	f <sub>12</sub>	8118,4	0,026	0,560
35,4	f <sub>11</sub>	9188,4	0,074	0,570
35,4	f <sub>10</sub>	8287,8	0,186	0,560
35,4	f <sub>9</sub>	8709,7	0,277	0,550
35,4	f <sub>9</sub>	8131,1	0,203	0,565
35,4	f <sub>8</sub>	9622,5	0,466	0,520

35,4	f <sub>8</sub>	7865,9	0,273	0,509
35,4	f <sub>7</sub>	9119,4	0,425	0,538
35,4	f <sub>7</sub>	8836,0	0,466	0,550
35,4	f <sub>7</sub>	8714,5	0,453	0,550
35,4	f <sub>6</sub>	10295,3	0,429	0,483
35,4	f <sub>6</sub>	9689,2	0,470	0,511
35,4	f <sub>6</sub>	9293,8	0,509	0,529
35,4	f <sub>5</sub>	8764,7	0,536	0,508
35,4	f <sub>5</sub>	8718,6	0,547	0,510
35,4	f <sub>5</sub>	8602,9	0,562	0,516
35,4	f <sub>4</sub>	3371,9	0,303	0,490
35,4	f <sub>3</sub>	8113,3	0,560	0,542
35,4	f <sub>3</sub>	8021,7	0,565	0,547
35,4	f <sub>3</sub>	8074,7	0,569	0,544
35,4	f <sub>2</sub>	9263,7	0,597	0,516
35,4	f <sub>2</sub>	9289,9	0,606	0,514
35,4	f <sub>2</sub>	8657,3	0,625	0,514
35,4	f <sub>1</sub>	8159,4	0,668	0,526
35,4	f <sub>1</sub>	8189,2	0,671	0,524
35,4	f <sub>1</sub>	8462,0	0,656	0,510
47,0	f <sub>11</sub>	9295,8	0,070	0,550
47,0	f <sub>11</sub>	9032,4	0,068	0,563
47,0	f <sub>11</sub>	9433,8	0,068	0,543
47,0	f <sub>10</sub>	10238,6	0,173	0,570
47,0	f <sub>10</sub>	9396,7	0,165	0,634
47,0	f <sub>10</sub>	9672,9	0,148	0,623
47,0	f <sub>9</sub>	9579,1	0,361	0,558
47,0	f <sub>8</sub>	11452,1	0,402	0,512
47,0	f <sub>8</sub>	11021,2	0,373	0,530
47,0	f <sub>7</sub>	7195,5	0,394	0,531
47,0	f <sub>7</sub>	6143,4	0,404	0,552
47,0	f <sub>7</sub>	5338,0	0,389	0,558
47,0	f <sub>6</sub>	4501,2	0,338	0,529
47,0	f <sub>6</sub>	4342,6	0,376	0,545

47,0	f <sub>6</sub>	4392,0	0,375	0,539
47,0	f <sub>5</sub>	4150,2	0,389	0,511
47,0	f <sub>5</sub>	4245,9	0,369	0,500
47,0	f <sub>5</sub>	4206,5	0,380	0,505
47,0	f <sub>4</sub>	6318,7	0,397	0,487
47,0	f <sub>4</sub>	6122,8	0,387	0,541
47,0	f <sub>4</sub>	6663,6	0,386	0,537
47,0	f <sub>4</sub>	6630,8	0,388	0,539
47,0	f <sub>3</sub>	4543,6	0,421	0,508
47,0	f <sub>3</sub>	3566,8	0,427	0,527
47,0	f <sub>3</sub>	3612,0	0,424	0,521
47,0	f <sub>2</sub>	3076,5	0,419	0,499
47,0	f <sub>2</sub>	3062,0	0,429	0,500
47,0	f <sub>2</sub>	2630,0	0,426	0,508
47,0	f <sub>1</sub>	2844,7	0,414	0,506
47,0	f <sub>1</sub>	2371,6	0,403	0,518
47,0	f <sub>1</sub>	2329,7	0,418	0,506

---

Fonte: o autor (2012)