

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ELENICE PAZIN

**ESTUDO DA PERDA DE CARGA EM UM LEITO DE XISTO BETUMINOSO
COMPOSTO POR PARTÍCULAS DE DIFERENTES GRANULOMETRIAS**

CURITIBA

2012

ELENICE PAZIN

**ESTUDO DA PERDA DE CARGA EM UM LEITO DE XISTO BETUMINOSO
COMPOSTO POR PARTÍCULAS DE DIFERENTES GRANULOMETRIAS**

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

CURITIBA

2012

TERMO DE APROVAÇÃO

ELENICE PAZIN

ESTUDO DA PERDA DE CARGA EM UM LEITO DE XISTO BETUMINOSO COMPOSTO POR PARTÍCULAS DE DIFERENTES GRANULOMETRIAS

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre no curso de pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Knesebeck
Departamento de Engenharia Química - UFPR

Prof. Dr. Fernanda de Castilhos
Departamento de Engenharia Química - UFPR

Prof. Dr. Oswaldo Curty da Motta Lima
Departamento de Engenharia Química - UEM

Curitiba, 17 de fevereiro de 2012.

Aos meus pais Nélio e Lúcia e minha irmã Vladenice e seu marido Ednei por todo carinho e apoio.

Ao meu namorado, Djavan, pelo amor e companheirismo.

E a todos meus amigos que fazem parte da minha história.

RESUMO

O presente trabalho trata sobre o estudo da perda de carga em leito fixo constituído por partículas de xisto betuminoso, considerando partículas irregulares e distribuídas em uma ampla faixa granulométrica. Foram classificadas amostras de xisto por peneiramento, resultando em cinco faixas de diâmetros diferentes, variando de 0,8 a 88 milímetros. Com as amostras preparadas, foram realizados testes experimentais, em que as partículas de xisto foram introduzidas em um permeâmetro de 59,5 centímetros de diâmetro e coletados valores de perda de carga para velocidades do gás variando de 0,1 a 1 m/s. Inicialmente, foram realizados testes constituídos por partículas de mesma faixa granulométrica para cada uma das cinco frações granulométricas utilizadas, sendo os testes processados em batelada de duzentos e cinquenta quilos de material. A fim de avaliar a influência da distribuição granulométrica no processo observado, também foram realizados testes em que as frações granulométricas de xisto foram misturadas no mesmo teste. Com os dados experimentais obtidos foi possível avaliar a capacidade dos modelos matemáticos encontrados na literatura em prever o comportamento do sistema. Em seguida, foram estudados modelos para perda de carga em misturas de partículas irregulares. Foram feitos ajustes dos modelos matemáticos mais amplamente utilizados para predição de perda de carga em leito de partículas de mesma granulometria. Dentre os modelos avaliados optou-se pela utilização de equação de Ergun com os valores das constantes ajustadas. Com os valores ajustados, foi possível estabelecer uma relação entre a distribuição granulométrica e as constantes da equação de Ergun, ajustadas para prever o comportamento apresentado pelas misturas das diferentes faixas granulométricas.

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

ABSTRACT

This work is about the study of pressure drop in fixed bed composed by particles of oil shale, whereas irregular particles distributed in a wide particle size range. Oil shale samples were classified by sieving, resulting in five bands of different diameters ranging from 0.8 to 88 millimeters. With the prepared samples were conducted experimental tests on the shale particles were introduced in a permeameter of 59.5 centimeters in diameter and collected values of pressure drop for gas velocities ranging from 0.1 to 1 m/s. Initially tests were performed with a single particle size range, and the tests processed batch of two hundred and fifty pounds of material. In order to evaluate the influence of particle size distribution observed in the process, tests were performed in which the size fractions were mixed shale. With the experimental data obtained it was possible to evaluate the ability of mathematical models in the literature to predict the behavior of the system. The particle sizes were modeled individually by adjusting the Ergun equation. Then models were studied for pressure drop in mixtures of irregular particles. Adjustments were made of the most widely used mathematical models to predict the loss in the same bed particle size distribution. With the adjusted values was possible to establish a relationship between the size distribution of the constants adjusted Ergun equation to predict the behavior exhibited by mixtures of different particle sizes. The work shows the literature which models better represent the experimental data.

Keywords: pressure drop, fixed bed, oil shale.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Processo Simplificado do Processo PETROSIX.....	19
Figura 2 - Diagrama Esquemático do Processo de Pirólise	20
Figura 3 - Diagrama Esquemático do Equipamento utilizado para os testes	42
Figura 4 - Imagens das amostras de xisto utilizadas.....	43
Figura 5 - Fotos de Scanner das amostras.....	45
Figura 6 - Avaliação da Reprodutibilidade dos testes	53
Figura 7 - Comparação entre dados experimentais para partículas x_F , utilizando diferentes quantidades de xisto	54
Figura 8 - Comparação entre dados experimentais para partículas $x_{1/2}$, utilizando diferentes quantidades de xisto	54
Figura 9 - Comparação entre dados experimentais para partículas x_1 , utilizando diferentes quantidades de xisto	55
Figura 10 - Comparação entre dados experimentais para partículas x_2 , utilizando diferentes quantidades de xisto.....	55
Figura 11 - Comparação entre dados experimentais para partículas x_3 ,utilizando diferentes quantidades de xisto	56
Figura 12 - Dados experimentais e modelos da literatura, leito composto por partículas x_f ...	57
Figura 13 - Dados experimentais e modelos da literatura, leito composto por partículas $x_{1/2}$.	58
Figura 14 - Dados experimentais e Modelos da literatura, leito composto por partículas x_1 .	58
Figura 15 - Dados experimentais e modelos da literatura, leito composto por partículas x_2 .	59
Figura 16 - Dados experimentais e modelos da literatura, leito composto por partículas x_3 .	59
Figura 17 - Relação entre perda de carga e número de Reynolds.	60
Figura 18 - Comparação entre os dados experimentais e os fornecidos pela Equação de Ergun com a constante B ajustada.....	62
Figura 19 - Comparação entre os dados experimentais e os fornecidos pela equação de Nemeç e Levec com a constante B ajustada.....	63
Figura 20 - Comparação entre os dados experimentais e os fornecidos pela equação de Sawistowski com a constante B ajustada.....	66
Figura 21 - Desvios obtidos entre os modelos e os dados experimentais utilizando amostras de x_F	67
Figura 22 - Desvios obtidos entre os modelos e os dados experimentais utilizando amostras de $x_{1/2}$	67
Figura 23 - Desvios obtidos entre os modelos e os dados experimentais utilizando amostras de x_1	68
Figura 24 - Desvios obtidos entre os modelos e os dados experimentais utilizando amostras de x_2	68
Figura 25 - Desvios obtidos entre os modelos e os dados experimentais utilizando amostras de x_3	69
Figura 26 - Dados experimentais obtidos para as frações puras e para as misturas.	70

Figura 27 - Dados obtidos para os testes de mesma distribuição granulométrica.	71
Figura 28 - Valores de porosidade para cada um dos testes realizados	72
Figura 29 - Distribuição da fração granulométrica nos testes realizados.....	72
Figura 30 - Aplicação das definições de diâmetro médio na Equação de Ergun.....	74
Figura 31 - Relação entre valores exper. e valores fornecidos pelo modelo de Ergun utilizando d_{sv}	76
Figura 32 - Relação entre valores exper. e valores fornecidos pelo modelo de Ergun utilizando d_i	76
Figura 33 - Relação entre perda de carga e velocidade para diferentes testes.....	77
Figura 34 - Dados experimentais e fornecidos pela equação de Ergun para o Teste 26.....	80
Figura 35 - Dados experimentais e fornecidos pela equação de Ergun para o Teste 16.....	80
Figura 36 - Dados experimentais e fornecidos pela equação de Ergun para o Teste 13.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização do tamanho da partícula.....	23
Tabela 2 - Definição de diâmetro médio para distribuições de partículas.	25
Tabela 3 - Série de peneiras americanas e equivalentes da série Tyler (A.S.T.M. – E – 11 – 61).	43
Tabela 4 - Diâmetros médios	44
Tabela 5 - Esfericidade das Amostras utilizadas nos testes	45
Tabela 6 – Porosidade do leito.....	46
Tabela 7 – Fração mássica de cada faixa granulométrica utilizada nos testes.....	47
Tabela 8 - Relação entre diâmetro do permeâmetro e diâmetro das partículas.....	56
Tabela 9 - Faixa de Reynolds.....	60
Tabela 10 – Valores ajustados para a constante B da equação de Ergun.....	61
Tabela 11 - Constantes ajustadas para a Equação de Nemeç e Levec.....	63
Tabela 12 – Valores da razão de Reynolds por $(1-\epsilon)$	64
Tabela 13 - Valores da área específica das partículas.....	65
Tabela 14 - Valores ajustados para a Equação de Sawistowski	65
Tabela 15 - Valores de porosidade apresentados pelos testes utilizados para avaliar a reprodutibilidade do sistema.....	71
Tabela 16 - Testes escolhidos para a verificação da definição de diâmetro com suas devidas frações granulométrica e porosidade do leito.	74
Tabela 17 - Desvios observados para a Equação de Ergun utilizando vários diâmetros.....	75
Tabela 18 - Desvios observados utilizando diferentes definições de diâmetro médio para a Equação de MacDonald.	75
Tabela 19 - Hipóteses adotadas para o ajuste da constante B da Equação de Ergun.....	78

LISTA DE SÍMBOLOS

V_p	Volume da partícula (m^3)
S_p	Área da partícula (m^2)
ρ_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)
ρ_s	densidade dos sólidos (kg/m^3)
M_s	Massa de sólidos (kg)
d_p	Diâmetro de partícula (m)
S_s	Superfície total da amostra (m^2)
x_i	Fração Volumétrica (adimensional)
ε	Porosidade do leito (adimensional)
ΔP	Perda de carga (Pa)
L	Altura do leito (m)
$\bar{\varepsilon}$	Porosidade média
μ	Viscosidade do Fluido (kg/m.s)
f_p	Fator de fricção viscosa (adimensional)
Re_p	Número de Reynolds (adimensional) $Re_p = \rho_f \cdot d_p \cdot u / \mu$
A e B	Constantes
"a" e "b"	constantes

ΔP^*	Perda de carga adimensional
K_1, k_1, k_2	constantes
u_b	Velocidade <i>bulk</i>
D	Diâmetro interno do permeâmetro (m)
λ	Relação adimensional, $\lambda = D/d_p$
r	Posição radial (m)
z	Relação adimensional, $z = (D - r)/d_p$
ε_{inf}	Porosidade distante da parede (adimensional)
η	Viscosidade dinâmica
u_0	Velocidade superficial (m/s)
a_v	Área específica dinâmica do leito poroso (m ²)
τ	Tortuosidade do leito
Re	Número de Reynolds (adimensional) $Re_p = \rho_f \cdot d_p \cdot \phi \cdot u / \mu$
ϵ	Coefficiente de expansão
C	Coefficiente de vazão da placa
Fa	Fator de dilatação térmica da placa
E	Coefficiente de expansão isentrópica
Z	Leitura do manômetro no tubo inclinado
$P1$	Pressão na tubulação a montante da placa
$P2$	Pressão na tubulação a jusante da placa
Q	Vazão no permeâmetro
$Q1$	Vazão na tubulação a montante da placa
ReD	Número de Reynolds baseado no diâmetro interno da tubulação D
$\rho1$	Densidade do ar a montante da placa
B	Relação entre o diâmetro da placa de orifício e o diâmetro interno da tubulação. (adimensional)

K	constante
ρ_2	Densidade do ar a jusante da placa de orifício
T_1	Temperatura a montante da placa
T_2	Temperatura a jusante da placa
S_1	Área da seção transversal do tubo
Ret	Numero de Reynolds para partícula em queda livre ($=u_t \cdot d_p \cdot \mu^{-1}$)
u_t	Velocidade de uma partícula em queda livre ($m \cdot s^{-1}$)
S	Área específica da superfície das partículas (m^{-1})
$x_F, x_{1/2}, x_1, x_2, x_3$	Tipo de amostras de xisto betuminoso utilizadas

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Objetivo Geral	17
1.2	Objetivo Específico	17
2	Revisão Bibliográfica	18
2.1	O Processo Petrosix	18
2.2	Estruturação do leito fixo no interior da retorta	21
2.3	Propriedades dos Sistemas Particulados.....	22
2.3.1	Dimensão.....	22
2.3.2	Forma	24
2.4	Propriedades das distribuições de Partículas	24
2.4.1	Área Superficial.....	24
2.4.2	Diâmetro Médio Equivalente.....	25
2.4.3	Porosidade do leito	26
2.5	Fatores que influenciam a perda de carga.....	26
2.6	Modelos matemáticos para a predição de perda de carga em leitos fixos.....	27
2.6.1	Efeitos de Parede para Perda de Carga	34
2.6.2	Efeito da porosidade do leito	37
2.6.3	Influência da rugosidade da partícula	38
3	Materiais e Métodos	41
3.1	Módulo experimental utilizado nos experimentos.....	41
3.2	Descrição das amostras utilizadas.....	42
3.3	Caracterização do Sistema	44
3.3.1	Diâmetro médio das partículas	44
3.3.2	Esfericidade das partículas.....	44
3.3.3	Densidade.....	46
3.3.4	Porosidade do leito	46
3.4	Descrição dos testes.....	46
3.5	Procedimento Experimental	48
3.5.1	Cálculo da velocidade do ar.....	49
3.5.2	Cálculo da perda de carga.....	50
3.5.3	Critério para avaliação dos modelos.....	51

4 Resultados	52
4.1 Frações puras	52
4.1.1 Reprodutibilidade dos testes.....	52
4.1.2 Comparação entre experimentos conduzidos em permeâmetro de diferente diâmetros.....	53
4.1.3 Relação entre Variação de Pressão em função da velocidade do gás e modelos matemáticos aplicados.....	57
4.1.4 Equação de Ergun	60
4.1.5 Modelo de MacDonald	62
4.1.6 Modelo de Nemec e Levec	63
4.1.7 Modelo de Hicks	64
4.1.8 Modelo de Sawistowski.....	64
4.1.9 Comparação entre os Modelos Propostos.....	66
4.2 Misturas das diferentes faixas granulométricas	69
4.2.1 Reprodutibilidade dos testes.....	70
4.2.2 Cálculo da porosidade do leito em cada teste	72
4.2.3 Cálculo do diâmetro médio	73
4.2.4 Cálculo das constantes para o modelo de Ergun	78
5 Conclusões.....	83
6 Referências Bibliográficas	85

1 Introdução

Pesquisadores apontam ações a fim de diminuir a vulnerabilidade da oferta de petróleo e tentar controlar a alta do preço do barril, dentre as quais se destaca a transição de um sistema energético mundial pautado no petróleo para um eixo mais diversificado. Assim, a tendência mundial é a busca por fontes de energia não convencionais, sejam elas não renováveis, como o xisto, as areias oleosas, ou renováveis, como a energia solar ou eólica. Essa iniciativa tem como objetivos evitar a exaustão dos recursos energéticos, minimizar problemas ambientais, além de amenizar conflitos políticos (Hirsch *et al.* (2005)).

O xisto betuminoso, uma rocha que contém quantidades significativas de querogênio em sua composição, é indicado como uma fonte de energia alternativa. O querogênio, ao ser aquecido, decompõe-se formando óleo e gás.

No que se refere à questão econômica, em 2008, o petróleo produzido, a partir das tecnologias convencionais, teve um custo de produção em torno de US\$ 6,00/ barril, para o petróleo produzido no exterior, enquanto que, no Brasil, o custo de produção de um barril de óleo foi, em média, de US\$ 9,20 (Petrobrás a, 2010). O óleo de xisto produzido com a tecnologia nacional, por sua vez, apresenta um custo de US\$ 25,00 por barril produzido. (UNICAMP, 2004)

Com o objetivo de extrair o produto final, gás e óleo, do xisto betuminoso a um menor custo operacional, o presente trabalho foi proposto a fim de encontrar soluções para um dos problemas ligados ao processo de obtenção do querogênio. A utilização das partículas de pequenos diâmetros misturadas com partículas maiores tem sido apontada como uma solução para problemas de perda de carga e, por consequência para o consumo energético de compressão dos gases. Assim, serão realizados testes, com diferentes composições granulométricas de xisto, tendo como objetivo avaliar a perda de carga no sistema.

Foram utilizadas amostras de diferentes faixas granulométricas, condizentes com as utilizadas no Processo Petrosix, e, com os dados obtidos, foi possível desenvolver um modelo matemático para a perda de carga que pode ser comparado aos modelos contidos na literatura.

Constam na literatura inúmeros trabalhos sobre a predição da perda de carga em leitos fixos, mas não é possível afirmar, com total segurança, que existe um modelo capaz de se adequar a qualquer tipo de sistema.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho é desenvolver um modelo matemático que relacione a perda de carga em um leito de xisto com diferentes velocidades de passagem do ar, considerando a diferente composição granulométrica do leito.

1.2 Objetivo Específico

- Realizar testes com amostras de xisto betuminoso, com variações da faixa granulométrica a fim de obter a relação entre a perda de carga do leito fixo e velocidade do gás.
- Testar correlações de literatura para a perda de carga em leito fixo.
- Propor um modelo que melhor se adapte aos dados experimentais.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 O Processo Petrosix

A maior parte do xisto existente no Brasil pertence à Formação Irati, 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, explorada pela Petrobras, faz parte da formação Irati.

De forma geral, os principais depósitos de xisto situam-se em profundidades menores que 100 metros e estão distribuídos em camadas de espessuras variadas, com teores de querogênio, também, variados. Geralmente, o conteúdo de matéria orgânica dos depósitos de xisto oscila de 5 a 25%, como o da formação Irati em São Mateus do Sul, que possui em média, 9% de óleo (Petrobrás b, 2010).

Em 1954, a Petrobrás criou a Superintendência de Industrialização do Xisto, (Petrosix), cuja meta era desenvolver um processo com viabilidade técnica e econômica para processar o xisto nacional. Tal estratégia visava à minimização da importação de combustíveis líquidos. (Santos *et al*, 2010)

O processo Petrosix é representado em um diagrama esquemático conforme a Figura 1:

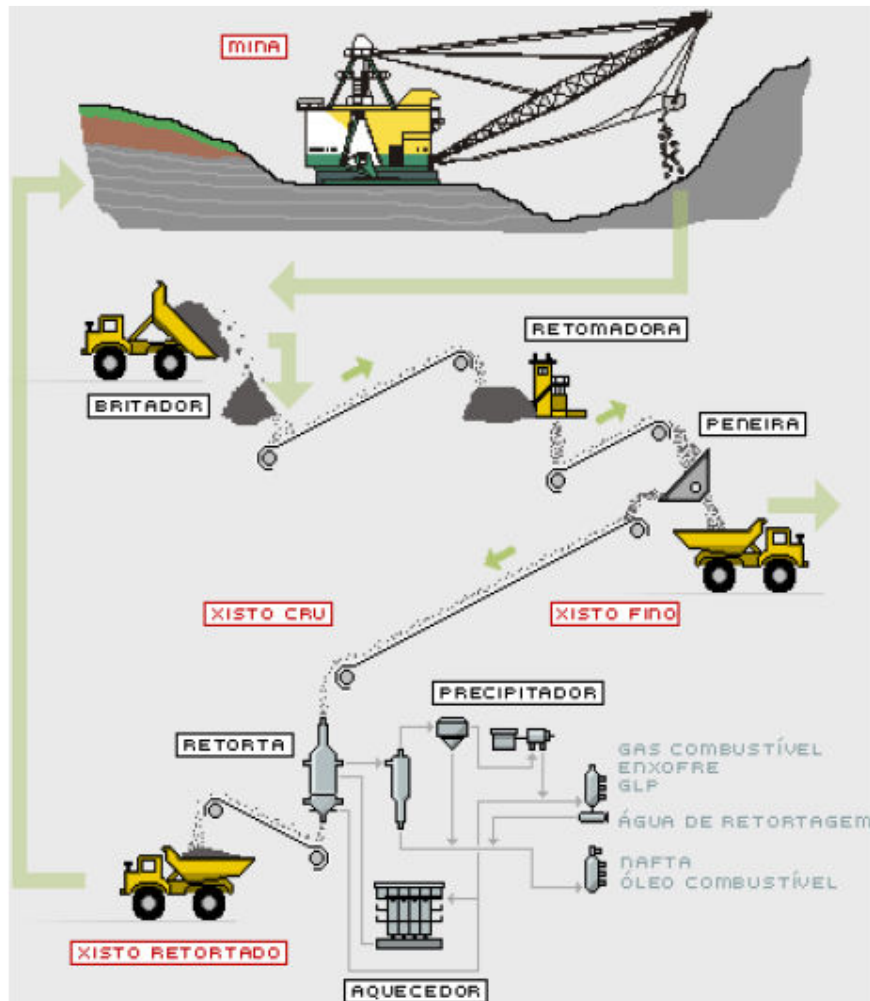


Figura 1- Processo Simplificado do Processo PETROSIX
 Fonte: Santos 2009

O xisto é extraído de minas e transportado até os britadores, que têm como função reduzir o minério a fragmentos menores, sendo então peneirados e separados segundo a sua faixa granulométrica. Em seguida, são alimentados de forma contínua em um reator cilíndrico vertical – chamado de retorta ou reator de pirólise – para serem aquecidos por correntes gasosas em altas temperaturas. O processo de pirólise, extração de querogênio utilizando calor, ocorre no interior da retorta a uma temperatura em torno de 500°C, em atmosfera isenta de oxigênio. O resíduo de xisto que sai da retorta depois do processo de pirólise contém ainda uma parcela ponderável de carbono hidrogênio e enxofre, esse resíduo é então conduzido a mina para reconstituir a estrutura geológica.

A deposição das partículas de xisto no interior da retorta constitui uma estrutura de leito fixo. Parâmetros como a taxa de transferência de calor e massa são de fundamental importância para o bom funcionamento do processo de pirólise.

O diagrama abaixo ilustra o funcionamento do reator de pirólise:

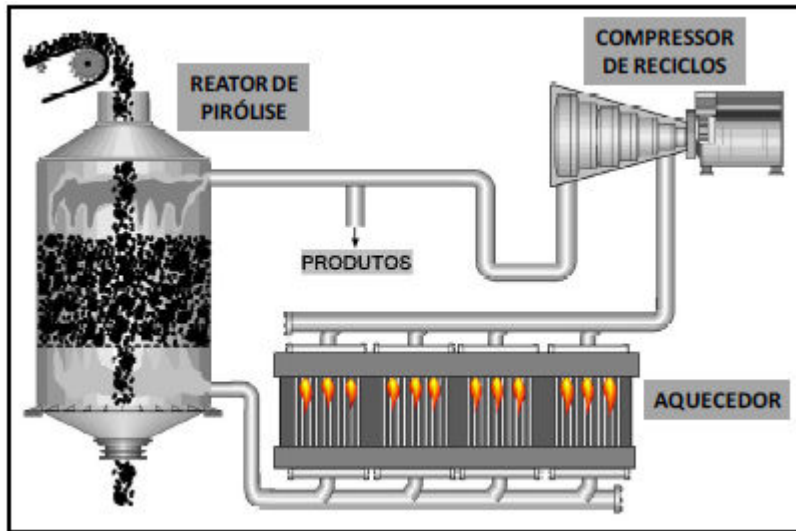


Figura 02 - Diagrama Esquemático do Processo de Pirólise
Fonte: Motta 2009

O processo de retortagem tem por objetivo a decomposição do betume e do querogênio que fazem parte da estrutura do xisto por meio da ação do calor, sendo que uma grande parte vaporiza na forma de hidrocarboneto gasoso (incluindo o gás hidrogênio). A matéria orgânica que permanece agregada é o carbono residual. Os gases resultantes do processo contêm vapor de água, hidrocarbonetos gasosos, gás sulfídrico, além de outros gases. Após o resfriamento, os hidrocarbonetos gasosos se condensam e formam o óleo (Motta, 2009).

Através desse processo, segundo relatório publicado pela empresa Petrobras, a produção diária de petróleo no estado do Paraná a partir do xisto gira em torno de 2.706 barris além da geração de 202 milímetros cúbicos de gás natural (Petrobrás c, 2011).

2.2 Estruturação do leito fixo no interior da retorta

Dados sobre a composição e a velocidade de decomposição do xisto em várias temperaturas são essenciais no projeto e funcionamento de retortas para a produção de petróleo com viabilidade econômica. Outros fatores que influenciam a taxa de decomposição de carbonatos são o tamanho da partícula, a estrutura molecular e a composição da atmosfera do meio (Jukkola, 1953).

Com relação ao tamanho das partículas, estas devem ser reduzida a um tamanho que facilite o processo de extração do querogênio. Como o custo do processo de redução de tamanho é elevado, deve-se fragmentar apenas o necessário evitando a formação de partículas muito finas.

Autores como Dannenberd e Matzick (1960) apresentaram que grandes partículas de xisto requerem um grande tempo de residência na zona de retorta, afetando a completa decomposição do querogênio, assim também como Harak *et al* (1974) e Dockter e Harak (1976) apresentaram que grandes blocos de xisto apresentam um rendimento bem inferior ao de partículas menores. Matzick *et al* (1966) apresentaram que o tamanho da partícula influencia na taxa de transferência de calor e na perda de carga no leito, fatores que interferem na conversão de querogênio e na difusão de produtos voláteis das partículas de xisto.

Bartke and Dunvall (1977) conduziram um estudo sobre os efeitos do tamanho das partículas no rendimento em um processo de retorta utilizando três tamanhos de partícula: 0,12 – 0,95; 0,32 – 1,27; e 0,95 – 1,9 milímetros. Concluíram que a quantidade de óleo produzida foi inversamente proporcional ao tamanho da partícula. Isso se deve ao fato de partículas menores possuírem maior área de contato por unidade de massa e pelas partículas menores reduzirem os espaços vazios no leito.

Utilizando as mesmas frações granulométricas, Motta (2009) desenvolveu o estudo da perda de carga em leito fixo de xisto betuminoso composto por até quarenta quilos de amostra.

Com base nas referências citadas, é possível concluir que, para o processo de pirólise, é mais indicado o uso de partículas com um pequeno diâmetro, porém, partículas menores tendem a diminuir a velocidade de passagem do gás através do

leito, aumentando o tempo de residência no interior da retorta. Custos com a mineração e peneiramento também devem ser considerados, pois, para partículas menores, esses custos se tornam maiores.

A fim de minimizar os efeitos causados pela diminuição do diâmetro das partículas durante a retortagem, são utilizadas partículas de tamanhos maiores. As partículas maiores apresentam baixa perda de carga, entretanto, há uma grande dificuldade para que o calor atinja o centro da partícula.

Alterações na distribuição granulométrica podem melhorar o processo. No entanto, deve ser avaliada a perda de carga do sistema e a possibilidade de arraste de partículas.

Outro fator a ser observado diz respeito à velocidade do gás que atravessa o leito, pois deve-se ajustá-la a fim de que a troca de calor entre o gás e o sólido seja a maior possível. Ao aumentar a velocidade do gás, a perda de carga no leito também aumenta, exigindo uma potência maior do compressor. Para avaliar as condições do processo, é necessário conhecer as características dos materiais que serão utilizados.

2.3 Propriedades dos Sistemas Particulados

Um estudo sobre a fluidodinâmica de partículas requer o conhecimento da reologia do fluido e das propriedades físicas da partícula, expressas pela densidade, dimensão e forma. (Allen, 1997)

2.3.1 Dimensão

Partículas regulares podem ser facilmente caracterizadas quanto à sua forma, enquanto partículas que apresentam uma superfície irregular necessitam de referências para serem definidas.

A Tabela 1 apresenta as diferentes formas de caracterizar o diâmetro de uma partícula com estrutura irregular, sendo V_p (volume da partícula) e S_p (área da partícula).

Tabela 1 - Caracterização do tamanho da partícula

símbolo	Nome	Definições	Equação
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	$F_D = C_D \rho_f \frac{u^2}{2} A$
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)	$d_{st}^2 = \frac{d_v^3}{d_a}$
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).

2.3.2 Forma

Para caracterizar a forma de uma partícula irregular, utiliza-se o conceito de esfericidade (ϕ), definida como o quociente entre a área superficial da esfera, que apresenta o mesmo volume da partícula (V_p), e a área superficial da partícula (S_p):

$$\phi = \frac{\text{Área superficial da esfera com mesmo volume da partícula}}{\text{Área superficial da partícula}}, \text{ ou} \quad (2.1)$$

$$\phi = \frac{\pi}{S_p} \left(\frac{6}{\pi} V_p \right)^{2/3}$$

A esfericidade é um fator de forma empírico que pode ser determinado por permeamtria. É a partícula esférica que apresenta o maior valor da esfericidade, $\phi = 1$. As partículas que ocorrem usualmente, como aquelas resultantes dos processos de moagem mais comuns na indústria, apresentam esfericidade na faixa de 0,5 a 0,7 (Massarani, 2002).

2.4 Propriedades das distribuições de Partículas

Como os testes foram conduzidos em leitos utilizando frações de xisto com diferentes faixas granulométricas, é necessário utilizar alguns conceitos para caracterizar o leito formado, entre eles, o número de partículas, a área superficial, o diâmetro médio das partículas e a porosidade do leito.

2.4.1 Área Superficial

Em uma amostra de partículas, é possível calcular o número de partículas (N_p) existentes no sistema a partir dos valores conhecidos de volume (V_s), densidade (ρ_s) e massa de sólidos (M_s).

$$N_p = \frac{M_s}{\rho_s V_s} \quad (2.2)$$

Para o cálculo da área superficial total da amostra (S_s) é utilizada a relação:

$$S_s = N_p \cdot S_p \quad (2.3)$$

2.4.2 Diâmetro Médio Equivalente

A maioria dos leitos utilizados industrialmente não apresenta uniformidade no tamanho das partículas. Na Tabela 2 são citadas as definições de diâmetros médios.

Tabela 2 - Definição de diâmetro médio para distribuições de partículas.

Diâmetro Médio Aritmético	Soma de todos os diâmetros divididos pelo número de partículas. $\bar{d}_a = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} N_{pi} d_i}{\sum_{i=1}^{N_p} N_{pi}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} N_{pi} d_i}{N_p}$
Diâmetro Mediano	Diâmetro que divide a quantidade de partículas em duas partes iguais. $\frac{d_1}{2}$
Diâmetro Modal	Diâmetro que ocorre com maior frequência \bar{d}_M
Diâmetro Médio Superficial - Volumétrico ou Diâmetro de Sauter	Média baseada na superfície específica por unidade de volume $\bar{d}_{sv} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i}}$, se o número de partículas é conhecido: $\bar{d}_{sv} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} N_{pi} d_i^3}{\sum_{i=1}^{N_p} N_{pi} d_i^2}$
Diâmetro Médio de Massa, ou Diâmetro de DeBroucker	Ponderação dos diâmetros em termos de massa $\bar{d}_w = \sum_{i=1}^n x_i d_i$
Diâmetro Médio Volumétrico	Dividindo-se o volume total de uma amostra pelo número de partículas, obtêm-se o volume médio de uma partícula. O diâmetro de tal partícula é o diâmetro médio volumétrico: $\bar{d}_v = \sqrt[3]{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i^3}}}$
Diâmetro Médio Superficial	Similar ao anterior $\bar{d}_s = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i^2}}}$
Diâmetro Médio Linear	Dividindo a área total pelo somatório dos diâmetros $\bar{d}_l = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} N_{pi} d_i^2}{\sum_{i=1}^{N_p} N_{pi} d_i}$
Diâmetro Médio Geométrico	A enésima raiz do produto dos diâmetros das N_p partículas medidas: $\bar{d}_g = N_p \sqrt{d_1 d_2 d_3 \dots d_n}$, ou, $\log \bar{d}_g = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} N_{pi} (\log d_i)}{\sum_{i=1}^{N_p} N_{pi}}$
Diâmetro Médio Harmônico	O inverso do diâmetro medido $\frac{1}{\bar{d}_h} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} (N_{pi} / d_i)}{\sum_{i=1}^{N_p} N_{pi}}$

Fonte: Adaptado de LAMBOURNE, STRIVENS (1999)

2.4.3 Porosidade do leito

Representa a fração de espaços vazios no leito. É expressa pela relação:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\text{volume dos sólidos}}{\text{volume total do leito}} \quad (2.4)$$

Conhecidos os parâmetros que definem a estruturação do leito fixo é possível então avaliar a perda de carga durante o processo de pirólise no interior da retorta.

2.5 Fatores que influenciam a perda de carga

A determinação da perda de carga em um leito fixo depende de vários parâmetros. Por isso, é necessário determinar a interação entre eles:

- Porosidade
- Diâmetro de partícula
- Comprimento do leito
- Esfericidade das partículas
- Velocidade do fluido através do leito

A porosidade representa a quantidade de espaços vazios existentes no leito; caso haja uma grande quantidade desses espaços, haverá formação de caminhos preferenciais que apresentam menor resistência ao fluxo do gás, distorcendo o valor da perda de carga obtida. A fim de minimizar esse efeito é necessário que haja um cuidado maior na confecção do leito, colocando as partículas de forma organizada.

Partículas esféricas são facilmente caracterizadas devido ao conhecimento sobre sua área superficial. Como frequentemente são utilizadas partículas irregulares, então são obtidos dados de esfericidade e fator de forma para calcular seu volume e área superficial.

Tendo todas as informações necessárias à caracterização do leito, geralmente são utilizados modelos matemáticos para o predizer o comportamento do sistema.

2.6 Modelos matemáticos para a predição de perda de carga em leitos fixos

Reatores de leitos fixos são amplamente utilizados na indústria por apresentarem um alto potencial de transferência de calor e massa. O conhecimento da perda de carga através de um leito de partículas é de suma importância para atingir a máxima eficiência em muitas aplicações, como por exemplo em processos de secagem, pirólise, gaseificação e combustão.

O fluxo através de leitos empacotados de esferas tem sido extensivamente estudado. Em particular, aspectos sobre variação da perda de carga, perfis de porosidade e efeitos da proporção geométrica do leito têm sido frequentemente discutidos. Embora na opinião de muitos engenheiros e pesquisadores, esse assunto seja considerado quase "exaustivamente" estudado, muitos pontos ainda precisam ser analisados. De fato, o conhecimento disponível é bastante fragmentado. Por exemplo, a relação entre a estrutura do leito e o comportamento do fluxo não é completamente conhecida. No sentido prático da Engenharia Química, não há equação universal para a predição de perda de carga que seja totalmente confiável (Montillet, 2006).

Segundo Montillet (2006), para representar a perda de carga em um leito, é preciso incluir parâmetros que definem a porosidade do leito e a geometria das partículas.

Para predizer a perda de carga geralmente são testados diferentes modelos citados na literatura e avaliada a capacidade que possuem de reproduzir os dados experimentais com uma baixa margem de erros.

Um dos estudos pioneiros nessa área foi desenvolvido por Carman (1937), que propôs o seguinte modelo para a predição de perda de carga:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\rho_f \cdot u^2}{d_p} \frac{6^{3-n} k (1 - \bar{\epsilon})^{3-n}}{Re_p^{2-n} \bar{\epsilon}^3} \quad n = 1, k = 5 \quad (2.5)$$

em que:

ρ_f	densidade do fluido
d_p	Diámetro de partícula
ΔP	Perda de carga
L	Comprimento do leito
u	Velocidade do fluido
Re_p	Número de Reynolds da partícula
ε	Porosidade do leito

Em sua equação, Carman (1937) não considera a perda de carga devido ao efeito da presença da parede.

Desde então, muitos modelos foram propostos, mas o mais extensivamente usado, é o proposto por Ergun (1952). A equação de Ergun foi proposta com base em 640 experimentos em esferas de diferentes diâmetros, partículas de areia e coque, e na faixa de Reynolds de 0,4 a 1000 (COMITI, 1989). Assim sendo:

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

Em que:

μ	Viscosidade do fluido
ϕ	Esfericidade da partícula

O primeiro termo da equação 2.6 é principalmente relacionado à perda por energia viscosa, enquanto o segundo termo refere-se à perda de energia cinética (Leva, 1959).

A equação de Ergun apresenta melhores resultados para sistemas formados por partículas do mesmo tamanho. Entretanto, quando as partículas não são iguais, uma média do tamanho de partícula deve ser calculada (Keyser 2006).

A aplicação da equação de Ergun com as constantes originais foi questionada por Sawistowski (1957), que comparou o resultado fornecido pela equação de Ergun e o obtido experimentalmente utilizando um leito constituído de partículas irregulares. Segundo Sawistowski (1957), como a equação de Ergun apresentou

valores bem menores que os esperados, o autor propôs então um modelo para prever a perda de carga em um leito de partículas irregulares:

$$\frac{\Delta P}{L} = \left(\frac{\rho_f \cdot u^2 \cdot S \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \right) (5Re_{.1}^{-1} + Re_{.1}^{-0.1}) \quad (2.7)$$

Em que

$$Re_{.1} = \frac{u \cdot \rho_f}{S(1 - \varepsilon) \cdot \mu} \quad (2.8)$$

A equação (2.7) caracteriza a estrutura em função da sua área específica, definição apresentada na equação (2.9).

$$S = \frac{\text{Área da partícula}}{\text{Volume da partícula}} \quad (2.9)$$

Montillet (2004) avaliou o fluxo através de um leito de esferas, em regime laminar até o turbulento, e concluiu que, para um intervalo muito grande de Reynolds e especialmente regimes com um alto valor de Reynolds, a perda de carga não pode ser corretamente expressa como uma função do tipo:

$$\frac{|\Delta P|}{L} = A \cdot u + B \cdot u^2 \quad (2.10)$$

Foram sugeridas então equações, tais como as propostas por Rose (1945):

$$f_p = [1000Re_p^{-1} + 60Re_p^{-0.5} + 12] \quad (2.11)$$

e Rose e Rizk (1949):

$$f_p = [1000Re_p^{-1} + 125Re_p^{-0.5} + 14] \quad (2.12)$$

Em que o fator de fricção da partícula (f_p) é definido como sendo:

$$f_p = \frac{|\Delta P| \cdot d_p}{L \cdot \rho_f \cdot u^2} \quad (2.13)$$

e o número de Reynolds (Re_p), calculado pela equação:

$$Re_p = \frac{\rho_f \cdot u \cdot d_p}{\mu} \quad (2.14)$$

Em seus trabalhos, Rose (1945) e Rose e Rizk (1949) apontam o efeito da porosidade do leito e da geometria da partícula, mas não incluem os efeitos desses dois parâmetros na variação da resistência relativa. Outros trabalhos, como o proposto por Hicks (1970), incluem a influência da porosidade do leito:

$$f_p = 6,8 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^{1,2}}{\varepsilon^3} \cdot Re_p^{-0,2} \quad (2.15)$$

A equação proposta por Hicks é válida para uma faixa de Reynolds entre 500 e $6 \cdot 10^4$. Em seu estudo, o autor salienta a variação dos parâmetros A e B da equação de Ergun segundo o número de Reynolds, ou seja, os valores de 150 e 1,75 propostos por Ergun não são constantes, e sim, funções do número de Reynolds, porosidade, ou forma da partícula. Por esse motivo, é necessário incluir a influência de todos esses fatores nos modelos matemáticos para que o resultado obtido seja o esperado.

Outro fator importante a ser considerado, é a análise de abrangência da faixa de Reynolds. A equação de Ergun tem sua aplicação limitada na faixa $10^{-1} < Re < 10^3$. Tallmadge(1970) desenvolveu estudos voltados ao ajuste dos parâmetros da equação de Ergun para que essa equação fosse válida em altos valores de Reynolds, resultando na equação:

$$f = \frac{150}{N_{Re}} + \frac{4,2}{N_{Re}^{1/6}} \quad (2.16)$$

em que os termos f e N_{Re} são fatores adimensionais definidos como sendo:

$$f = \frac{\Delta P}{L} \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)} \frac{d_p \phi}{\rho_f \cdot u^2} \quad (2.17)$$

$$N_{Re} = \frac{(d_p \cdot \phi) \cdot \rho_f \cdot u}{(1 - \varepsilon) \cdot \mu} \quad (2.18)$$

Esse modelo é válido para a faixa $10^{-1} < N_{Re} < 10^5$.

Com o propósito de avaliar a influência do tipo de regime durante o processo, Foscolo, Gibilaro e Waldram (1983) desenvolveram modelos matemáticos para a predição da perda de carga em leito fluidizado que fosse capaz de descrever a expansão em função da velocidade superficial na condição inicial (leito fixo) até a condição em que as partículas estivessem totalmente expandidas (leito fluidizado). Para o regime laminar:

$$\frac{\Delta P}{L} = 17,3 \cdot \frac{\mu \cdot u}{d_p^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^{4,8}} \quad (2.19)$$

Para o regime turbulento:

$$\frac{\Delta P}{L} = 0,366 \cdot \frac{\rho_f \cdot u^2}{d_p} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^{4,8}} \quad (2.20)$$

Para o regime intermediário, no intervalo compreendido entre $500 > Re_t > 0,2$; foi realizada a soma das duas contribuições:

$$\frac{\Delta P}{L} = 17,3 \cdot \frac{\mu \cdot u}{d_p^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^{4,8}} + 0,366 \cdot \frac{\rho_f \cdot u^2}{d_p} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^{4,8}} \quad (2.21)$$

Em seus estudos, foram utilizadas partículas esféricas, sendo assim, para o trabalho em questão foi introduzida a definição do termo esfericidade para que o modelo fosse adaptado ao sistema utilizado.

Nemec e Levec (2005) utilizaram dados experimentais de um sistema gás-sólido para ajustar os parâmetros “a” e “b” da Equação de Ergun. Propuseram, então, estes parâmetros como sendo dependentes da esfericidade da partícula:

$$a = \frac{150}{\phi^2} \quad (2.22)$$

$$b = \frac{1,75}{\phi^3} \quad (2.23)$$

Alterando o valor das constantes de Ergun, o modelo proposto por Nemec e Levec (2005) torna-se:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 (1 - \varepsilon)^2}{\phi^2 \varepsilon^3} \frac{\mu \cdot u}{(d_p \phi)^2} + \frac{1,75 (1 - \varepsilon) \rho_f \cdot u^2}{\phi^3 \varepsilon^3 d_p \cdot \phi} \quad (2.24)$$

Ozahi *et al* (2008) conduziram um estudo a fim de avaliar o uso das constantes de Ergun para partículas não esféricas. O leito fixo foi composto por partículas não esféricas e partículas esféricas para melhor compreender o efeito da esfericidade, do tamanho da partícula e da porosidade do leito na perda de carga.

Para ajustar a equação de Ergun, é utilizado o fator de fricção da partícula (f_{part}), como função de Re_p , ε , e D/d_{part} . Com o propósito de utilizar apenas termos adimensionais, os autores ajustaram a equação de Ergun conforme se segue:

$$\frac{\Delta P}{L} = \left(150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu \cdot u}{(d_p \cdot \emptyset)^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon) \rho_f \cdot u^2}{\varepsilon^3 d_p \cdot \emptyset} \right) \frac{1}{1/2 \cdot \rho_f \cdot u^2} \quad (2.25)$$

Sabendo que $Re_p = (d_p \cdot \rho_f \cdot u) / ((1 - \varepsilon) \cdot \mu)$ e substituindo na equação 2.25:

$$\frac{\Delta P}{\left(\frac{1}{2 \rho_f \cdot u^2} \right)} = \left(150 \frac{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_f \cdot u^2}{\varepsilon^3 \cdot Re_p \cdot d_p \cdot \emptyset^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon) \rho_f \cdot u^2}{\varepsilon^3 d_p \cdot \emptyset} \right) \frac{L}{1/2 \cdot \rho_f \cdot u^2} \quad (2.26)$$

Definindo ΔP^* como fator adimensional em função da perda de carga :

$$\Delta P^* = \frac{\Delta P}{\left(\frac{1}{2 \cdot \rho_f \cdot u^2} \right)} \quad (2.27)$$

e substituindo na Equação 2.26:

$$\frac{\Delta P^*}{2} = \left(150 \frac{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_f \cdot u^2}{\varepsilon^3 \cdot Re_p \cdot d_p \cdot \emptyset^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon) \rho_f \cdot u^2}{\varepsilon^3 d_p \cdot \emptyset} \right) \frac{L}{\rho_f \cdot u^2} \quad (2.28)$$

Simplificando:

$$\frac{\Delta P^*}{2} = 150 \cdot L \frac{(1 - \varepsilon)}{\rho_f \cdot u^2 \cdot \varepsilon^3 \cdot Re_p \cdot d_p \cdot \emptyset^2} + 1,75 L \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 \cdot d_p \cdot \emptyset} \quad (2.29)$$

Colocando em termos adimensionais:

$$\left(\frac{\Delta P^*}{2} \right) \left(\frac{d_p}{L} \right) \left(\frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)} \right) \emptyset^2 = \frac{150}{Re_p} + 1,75 \emptyset \quad (2.30)$$

$$f_p^* = \frac{150}{Re_p} + 1,75 \emptyset \quad (2.31)$$

onde as constantes empíricas 150 e 1,75 são validas apenas para partículas esféricas.

Uma nova abordagem baseada no uso de f_p^* pode ser usada eficientemente para o cálculo de perda de carga em leito com um pequeno desvio. A equação abaixo é uma equação polinomial de primeira ordem que relaciona $f_p^* Re_p$ e $Re_p \phi^2$:

$$f_p^* = \frac{276}{Re_p} + 1,76 \cdot \phi^2 \quad (2.32)$$

A equação de Ergun também pode ser adaptada para o cálculo de partículas não esféricas:

$$f_p^* = \frac{160}{Re_p} + 1,61 \cdot \phi \quad (2.33)$$

Em seu estudo, os autores (Ozahi *et al*, 2008) desenvolveram um trabalho voltado para a simplificação de obtenção de f_p^* na prática. Um estudo foi conduzido para avaliar a influência entre os parâmetros do leito; ε , d_p , L , ϕ e o fluxo dinâmico no leito, utilizando os fatores adimensionais ΔP^* e Re_p , além de introduzirem o número de Reynolds de saída como uma alternativa ao Re_p :

$$Re_{exit} = \frac{u \cdot D_e \cdot \rho_f}{\mu} \quad (2.34)$$

em que $D_e = (D^2 \cdot \varepsilon)^{1/2}$ foi definido como equivalente ao diâmetro do leito para o fluxo de ar. Propuseram, então, o seguinte modelo:

$$\Delta P^* = 139,57 \left[Re_p \cdot \left(\frac{d_p}{L} \right) \cdot \varepsilon^7 \right]^{-0,4733} \quad (2.35)$$

Sendo o Reynolds de saída definido como :

$$Re_{exit} = 3097,1 \left[Re_p \left(\frac{d_p}{L} \right) \right]^{0,1726} \quad (2.36)$$

Simplificando, obtem-se:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{2 \cdot \rho_f \cdot u^2 \cdot 139,57}{L \left[\text{Re}_p \left(\frac{d_p}{L} \right) \varepsilon^7 \right]^{0,4733}} \quad (2.37)$$

Com base nos estudos realizados sobre a perda de carga em leitos fixos, pode-se concluir que fatores como a porosidade do leito, tamanho e a esfericidade da partícula são importantes para a caracterização de sistemas similares ao utilizados em processos de extração de querogênio a partir de xisto. Para quantificar de modo confiável a perda de carga, a análise da influencia da parede do leito no sistema torna se necessária.

2.6.1 Efeitos de Parede para Perda de Carga

Quando o diâmetro do leito não é significativamente maior que o tamanho das partículas, a distribuição do fluxo no interior do leito e o atrito causado entre o fluido e a parede são fatores não negligenciáveis, pois geram diferenças na perda de carga do leito que podem comprometer o desenvolvimento do projeto do reator.

Em leitos empacotados, as partículas são finitamente empacotadas pelo confinamento imposto pela parede, fator que contribui para o aumento da superfície de contato entre as partículas e o fluido, e aumenta a porosidade local perto da parede (Yong *et al*, 2008).

Zhavoronkov *et al.* (1949) avaliaram a influência da parede na perda de carga e propuseram o modelo:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\rho_f \cdot u^2}{d_p} \left(\frac{A}{\text{Re}_p} \frac{(1 - \bar{\varepsilon})^2}{\bar{\varepsilon}^3} + B \frac{(1 - \bar{\varepsilon})}{\bar{\varepsilon}^3} \right) \quad (2.38)$$

em que:

$$A = 165,35 \cdot (A_w)^2$$

$$B = 1,2 \cdot B_w$$

$$A_w = B_w = 1 + \frac{1}{2 \left(\frac{D}{d_p} \right) (1 - \bar{\varepsilon})}$$

sendo A_w e B_w fatores de correção para o efeito de parede.

Eisfeld e Schnitzlein (2001) avaliaram a influência de paredes na perda de carga e concluíram que a presença de limites externos conduz a um aumento da perda de carga no regime laminar, enquanto que, no regime turbulento, a queda de pressão pode ser reduzida, se comparada a um leito de dimensões infinitas. Este comportamento é explicado pelo atrito entre as paredes e o fluido e pelo aumento da porosidade local perto das paredes; sendo assim, o efeito descrito torna-se dependente do número de Reynolds.

Autores como Reichelt (1972) também corrigiram o efeito de parede. Este autor propôs o modelo apresentado na equação 2.39, citado por Eisfeld e Schnitzlein (2001) como sendo a mais promissora correlação para prever o comportamento de leitos fixos:

$$\frac{\Delta P}{L} \frac{d_p}{\rho_f \cdot u^2} = \frac{K_1 \cdot A_w^2 (1 - \bar{\epsilon})^2}{Re_p \bar{\epsilon}^3} + \frac{A_w (1 - \bar{\epsilon})}{B_w \bar{\epsilon}^3} \quad (2.39)$$

sendo as constantes definidas como:

$$K_1 = 154$$

$$A_w = 1 + \frac{2}{3 \cdot \left(\frac{D}{d_p}\right) \cdot (1 - \bar{\epsilon})}$$

$$B_w = \left[k_1 \left(\frac{d_p}{D}\right)^2 + k_2 \right]^2, k_1 = 1,15 \text{ e } k_2 = 0,87$$

Di Felice *et al.* (2004) observaram a influência do efeito de parede na perda de carga em leito fixo e comentam que as suposições que a velocidade do fluido é constante e a distribuição da porosidade do leito é homogênea não é verdadeira perto das paredes do recipiente, onde as partículas tendem a ter um arranjo diferente. Para a maioria dos casos práticos de interesses, a região de parede representa uma fração suficientemente pequena em relação a todos os efeitos do leito que pode ser desprezada. Os autores apresentaram um trabalho em que a relação do diâmetro do leito com o diâmetro da partícula era de aproximadamente cinco. Abaixo dessas condições, desvios significativos na perda de carga de uma predição baseada na hipótese de um leito homogêneo têm sido relatados. Isso leva a uma resolução simples para o problema, permitindo que a equação de Ergun seja

diretamente aplicada na região *bulk* do leito, contornando, assim, incertezas associadas às condições fluidodinâmicas na região perto da parede. Propuseram a seguinte correlação para o cálculo da velocidade na região *bulk*:

$$u_b = \frac{u}{2,06 - 1,06 \cdot \left(\frac{\left(\frac{D}{d_p} \right) - 1}{\left(\frac{D}{d_p} \right)} \right)^2} \quad (2.40)$$

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 das relações de Ergun padrão.

Em seus estudos, Montillet *et al.* (2006) avaliaram a reprodutibilidade dos modelos citados na literatura. Utilizaram esferas de diferentes tamanhos, minimizando qualquer efeito secundário de perda de carga. Para cada ajuste de dados, uma ampla faixa de Reynolds foi testada usando diferentes fluidos, como água e glicerol.

Os dados obtidos foram modelados com uma equação na forma:

$$f_{\text{part}} = \alpha [1000 (\text{Re}_p)^{-1} + 60 (\text{Re}_p)^{-0,5} + 12] \quad (2.41)$$

$$\text{com } \alpha \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{D}{d_p} \right) = a \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \left[\frac{D}{d_p} \right]^b \quad (2.42)$$

em que α é considerado um valor constante para um dado leito e as constantes “a” e “b” são parâmetros de ajuste, sendo que “a” depende da natureza do leito.

A equação proposta por Montillet *et al.* (2006) para predição de perda de carga em leito de esferas é apresentada na equação 2.43:

$$f_{\text{part}} = a \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \left[\frac{D}{d_p} \right]^{0,2} [1000 (\text{Re}_p)^{-1} + 60 (\text{Re}_p)^{-0,5} + 12] \quad (2.43)$$

com a igual a 0,061 para leitos fixos e a assume o valor 0,05 para leito fluidizado.

A relação entre o diâmetro do leito e o diâmetro da partícula deve estar na faixa compreendida entre 3,8 até aproximadamente 40 ou 50, e o número de Reynolds deve ser no mínimo 10 e no máximo 2500.

Para $D/d_p > 50$, a influência da geometria da partícula é desprezível, desta forma o termo $(D/d_p)^{0,2}$ pode ser estimado como sendo igual a 2,2.

É possível concluir, com base nos artigos citados, que a perda de carga pode aumentar pelo atrito com a parede ou diminuir devido a um aumento na porosidade perto da parede, e que a predominância de um efeito sobre o outro depende do tipo de regime desenvolvido pelo fluido.

2.6.2 Efeito da porosidade do leito

A maioria das equações utilizadas para a predição de perda de carga reflete a alta dependência com a porosidade do leito, mas, cabe salientar que leitos compostos com a mesma quantidade de partículas iguais podem apresentar constantes diferentes. Isso deve-se ao fato de a porosidade do leito não ser a mesma, ou seja, houve um empacotamento diferente das partículas.

Para determinar a porosidade de leitos são utilizadas algumas correlações, tais como o modelo proposto por Jeschar (1964):

$$\bar{\varepsilon} = 0,375 + \frac{0,34}{\lambda} \quad (2.44)$$

em que λ é expresso como sendo a relação adimensional entre o diâmetro do tubo e o diâmetro da partícula.

Além de Jeschar, de Klerk (2003) propôs um modelo para a determinação do perfil radial da porosidade, pois a porosidade não é constante ao longo do leito, ou seja, quanto mais longe da parede maior será a desorganização das partículas:

$$\varepsilon(r) = \begin{cases} 2,14 z^2 - 2,53z + 1 & z \leq 0,637 \\ \varepsilon_{inf} + 0,29 \exp(-0,6z) [\cos(2,3\pi(z - 0,16))] + 0,15 \exp(-0,9z) & z > 0,637 \end{cases} \quad (2.45)$$

em que “z”, na equação representa a distância da parede em relação ao diâmetro da partícula, ou seja:

$$z = \frac{(D - r)}{d_p} \quad (2.46)$$

Sendo as variáveis definidas como:

ε_{inf} = porosidade do leito distante da parede

D = diâmetro do tubo

r = posição radial, sendo z um parâmetro adimensional.

Assim, a porosidade média do leito é definida como sendo:

$$\bar{\varepsilon} = 0,41 + 0,35\exp(-0,39\lambda) \quad (2.47)$$

Essa correlação é capaz de definir a porosidade do leito em regiões perto e longe da parede e aplica-se a empacotamentos densos e irregulares.

2.6.3 Influência da rugosidade da partícula

Na prática, a maioria das partículas utilizadas em leitos fixos não apresenta uma superfície regular. Então, para aplicar os modelos clássicos de perda de carga são necessárias correções que incluam o efeito da rugosidade da partícula. Macdonald *et al.* (1979) avaliaram esse efeito e propuseram a seguinte relação a partir da equação de Ergun:

$$\frac{\Delta P}{L} = A \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu \cdot u}{(d_p)^2} + B \frac{(1 - \varepsilon) \rho_f \cdot u^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (2.48)$$

Rearranjando a Equação:

$$\frac{\Delta P}{L} \frac{d_p}{\rho_f \cdot u^2 (1 - \varepsilon)} = A \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu \cdot u}{(d_p)^2} \frac{d_p}{\rho_f \cdot u^2 (1 - \varepsilon)} + B \quad (2.49)$$

Definindo os termos como sendo:

$$F_k' = - \frac{\Delta P}{L \cdot \rho_f \cdot u^2} d_p \quad (2.50)$$

$$N_{Re}' = \frac{\rho_f \cdot u \cdot d_p}{\mu} \quad (2.51)$$

Resultando assim:

$$F_k' \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)} = A \frac{(1-\varepsilon)}{N_{Re}'} + B \quad (2.52)$$

De uma forma geral, a equação acima não abrange uma faixa ampla de porosidades. Assim, os autores fizeram restrições considerando a superfície da partícula. Para partículas lisas:

$$F_k' \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)} = 180 \frac{(1-\varepsilon)}{N_{Re}'} + 1,8 \quad (2.53)$$

Para partículas rugosas:

$$F_k' \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)} = 180 \frac{(1-\varepsilon)}{N_{Re}'} + 4,0 \quad (2.54)$$

em que o parâmetro B é assumido como sendo uma função da partícula ou rugosidade da superfície, cujos valores variam entre 1,8 e 4,0.

Comiti e Renaud (1989) discutiram sobre a aplicação da equação de MacDonald, afirmando ser esta questionável por causa do tipo de empacotamento e por a estrutura apresentar duas particularidades:

- (1) Uma parte significativa da superfície das partículas não pode ser alcançada pelo fluxo porque elas se sobrepõem mutuamente.
- (2) Especialmente para os leitos fortemente empacotados em uma coluna vertical cilíndrica, a orientação principal das partículas é praticamente horizontal e a estrutura se acomoda em camadas. Nessa condição, o caminho do fluido para uma dada espessura é maior por este tipo de leito do que através de leitos de partículas isotrópicas.

Propuseram, então, um novo modelo, incluindo as correções para efeito de parede:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot u_0} = M^* u_0 + N^* \quad (2.55)$$

em que:

$$M^* = \left\{ \left[1 - 0,0413 \left(1 - \frac{d_p}{D} \right)^2 \right] + 0,0968 \left(1 - \frac{d_p}{D} \right)^2 \right\} \tau^3 \cdot \rho_f \cdot a_{vd} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (2.56)$$

e:

$$N^* = 2 \cdot \eta \cdot \tau^2 \cdot a_{vd}^2 \left[1 + \frac{4}{a_{vd} \cdot D \cdot (1 - \varepsilon)} \right]^2 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (2.57)$$

sendo definidos:

u_0 = velocidade superficial

η = viscosidade dinâmica

a_{vd} = é a superfície específica dinâmica do leito poroso, definição apresentada na equação 2.58.

$$a_{vd} = \frac{\text{area superficial de contato com o fluido}}{\text{volume de sólidos}} \quad (2.58)$$

para calcular a tortuosidade do leito (τ), é utilizada a equação:

$$\tau = 1 + 0,58 \exp\left(0,18 \frac{a}{e}\right) \ln(1/\varepsilon) \quad (2.59)$$

sendo (e) a espessura da partícula e (a) seu comprimento na equação 2.59.

Vários são os modelos propostos, mas nenhum deles é capaz de descrever com precisão a perda de carga em um leito fixo composto de partículas irregulares. Neste trabalho, serão aplicados, os modelos citados a fim de avaliar aquele que apresente o menor desvio em relação aos dados experimentais coletados.

3 Materiais e Métodos

3.1 Módulo experimental utilizado nos experimentos

A Figura 03 apresenta os detalhes do permeâmetro utilizado nos testes. O ar é impulsionado por um soprador (1) e tem sua vazão ajustada pela válvula (2). O ar percorre o duto (3), constituído de aço carbono com diâmetro interno de 0,5 metros. A medição da velocidade do ar foi feita com o auxílio de uma placa de orifício instalada no comprimento do tubo (4). O ar atmosférico percorre o duto até atingir o distribuidor de gás (5). A fim de evitar que partículas menores não ficassem retidas no distribuidor, foi colocada uma tela no fundo. Em seguida, o ar percola por entre as partículas de xisto que constituem o leito no interior do permeâmetro de 59,5 cm de diâmetro interno (6) e retorna para a atmosfera (7). Os manômetros utilizados (8) encontram-se dispostos sobre a mesma superfície.

O manômetro que registra a velocidade do gás a partir do uso da placa de orifício apresenta inclinação de 15° e é formado por um bulbo de diâmetro 0,028 metros, enquanto o manômetro utilizado para a previsão de perda de carga no distribuidor apresenta inclinação de 12° e bulbo de diâmetro interno 0,017 metros. A medição nos manômetros é feita em tubos conectados aos bulbos, sendo que ambos apresentam diâmetro interno de 0,00237 metros e possuem água em seu interior, devido ao fato da água apresentar menores variações de volume com variações de temperatura. Para o perfeito funcionamento dos manômetros, é necessário o estabelecimento do nível; assim com o auxílio de uma mangueira em U (9), é possível verificar se o equipamento está na posição horizontal.

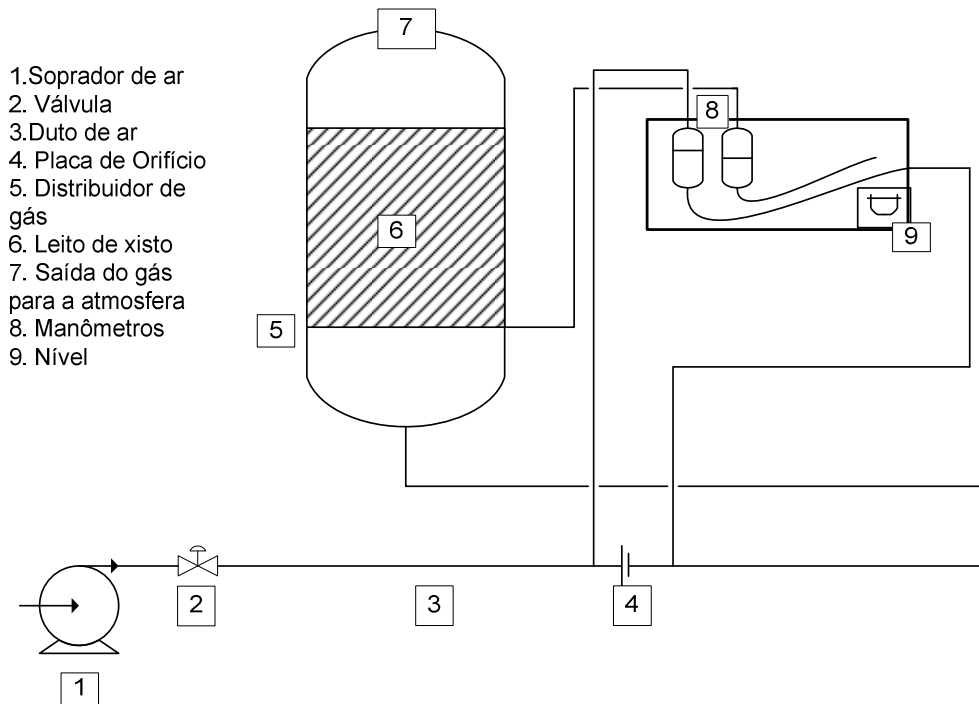


Figura 3 - Diagrama Esquemático do Equipamento utilizado para os testes

A placa de orifício do tipo concêntrica foi instalada no comprimento livre do duto de ar para minização de efeitos de entrada e de saída. O ar que escoava pelo leito foi mantido à temperatura ambiente.

3.2 Descrição das amostras utilizadas

As amostras de xisto foram coletadas pela empresa Petrobrás da bacia de Irati, em São Mateus do Sul. Após serem coletadas, as amostras de xisto foram encaminhadas a britadores, nos quais tiveram seu tamanho reduzido. Para ajustar às faixas granulométricas requeridas, as partículas passaram por um sistema de peneiras vibratórias. Após a preparação das amostras, as mesmas foram transportadas de São Mateus do Sul para Curitiba, onde foram feitos os experimentos.

Quanto à distribuição granulométrica, as amostras foram divididas em cinco faixas, diferenciadas com o auxílio de peneiras do tipo Tyler. As amostras maiores ficaram retiradas na peneira de abertura nominal de 3 polegadas e foram chamadas de x_3 . Assim as amostras seguintes receberam a mesma nomenclatura, ou seja, x_2

representa as amostras que foram retiradas na peneira de 2 polegadas, x_1 e $x_{1/2}$ nas peneiras de 1 e 0,5 polegadas respectivamente. As amostras que passaram pela peneira de 0,5 polegadas foram chamadas de x_f .

Na Tabela 3 estão listadas as informações das aberturas das peneiras que foram utilizadas:

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

Designação da peneira		Abertura da peneira		Diâmetro Nominal do fio	
Padrão	Substitutivo	(mm)	(in) aprox.	(mm)	(in) aprox.
76,1mm	3 in	76,1	3,00	5,80	0,2283
50,8 mm	2 in	50,8	2,00	5,05	0,1988
25,4 mm	1 in	25,4	1,00	3,80	0,1496
12,7 mm	½ in	12,7	0,500	2,67	0,1051
3,36 mm	N° 6	3,36	0,132	1,23	0,0484

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

As amostras foram então condicionadas em embalagens e transportadas até a Usina Piloto B, Centro Politécnico, UFPR onde foram realizados os testes. A Figura 04 apresenta as amostras utilizadas e permite perceber a ampla faixa granulométrica utilizada durante o procedimento experimental.



Figura 4 - Imagens das amostras de xisto utilizadas

3.3 Caracterização do Sistema

Inicialmente, foram calculados os valores dos parâmetros que caracterizam o leito, tais como esfericidade e diâmetro médio. Para o estudo em questão, foram usadas amostras com cinco diferentes diâmetros. O diâmetro médio foi obtido utilizando o diâmetro de peneira (d_p) que representa a média entre as aberturas da peneira superior e a peneira que reteve a amostra.

3.3.1 Diâmetro médio das partículas

As amostras foram separadas utilizando peneiras e tiveram seu diâmetro definido pela abertura da peneira utilizada. Na Tabela 4, estão listados os valores de diâmetro para cada uma das frações granulométricas:

Tabela 4 - Diâmetros médios

Fração	Diâmetro da partícula (m)
x_F	0,0083
$x_{1/2}$	0,0195
x_1	0,0381
x_2	0,0635
x_3	0,0889

3.3.2 Esfericidade das partículas

Na Figura 5, são apresentadas imagens das amostras de xisto obtidas com a utilização do escaneamento tridimensional de imagens, evidenciando a superfície irregular das partículas.

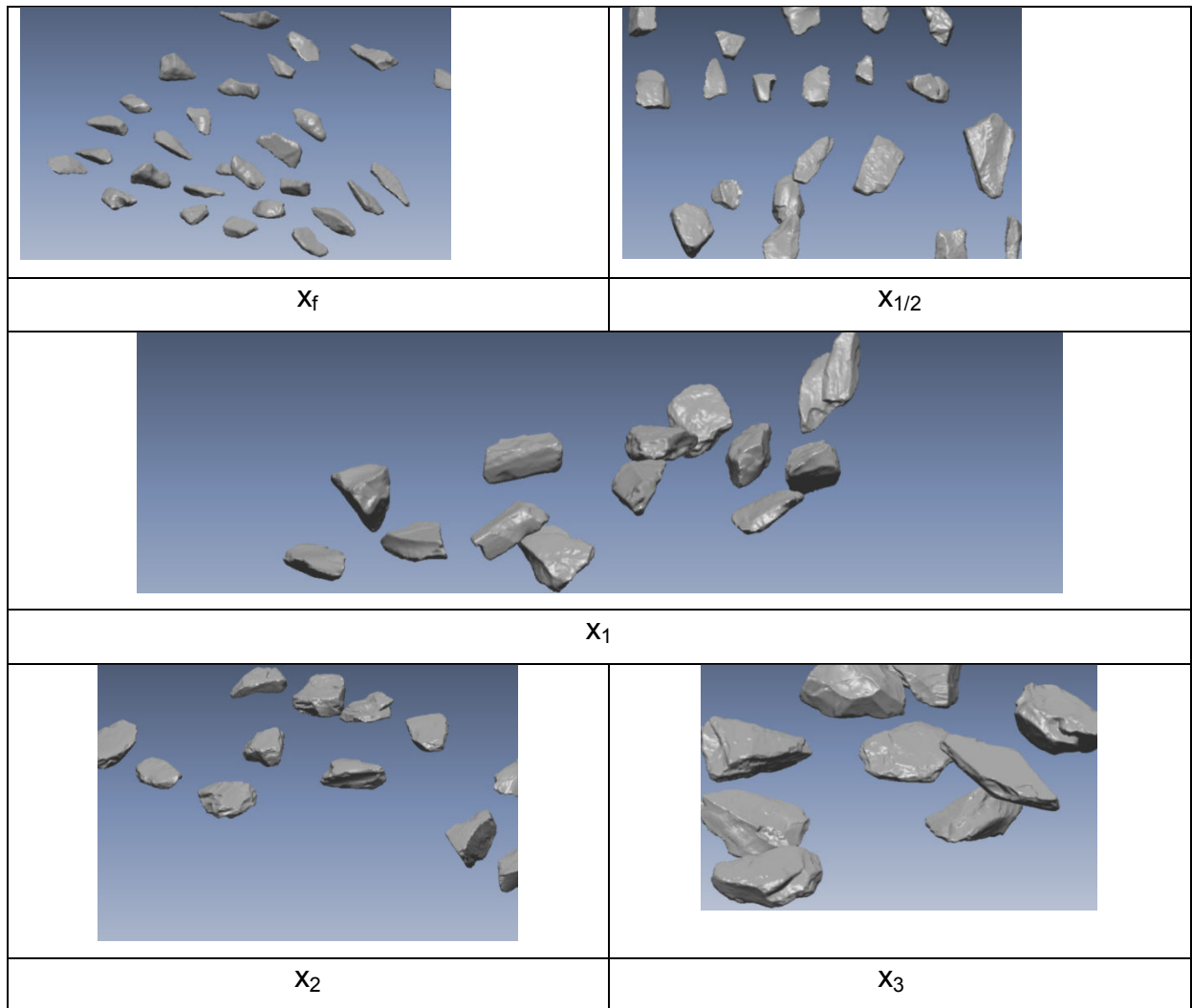


Figura 5 - Fotos de Scanner das amostras

Fonte: Petrosix

Com os dados obtidos, foi possível obter valores da área superficial e do volume das partículas, valores esses aplicados na Equação 2.1 para a obtenção dos valores da esfericidade das partículas. Dados sobre a esfericidade das partículas encontram-se listados na Tabela 5.

Tabela 5 - Esfericidade das Amostras utilizadas nos testes

Tipo de Amostra	Esfericidade (Φ)
X_f	$0,72 \pm 0,07$
$X_{1/2}$	$0,71 \pm 0,09$
X_1	$0,73 \pm 0,05$
X_2	$0,73 \pm 0,05$
X_3	$0,70 \pm 0,07$

Para a obtenção do valor da esfericidade foi feita uma média entre os valores das amostras analisadas. Os valores obtidos mantiveram-se aproximadamente os mesmos.

3.3.3 Densidade

A densidade do xisto utilizado nos testes foi determinada experimentalmente, introduzindo uma massa conhecida de xisto em um volume conhecido de água. Pela variação do volume de água, foi obtido o volume ocupado pelo xisto e estabelecida a relação entre a massa de xisto e seu volume, resultando em um valor médio igual a 2180 kg/m^3 .

3.3.4 Porosidade do leito

Foram coletadas várias medidas de altura do leito em diferentes pontos. Foi calculada a média desses valores e calculada a porosidade do leito pela relação entre o volume de vazios por volume total do leito. Valores de porosidade são apresentados na Tabela 6, para cada uma das faixas granulométricas utilizadas:

Tabela 6 – Porosidade do leito

Composição	Porosidade do leito
X_f	0,530
$X_{1/2}$	0,555
X_1	0,516
X_2	0,519
X_3	0,506

Fonte: O Autor (2011)

Partículas maiores ocuparam um maior volume de leito, resultando em porosidades menores, enquanto partículas menores propiciam uma melhor acomodação do xisto no interior do permeâmetro.

3.4 Descrição dos testes

Foram realizados, inicialmente, testes contendo duzentos e cinquenta quilos de partículas de mesma distribuição granulométrica. Com o objetivo de avaliar a influencia da distribuição granulométrica na perda de carga do leito fixo, foram realizados testes com diferentes quantidades de cada faixa de amostras, utilizando o Planejamento Box-Behnken, e normalizado para que a soma das frações em cada

teste resultasse em cem por cento, totalizando 250 kg de xisto em cada teste conforme consta na Tabela 7.

Tabela 7 – Fração mássica de cada faixa granulométrica utilizada nos testes

Planejamento Box – Behnken Normalizado						
Testes	X _F	X _{1/2}	X ₁	X ₂	X ₃	Total (%)
1	1,1	17,5	36,1	38,2	7,1	100
2	6,2	16,6	34,2	36,3	6,7	100
3	1	27,1	31,9	33,7	6,3	100,1
4	5,5	25,8	30,4	32,3	6	100
5	4,4	27,5	30	30	8,1	100
6	3,6	22,4	42,9	24,5	6,6	100
7	3,4	21,6	23,5	45,1	6,4	100
8	2,9	18,3	35	38,3	5,4	99,9
9	3,9	18	37,1	39,3	1,7	100
10	3,5	27,7	32,7	34,7	1,5	100,1
11	3,5	16,2	33,3	35,4	11,6	100
12	3,2	25,2	29,7	31,5	10,4	100
13	1,1	24,9	27,1	39,5	7,3	99,9
14	6,4	23,5	25,7	37,4	7	100
15	0,9	20,7	39,4	32,9	6,1	100
16	5,4	19,7	37,7	31,4	5,8	100
17	4,2	26,2	39,3	28,6	1,8	100,1
18	3,3	20,8	31,1	43,4	1,4	100
19	3,7	23,4	35,1	25,5	12,2	99,9
20	3	19	28,4	39,7	9,9	100
21	3,5	22	33	35	6,5	100
22	3,5	22	33	35	6,5	100
23	3,5	22	33	35	6,5	100
24	4,1	18,8	28,2	41,2	7,6	99,9
25	3,6	28,9	24,7	36,1	6,7	100
26	3,4	15,5	40,8	34	6,3	100
27	3	24,3	36,5	30,4	5,7	99,9
28	1,2	25,4	38,2	27,7	7,5	100
29	6,6	24	36,1	26,2	7,1	100
30	0,9	20,3	30,4	42,4	6	100
31	5,3	19,4	29,1	40,5	5,7	100
32	4,1	25,6	27,9	40,7	1,7	100
33	3,4	21,2	40,4	33,7	1,4	100,1
34	3,6	22,9	25	36,5	12	100
35	3,1	19,3	36,8	30,7	10,1	100
36	1,1	23,8	35,7	37,8	1,6	100
37	6,2	22,6	33,8	35,9	1,5	100
38	1	21,5	32,2	34,1	11,2	100
39	5,6	20,5	30,7	32,6	10,7	100,1
40	4,2	19,3	39,8	28,9	7,8	100
41	3,7	29,5	34,7	25,3	6,8	100
42	3,3	15,2	31,4	43,8	6,2	99,9

Tabela 7 – Continuação

43	3	23,9	28,2	39,3	5,6	100
44	3,5	22	33	35	6,5	100
45	3,5	22	33	35	6,5	100
46	3,5	22	33	35	6,5	100

Observa-se na Tabela 7 que os testes 21, 22 e 23 apresentam a mesma composição granulométrica. Esses testes correspondem às triplicatas realizadas durante o procedimento experimental. Ao término dos experimentos, essa triplicata é novamente realizada intitulada testes 44, 45 e 46. Os valores obtidos são então comparados para avaliar se as condições de operação podem ser reprodutíveis.

Estabelecidas as quantidades de cada amostra a ser utilizada nos testes, foram iniciados os ensaios experimentais na Usina Piloto B da Universidade Federal do Paraná.

3.5 Procedimento Experimental

Estabelecidas as condições de operação e a distribuição das frações granulométricas, foram iniciados os testes. Em cada um dos testes, as amostras foram pesadas e em seguida misturadas com auxílio de pás. O leito foi cuidadosamente montado evitando a formação de caminhos preferenciais.

As partículas foram introduzidas no permeâmetro em pequenas quantidades, sempre tomando o cuidado para que não houvesse a fragmentação das mesmas. Após a colocação das amostras, a altura do leito era medida e caso houvesse irregularidades na superfície do leito, estas eram corrigidas manualmente.

Foram medidas várias alturas do leito e, em seguida, feita a média desses valores. A velocidade do gás era ajustada inicialmente em um valor máximo, sendo diminuída gradativamente até que a leitura da queda de pressão no manômetro não pudesse ser aferida.

3.5.1. Cálculo da velocidade do ar

A velocidade do ar foi obtida com o auxílio da placa de orifício concêntrica. Para o cálculo, utilizou-se a equação do coeficiente de expansão utilizado para a medição de vazão de fluidos compressíveis, dado pela seguinte correlação empírica (Delmée, 1982):

$$\epsilon = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot \beta^4) \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1} \right) \frac{1}{k} \quad (3.1)$$

Esta equação é aplicável somente nos limites de β , D/k e Re_D estabelecidos:
 $0,15 < \beta < 0,75$; $50\text{mm} < D < 760\text{mm}$; $10^5 < Re_D < 10^7$

Com o objetivo de diminuir a margem de erro, a viscosidade e a densidade do ar foram ajustadas para a temperatura de realização dos experimentos (T), (Delmée, 1982):

$$\mu = \frac{1,458 \cdot 10^{-6} T^{0,5}}{1 + \frac{110,4}{T}} \quad (3.2)$$

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{T_1 P_2}{T_2 P_1} \quad (3.3)$$

Para calcular a vazão que atravessa o duto, utiliza se a seguinte relação (Delmée, 1982):

$$Q = C \cdot E \cdot \beta^2 \cdot S_1 \cdot Fa \cdot \epsilon \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3.4)$$

sendo “Fa” igual a 1 e “E” definido pela relação:

$$E = \frac{1}{(1 - \beta^4)^{1/2}} \quad (3.5)$$

O coeficiente de vazão combinado, representando o produto do coeficiente de descarga “C” pelo fator de velocidade de aproximação “E”, é dado pela seguinte fórmula empírica (Delmée, 1982):

$$CE = C'E + B_r \sqrt{\frac{10^6}{Re_D}} \quad (3.6)$$

$$C'E = 0,6014 - 0,030352D^{-\frac{1}{4}} + \left(0,3760 + 0,16292D^{-\frac{1}{4}}\right) \cdot \left[\frac{0,16129}{D^2\beta^2 + 0,0635D} + \beta^4 + 1,5\beta^{16}\right] \quad (3.7)$$

$$B_r = 0,0002 + \frac{0,02794}{D} + \left(0,0038 + \frac{0,01016}{D}\right) [\beta^2 + (16,5 + 0,19685D)\beta^{16}] \quad (3.8)$$

Nas equações 3.6 a 3.8, o diâmetro do tubo deve ser expresso em milímetros.

Sabendo o valor da vazão do gás e conhecendo as dimensões do tubo é possível calcular a velocidade de escoamento pela relação:

$$v_{\text{gas}} = \frac{Q}{S_1} \quad (3.9)$$

Assim, os dados coletados em um dos manômetros fornecem o valor da velocidade medida com o auxílio da placa de orifício.

3.5.2 Cálculo da perda de carga

Para calcular a perda de carga apresentada devido à variação de velocidade, utiliza-se o segundo manômetro que, por meio da relação apresentada na equação 3.10 fornece o valor de ΔP (Delmée, 1982):

$$\Delta P = z \cdot \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot \left(\text{sen}(12^\circ) + \left(\frac{d_c}{d_B}\right)^2 \right) \quad (3.10)$$

sendo que d_c representa o diâmetro do tubo que compõe o manômetro e d_B representa o diâmetro do bulbo que completa o equipamento.

3.5.3 Critério para avaliação dos modelos

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

Dividindo o valor obtido pelo número de pontos, obtêm-se a variância residual média (s^2), considerado um parâmetro adequado para a avaliação dos ajustes.

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{\text{calculado}} - \left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{\text{experimental}} \right]^2 \quad (3.11)$$

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. As comparações são feitas por meio da “*Mean Relative Deviation*” (MRD) valores como indicadores estatísticos:

$$\text{MRD}(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\left| \left(\frac{\Delta P}{L\rho} \right)_{\text{calculado}} - \left(\frac{\Delta P}{L\rho} \right)_{\text{experimental}} \right|}{\left(\frac{\Delta P}{L\rho} \right)_{\text{experimental}}} 100 \quad (3.12)$$

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

Após serem testados os modelos matemáticos apresentados, optou-se pelo ajuste das equações de Ergun, Nemeç e Levec e Sawistoski, pois essas equações com os valores originais das constantes apresentaram um bom resultado. A equação de Macdonald apresentou bons resultados, mas por ser uma variação dos parâmetros da equação de Ergun, foi feito o ajuste das constantes de Ergun.

4 Resultados

Os ensaios experimentais foram divididos em duas etapas, sendo a primeira realizada apenas com as amostras puras das cinco faixas granulométricas, e a segunda, realizada com misturas das frações granulométricas utilizadas na primeira etapa.

4.1 Frações puras

Após serem preparadas as amostras e quantificadas as características das partículas e do leite, foram realizados os testes com duzentos e cinquenta quilos de cada faixa granulométrica para obter a relação entre a perda de carga ao longo do leite e a velocidade do gás que escoava entre as partículas de xisto. Foi avaliada a capacidade dos modelos matemáticos da literatura em reproduzir os dados experimentais.

4.1.1 Reprodutibilidade dos testes

Para a verificação da confiabilidade dos experimentos foram realizados testes em duplicatas. As duplicatas foram realizadas com a mesma faixa granulométrica (x_2), por apresentar um diâmetro intermediário entre as amostras. A Figura 6 apresenta os valores obtidos em cada um dos testes:

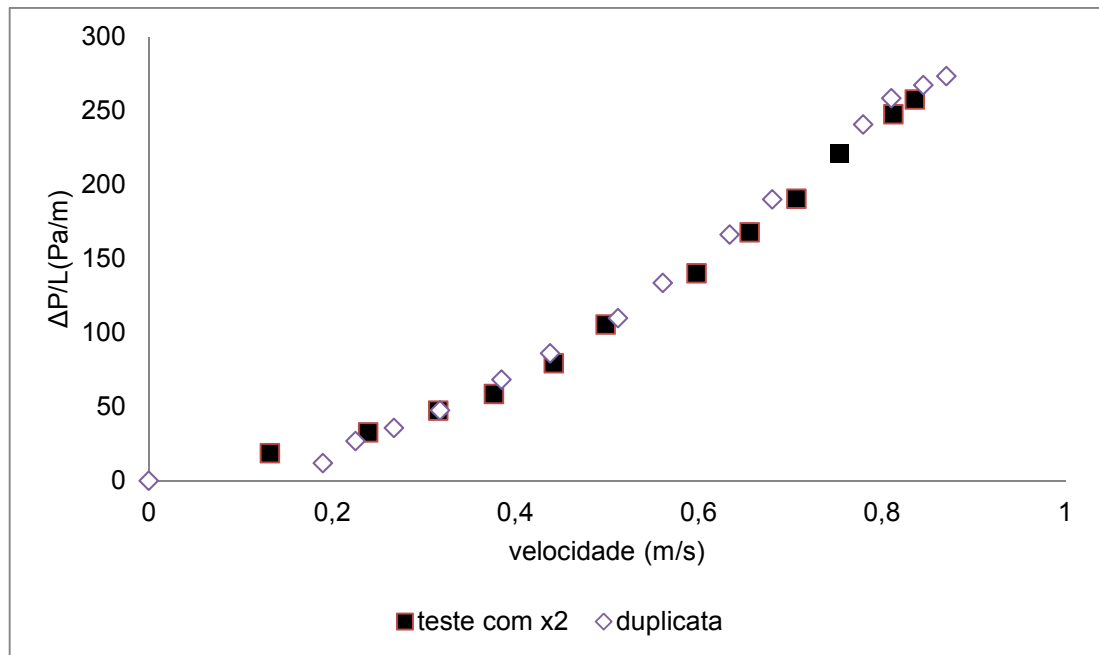


Figura 6 - Avaliação da Reprodutibilidade dos testes

Observou-se que o desvio apresentado pelos dados ficou entre 2 e 7%, o que representa uma reprodutibilidade satisfatória para os dados. A perda de carga do permeâmetro vazio foi avaliada e considerada desprezível.

Com os resultados obtidos pode-se observar que ao longo da realização dos testes as condições de operação não foram alteradas e os resultados obtidos são reprodutíveis.

Foram realizados os ensaios experimentais visando avaliar a influencia da velocidade do gás na perda de carga do sistema variando a faixa granulométrica do xisto utilizado.

4.1.2 Comparação entre experimentos conduzidos em permeâmetro de diferente diâmetros

Com o objetivo de avaliar a influência da utilização de colunas de diferentes diâmetros, foram confeccionados gráficos que relacionam a perda de carga para um sistema operado em um permeâmetro de 59,5 centímetros de diâmetro, e os dados obtidos por Motta (2009) utilizando partículas de mesma granulometria, mas utilizando um permeâmetro de 20,3 centímetros de diâmetro interno. Nas Figuras 7 a 11, encontram se os valores obtidos experimentalmente.

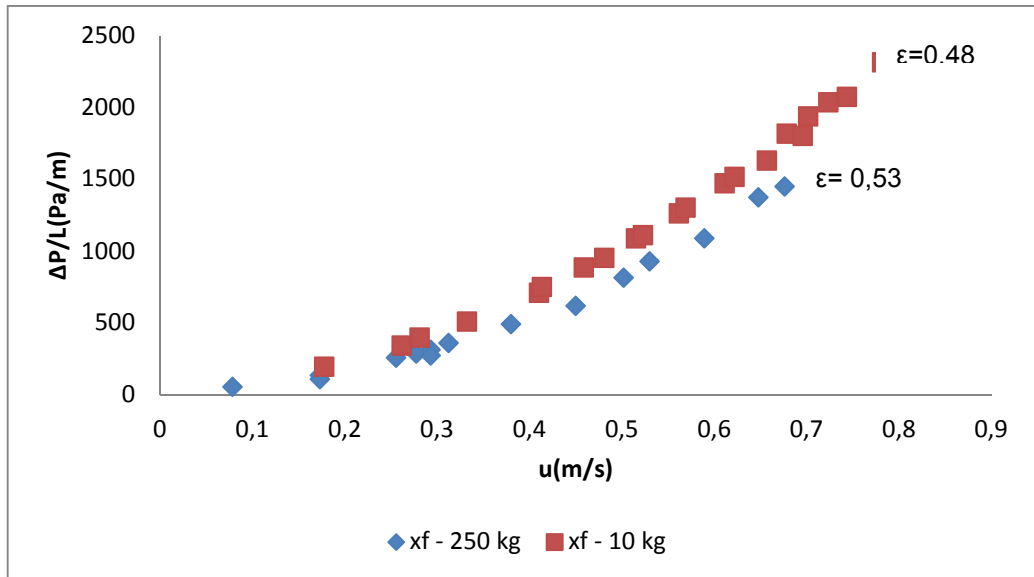


Figura 7 - Comparação entre dados experimentais para partículas x_F , utilizando diferentes quantidades de xisto

Fonte: O autor (2011), Motta (2009).

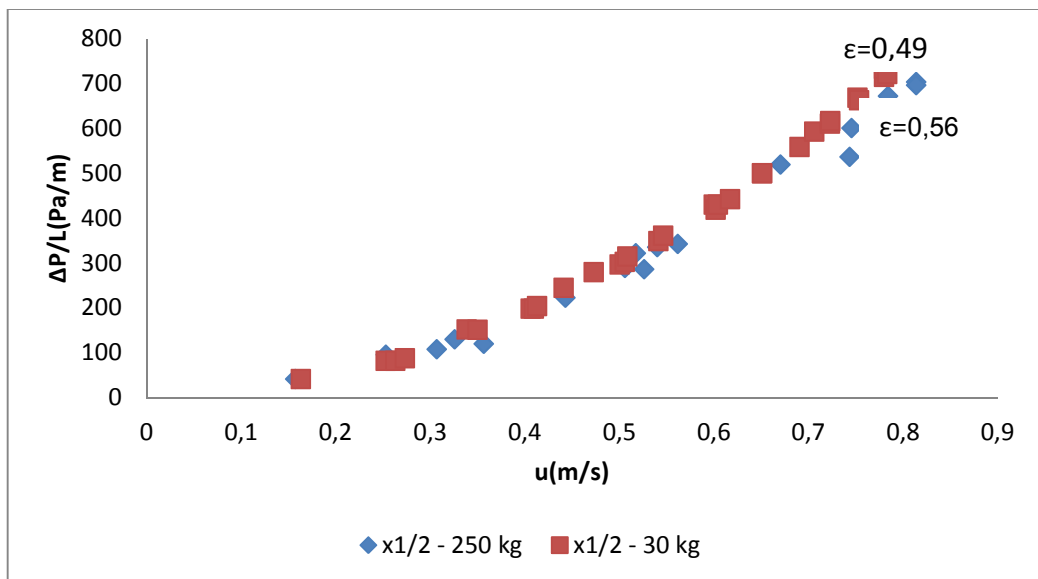


Figura 8 - Comparação entre dados experimentais para partículas $x_{1/2}$, utilizando diferentes quantidades de xisto

Fonte: O autor (2011), Motta (2009).

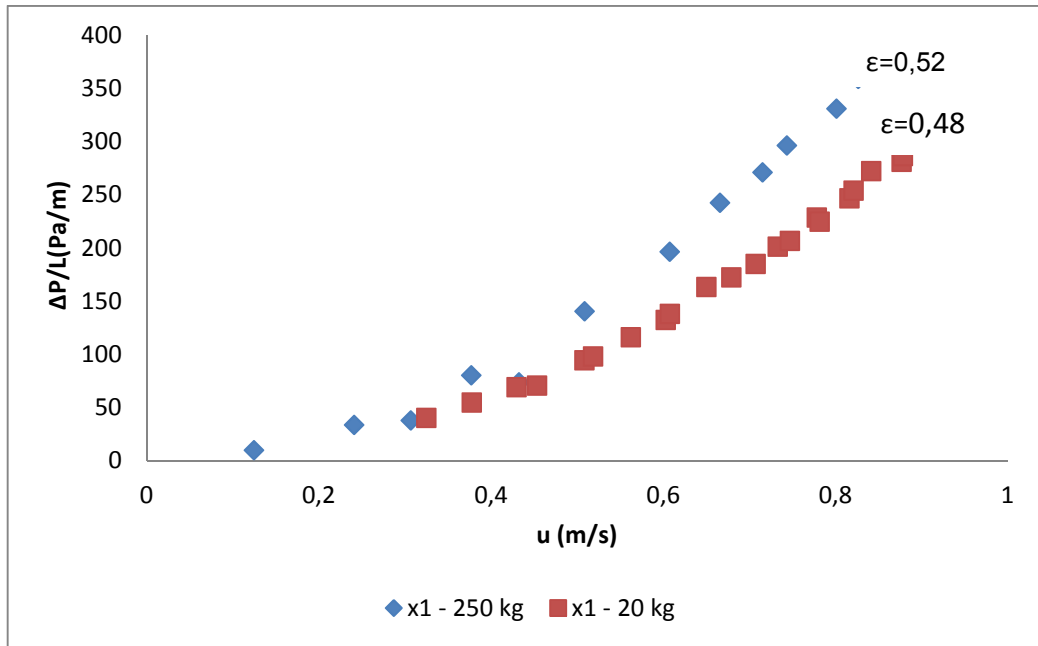


Figura 9 - Comparação entre dados experimentais para partículas x_1 , utilizando diferentes quantidades de xisto

Fonte: O autor (2011), Motta (2009).

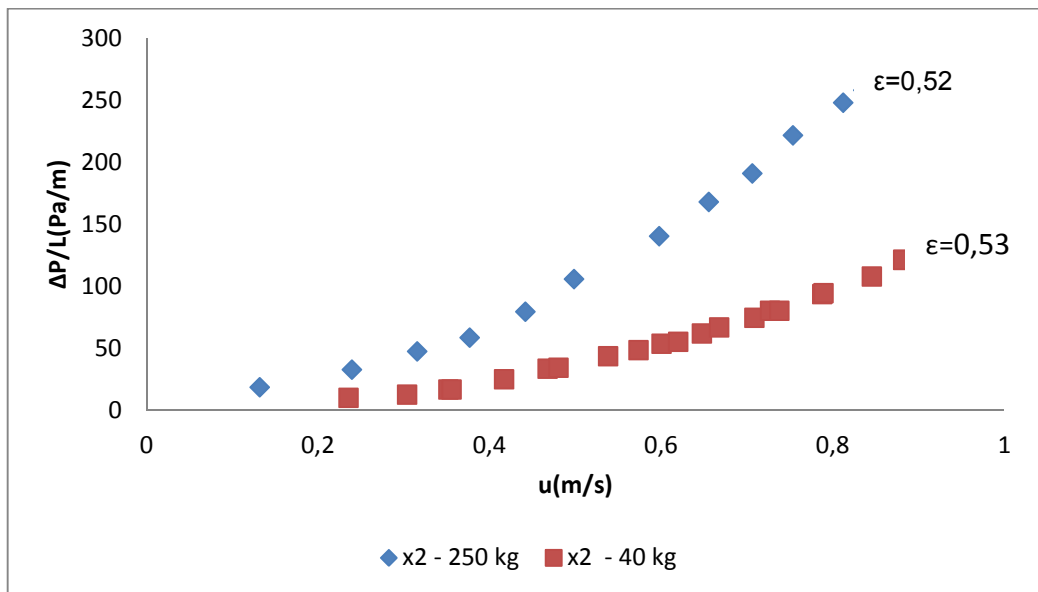


Figura 10 - Comparação entre dados experimentais para partículas x_2 , utilizando diferentes quantidades de xisto

Fonte: O autor (2011), Motta (2009).

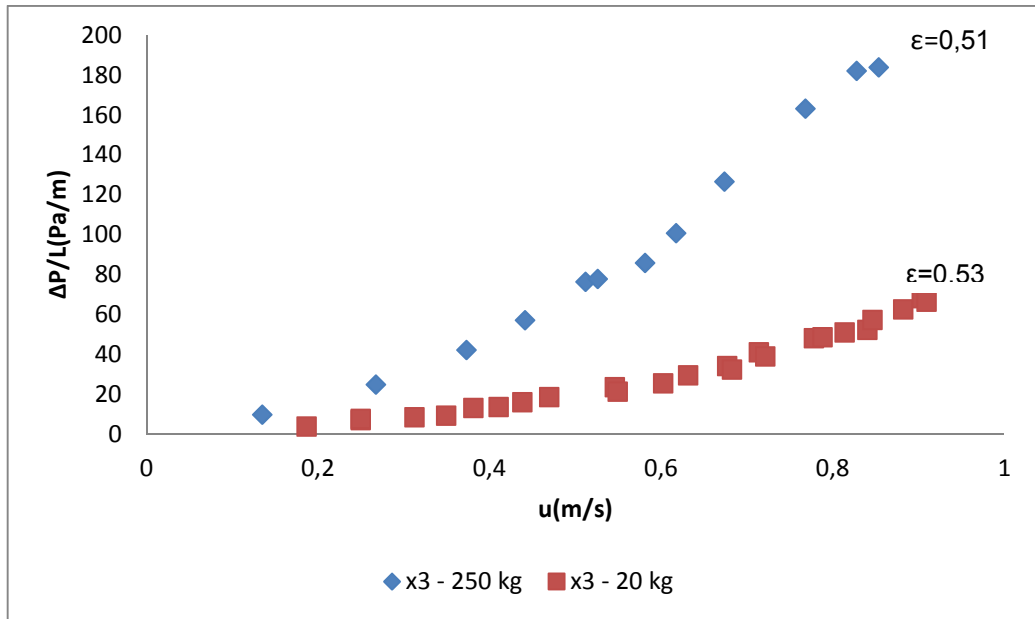


Figura 11 - Comparação entre dados experimentais para partículas x_3 , utilizando diferentes quantidades de xisto

Fonte: O autor (2011), Motta (2009).

Em leitos constituídos por partículas de baixa granulometria, o aumento da quantidade de xisto utilizado não foi representativo, pois os dados obtidos nos ensaios ficaram próximos. Entretanto, a comparação entre os testes permite concluir que, para partículas maiores, a perda de carga aumenta juntamente com o leito. O aumento na porosidade do leito faz com que a perda de carga do sistema se torne menor.

Para avaliar a influência do efeito de parede nos testes, é analisada a relação entre o diâmetro do permeâmetro e o diâmetro das partículas utilizadas. A Tabela 8 apresenta a relação entre os valores obtidos, sendo que “D” representa o diâmetro interno do permeâmetro e “ d_p ” o diâmetro da partícula.

Tabela 8 - Relação entre diâmetro do permeâmetro e diâmetro das partículas

	Diâmetro (mm) das partículas	D/d_p (bateladas menores) $D=203$ mm	D/d_p (bateladas de 250 kg) $D=595$ mm
x_F	8,3	24,46	71,69
$x_{1/2}$	19,5	10,41	30,51
x_1	38,1	5,33	15,61
x_2	63,5	3,20	9,37
x_3	88,9	2,28	6,69

Fonte: O Autor (2011)

A utilização de um permeâmetro de raio menor dificulta a acomodação das partículas maiores, fator que influencia a porosidade do leito e apresenta como resposta uma menor perda de carga.

4.1.3 Relação entre Variação de Pressão em função da velocidade do gás e modelos matemáticos aplicados

Os dados obtidos experimentalmente foram plotados, juntamente com as curvas fornecidas pelos modelos encontrados na literatura com os valores originais das constantes, com o objetivo de avaliar o quanto a equação proposta é capaz de reproduzir os dados experimentais, resultando nos gráficos da Figura 12 a 16:

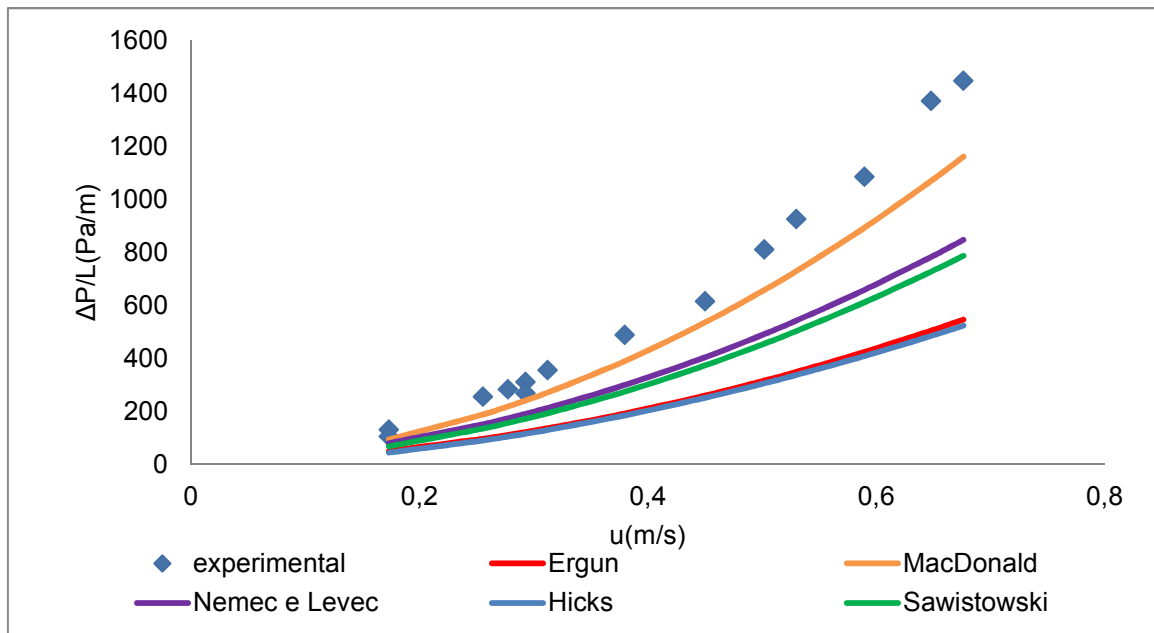


Figura 12 - Dados experimentais e modelos da literatura, leito composto por partículas xf.

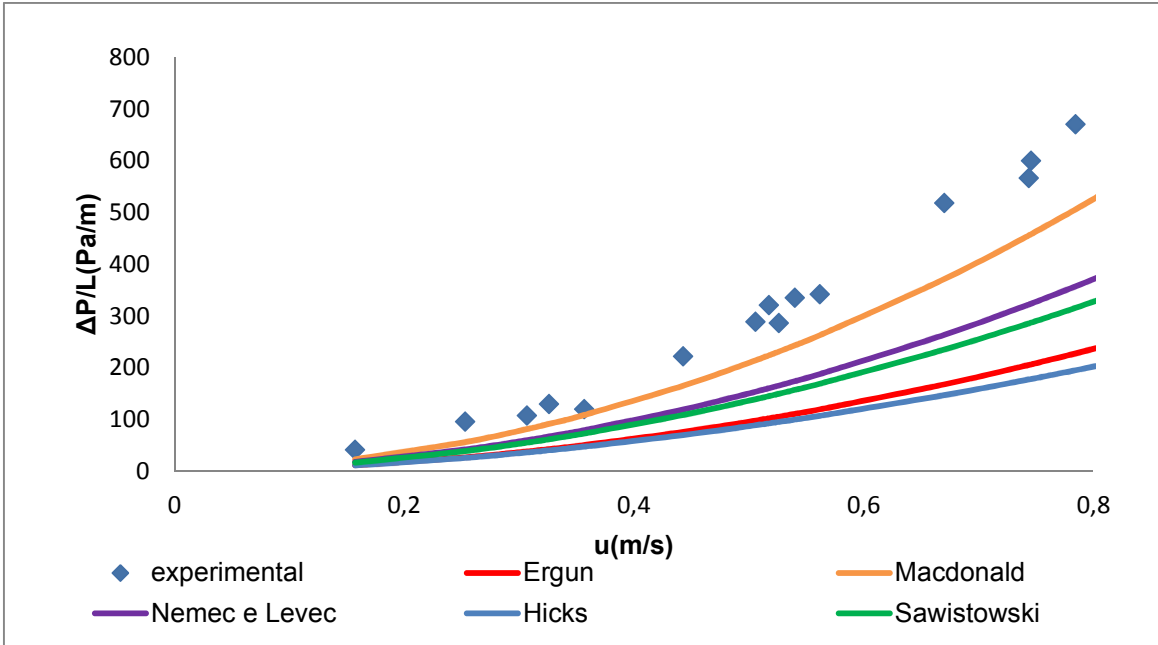


Figura 13 - Dados experimentais e modelos da literatura, leito composto por partículas $x_{1/2}$.

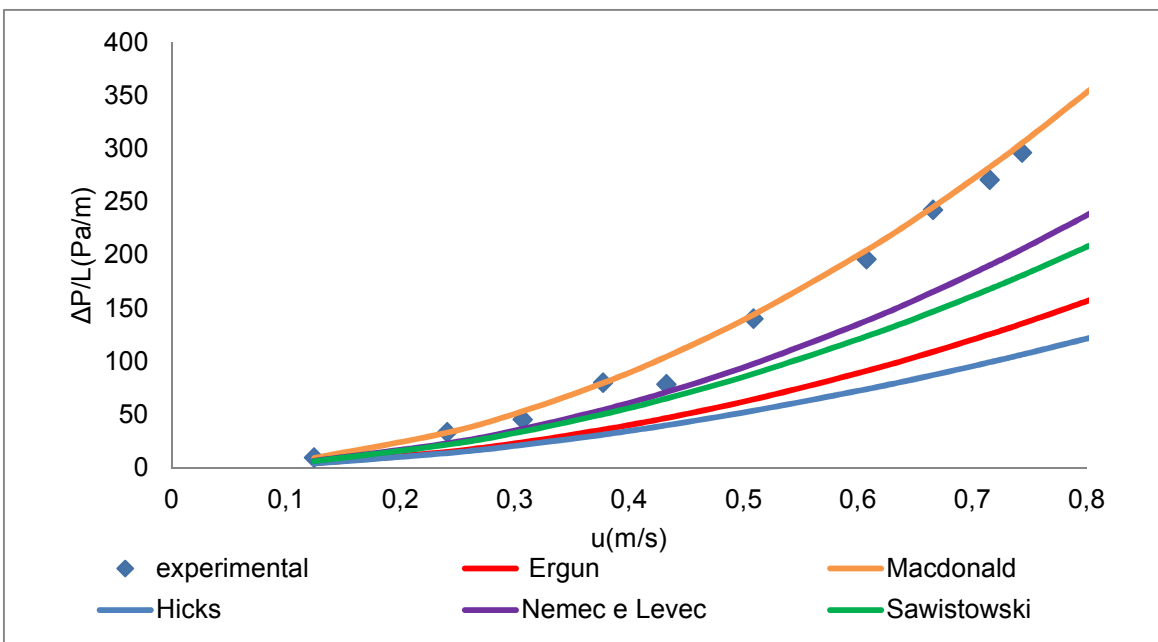


Figura 14 - Dados experimentais e Modelos da literatura, leito composto por partículas x_1 .

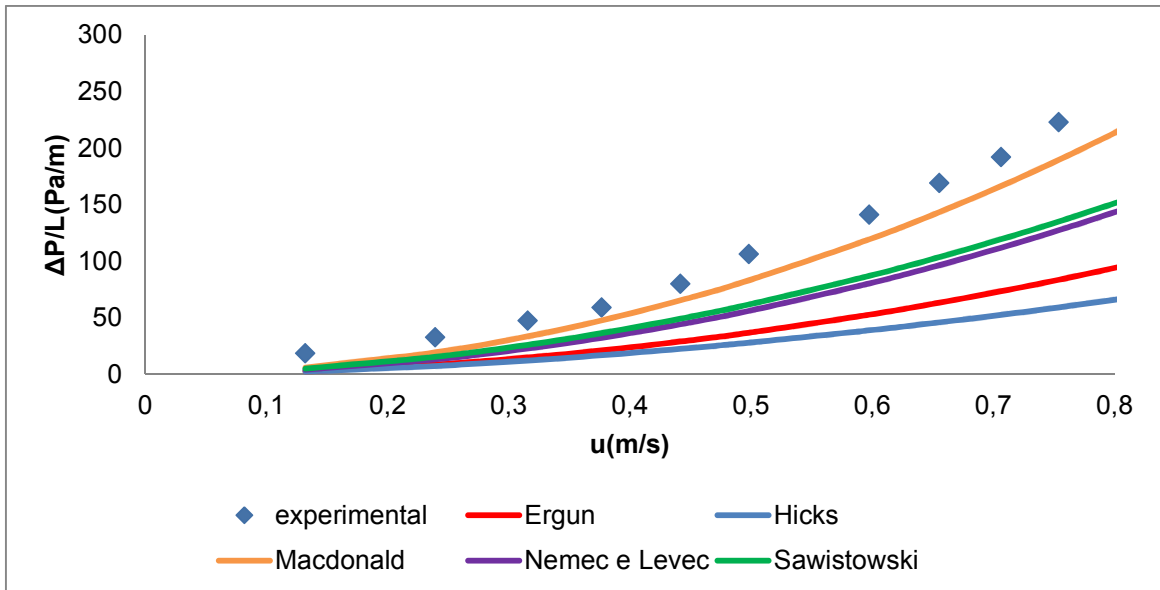


Figura 15 - Dados experimentais e modelos da literatura, leito composto por partículas x_2 .

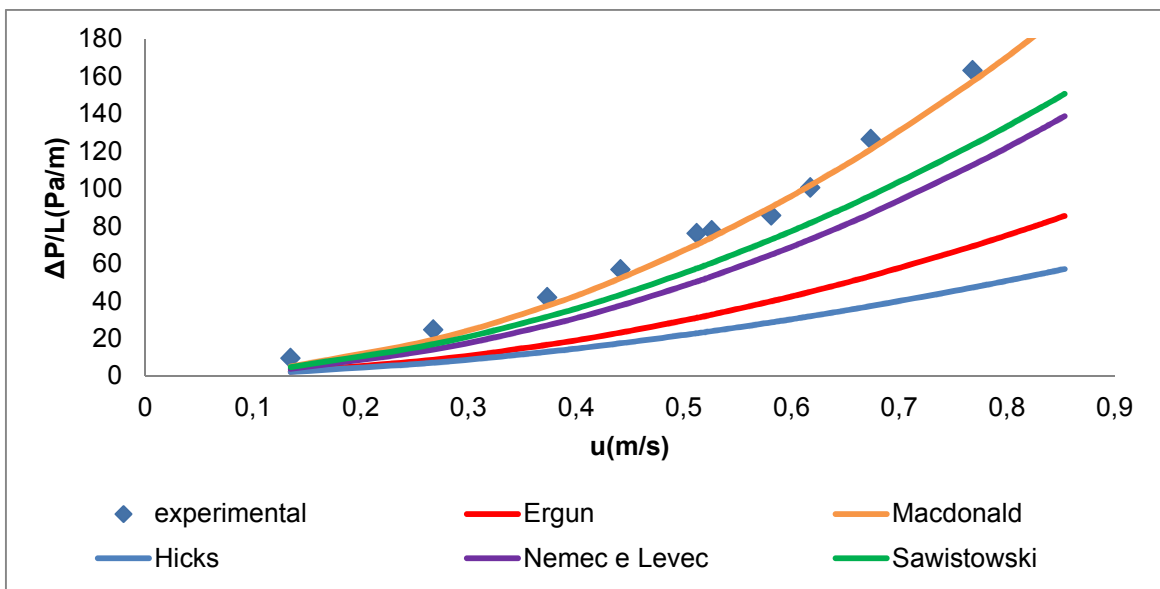


Figura 16 - Dados experimentais e modelos da literatura, leito composto por partículas x_3 .

Pela análise das figuras 12 a 16, é possível constatar que os modelos listados na literatura apresentam uma perda de carga menor ou igual aos valores obtidos experimentalmente. O modelo proposto por MacDonald apresentou um melhor ajuste aos dados experimentais, enquanto os modelos propostos por Nemec e Levec e Sawistowski apresentaram valores muito próximos entre si. Já os modelos propostos por Ergun e Hicks não foram capazes de reproduzir o comportamento do sistema.

4.1.4 Equação de Ergun

Analisando as figuras 12 a 16, foi possível perceber que a perda de carga real foi maior que a apresentada pela equação de Ergun. A representação dos dados experimentais utilizando esta equação torna-se válida apenas se houver o ajuste dos parâmetros 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. Dessa forma calculou-se o valor de Reynolds para caracterizar o regime de escoamento, valores mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Faixa de Reynolds

Material utilizado	Faixa de Reynolds	
	Limite Inferior	Limite Superior
x_F	36,7	316,8
$x_{1/2}$	178,8	925,7
x_1	277	1836,7
x_2	522,6	3307,7
x_3	696	4406,7

FONTE: O autor (2011)

Os valores obtidos experimentalmente foram utilizados na confecção do gráfico a fim de facilitar a visualização do comportamento do sistema, sendo que os valores estão apresentados na Figura 17:

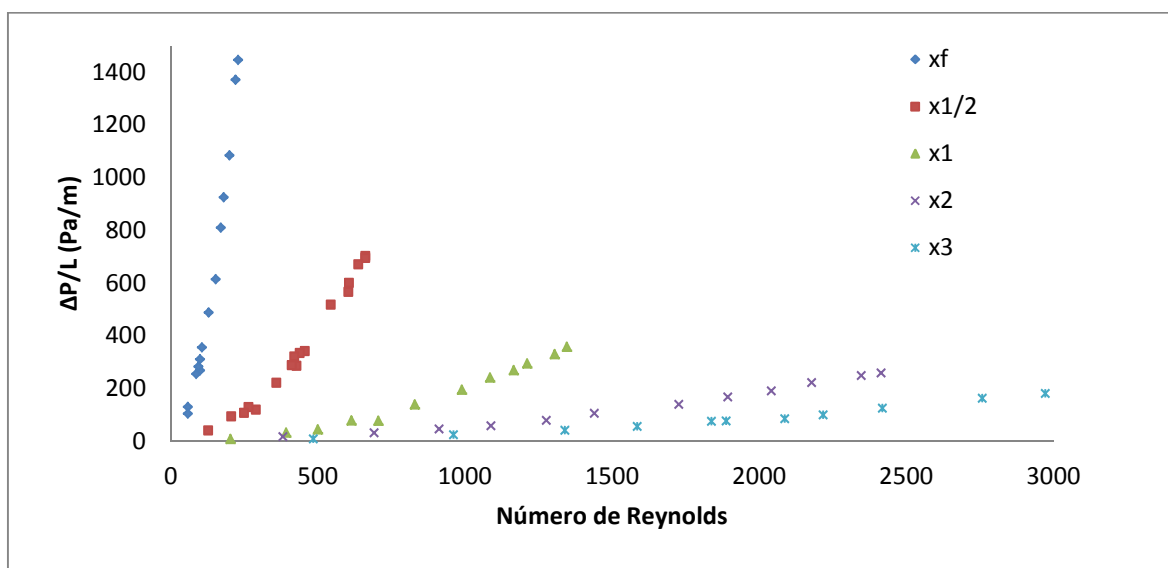


Figura 17 - Relação entre perda de carga e número de Reynolds.

O número de Reynolds define o regime como sendo laminar ($Re < 10$), de transição ($10 \leq Re \leq 300$) e turbulento ($Re > 300$) (Ziółkowska *et al.* (1988)). Dos resultados da Tabela 9, pode se observar que, com exceção da menor faixa de tamanho das partículas, o sistema encontra-se em grande parte em regime turbulento, o que torna a contribuição do primeiro termo pouco significativa na equação de Ergun. Para os testes realizados com as partículas x_F , a contribuição do termo viscoso manteve-se em torno de 11% e, à medida que foi aumentada a faixa granulométrica, a contribuição da perda de carga devido à energia viscosa foi diminuindo, atingindo valores em torno de 2% para as partículas maiores.

Como pode-se observar o número de Reynolds influencia na perda de carga do sistema. Para uma determinada fração granulométrica, a medida que aumenta o número de Reynolds, aumenta também a perda de carga do sistema. O comportamento apresentado pela Figura 17 é similar ao apresentado no trabalho desenvolvido por Foumeny (1996).

Objetivando adequar a equação de Ergun para o sistema utilizado, foi ajustado o segundo termo da equação. O valor de B foi adequado ao sistema pelo método da minimização dos quadrados dos desvios. Os valores ajustados encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores ajustados para a constante B da equação de Ergun

	A	B
x_F	150	5,14
$x_{1/2}$	150	5,36
x_1	150	3,82
x_2	150	4,44
x_3	150	3,80

Para a visualização do ajuste do modelo de Ergun, com a constante B modificada, os dados experimentais foram normalizados pelo maior valor obtido. Essa comparação está indicada na Figura 18, em que as linhas pontilhadas correspondem a um desvio de $\pm 15\%$.

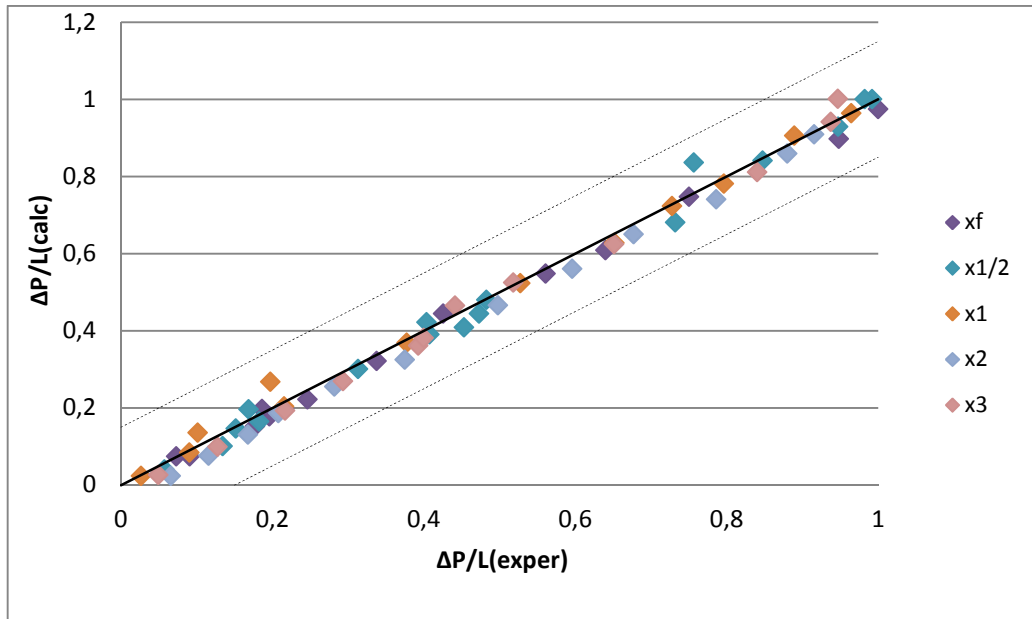


Figura 18 - Comparação entre os dados experimentais e os fornecidos pela Equação de Ergun com a constante B ajustada.

O ajuste obtido para o parâmetro B é condizente com o obtido no artigo publicado por Mayerhofer (2010), em que o valor de B é igual a 4,2.

4.1.5 Modelo de MacDonald

Foram utilizadas partículas de superfície irregular. Assim, MacDonald *et al* (1979) recomendam que o ajuste do modelo seja feito utilizando os valores das constantes $A=180$ e $B=4,0$ para a equação de Ergun.

A partir da visualização das Figuras 12 a 16, pode-se observar que utilizando os parâmetros A e B propostos por MacDonald na equação de Ergun, o resultado obtido foi mais próximo ao desejado. Pode-se observar também que o modelo de MacDonald reproduziu melhor o comportamento do sistema composto por partículas maiores, evidenciando a necessidade de caracterizar a superfície das partículas para melhor adaptação do modelo. Entretanto, quando são utilizadas partículas menores, apenas a análise da estrutura da partícula não permite reproduzir o efeito obtido durante o processo experimental. Por se tratar de um ajuste específico da equação de Ergun, não será feito o ajuste da Equação de Macdonald.

4.1.6 Modelo de Nemeç e Levec

O estudo desenvolvido por Nemeç e Levec (2005) utilizou um sistema gás-sólido e avaliou a influência da esfericidade das partículas no processo de perda de carga. O modelo proposto se baseia na utilização da equação de Ergun, mas com os parâmetros A e B dependentes da esfericidade. Porém, o modelo de Nemeç e Levec não foi capaz de reproduzir os presentes dados experimentais para o xisto betuminoso. Assim, para que o modelo pudesse ser utilizado, foi feito o ajuste do parâmetro do segundo termo da equação, cujo valor inicial é de 1,75, e os valores obtidos encontram-se listados na Tabela 11:

Tabela 11 - Constantes ajustadas para a Equação de Nemeç e Levec

Material do teste	Valor Ajustado
x_F	3,2
$x_{1/2}$	3,5
x_1	2,6
x_2	3,2
x_3	2,5

As constantes ajustadas refletem melhor a perda de carga para as partículas de xisto estudadas. Essa comparação está indicada na Figura 19, em que as linhas pontilhadas correspondem a um desvio de $\pm 15\%$.

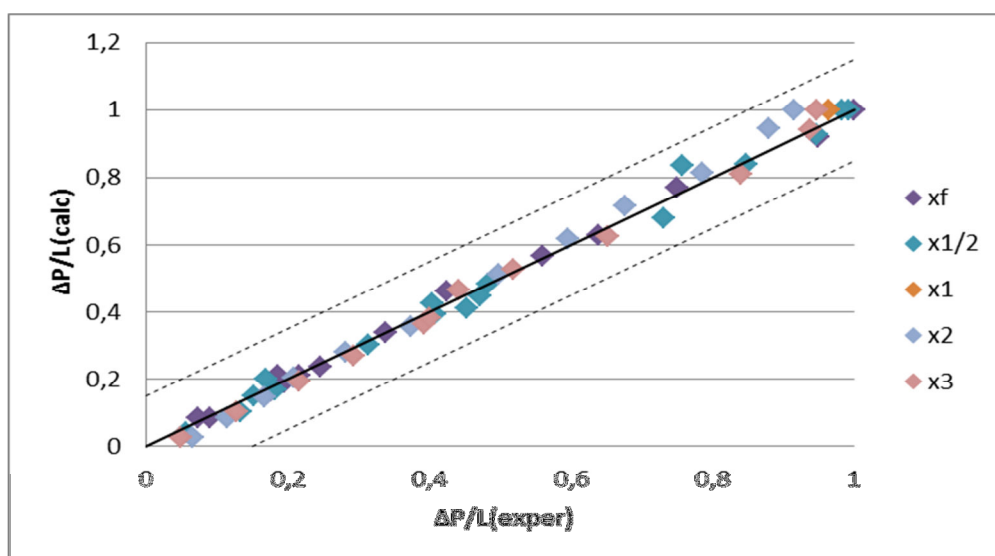


Figura 19 - Comparação entre os dados experimentais e os fornecidos pela equação de Nemeç e Levec com a constante B ajustada.

4.1.7 Modelo de Hicks

O modelo proposto por Hicks(1970) foi desenvolvido utilizando um leito de esferas, em que foi avaliada a influência da faixa Reynolds nas constantes da equação de Ergun. Segundo Hicks, a equação de Ergun é válida apenas para um valor de $Re/(1-\varepsilon)$ menor que 500. Na Tabela 12, são apresentados os valores de $Re/(1-\varepsilon)$ para os ensaios experimentais utilizados:

Tabela 12 – Valores da razão de Reynolds por $(1-\varepsilon)$

Material utilizado	Faixa de $Re/(1-\varepsilon)$
x_F	125 a 489
$x_{1/2}$	286 a 1489
x_1	419,5 a 2782
x_2	793,5 a 5022
x_3	980 a 6201,8

Segundo a Tabela 12, se o número de Reynolds fosse o único fator que interferisse nos resultados apenas o teste realizado com o x_F seria reproduzido utilizando a equação de Ergun.

No modelo de Hicks utilizado na confecção dos gráfico 12 a 16, foi feita uma adaptação na equação utilizada introduzindo-se um termo de esfericidade multiplicando o diâmetro da partícula para que o modelo pudesse ser aplicado a sistemas de partículas com superfície irregular. A Equação 4.1 apresenta o modelo adaptado:

$$f v = \frac{\Delta P (d_p \cdot \phi)^2}{L \mu \cdot u} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} = 6,8 \cdot \left(\frac{Re}{1-\varepsilon} \right)^{0,8} \quad (4.1)$$

Mesmo utilizando este ajuste, os resultado obtidos ficaram bem abaixo daqueles obtidos experimentalmente, demonstrando que para o sistema em questão, é necessária uma análise mais profunda da influência da estrutura das partículas para que o modelo possa se ajustar.

4.1.8 Modelo de Sawistowski

Sawistowski(1957) comparou os resultados obtidos pela equação de Ergun e considerou os valores fornecidos baixos para leitos com alta porosidade e compostos por partículas irregulares, situação similar à observada nos testes

experimentais realizados. O autor propõe um modelo utilizando a definição de área específica da superfície das partículas (S), isto é, a área de uma partícula dividida pelo seu volume. Os valores médios obtidos para as partículas de xisto estão listados na Tabela 13:

Tabela 13 - Valores da área específica das partículas

	$S \text{ (m}^{-1}\text{)}$
x_F	760
$x_{1/2}$	320
x_1	160
x_2	120
x_3	100

O resultado obtido utilizando a Equação de Sawistowski não reproduziu com precisão o sistema sendo necessário o ajuste das constantes. Na Tabela 14 são fornecidos os valores das constantes ajustadas para a Equação proposta por Sawistowski:

Tabela 14 - Valores ajustados para a Equação de Sawistowski

Material utilizado	Valor Original = 5,0	Valor Original = -1	Valor Original = -0,1
	Valor Ajustado	Valor Ajustado	Valor Ajustado
x_F	4,2	-0,49	-0,050
$x_{1/2}$	4,1	-0,44	-0,030
x_1	4,2	-0,56	-0,046
x_2	4,2	-0,55	-0,047
x_3	4,2	-0,50	-0,099

Utilizando os valores ajustados, foi possível estabelecer a relação entre os dados experimentais e os fornecidos pelo modelo. A Figura 20 apresenta o desvio observado.

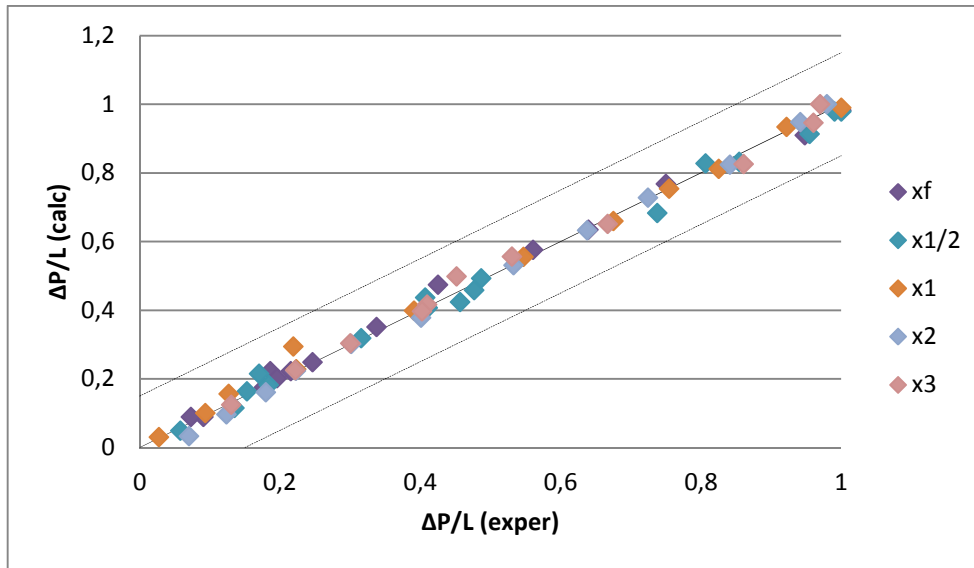


Figura 20 - Comparação entre os dados experimentais e os fornecidos pela equação de Sawistowski com a constante B ajustada.

Existem vários fatores que influenciam os parâmetros de cada um dos modelos. Assim, para que o modelo seja capaz de reproduzir os dados experimentais, é necessário o ajuste das constantes para um sistema específico. Serão ajustados os parâmetros da equação de Ergun e também os valores das constantes de Nemeç e Levec e Sawistowski, utilizando o método de minimização da soma dos quadrados dos desvios. A Equação de Hicks, por apresentar valores muito distantes dos obtidos experimentalmente será considerada ineficaz na reprodução dos dados. A equação de Macdonald é um ajuste dos valores das constantes de Ergun, então foi feito apenas o ajuste das constantes de Ergun.

4.1.9 Comparação entre os Modelos Propostos

Utilizando os valores originais das constantes e os valores obtidos pelo ajuste, foram traçados gráficos a fim de visualizar o desvio apresentado por cada um dos modelos. O desvio foi calculado pela Equação 4.2 citada abaixo:

$$desvio(\%) = \sum \left(\frac{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{experimental} - \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{modelo}}{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{experimental}} \right) \cdot 100\% \quad (4.2)$$

Com os valores obtidos, foram confeccionados gráficos para cada uma das faixas granulométricas, apresentados nas Figuras 21 a 25:

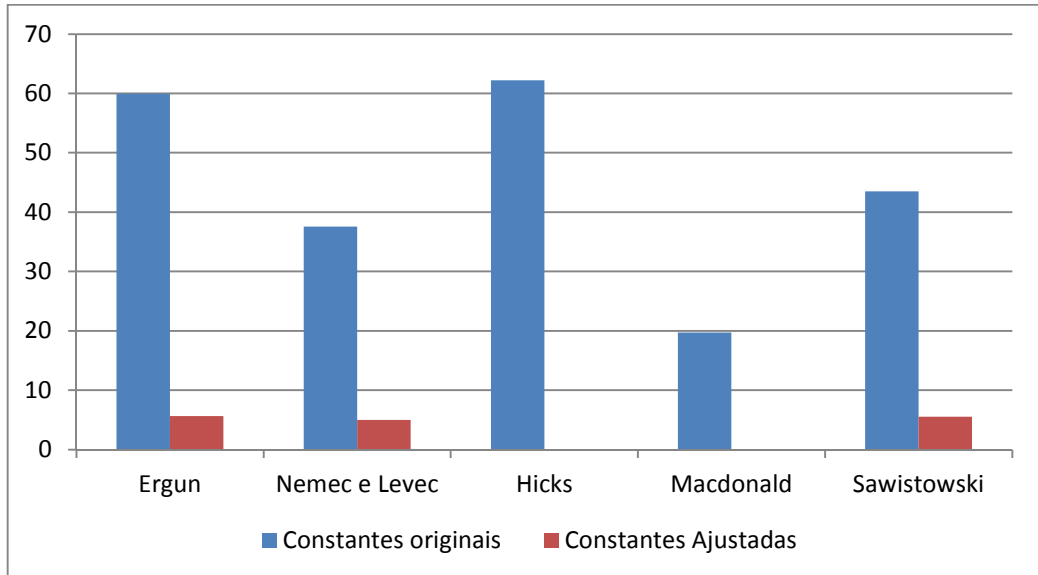


Figura 21 - Desvios obtidos entre os modelos e os dados experimentais utilizando amostras de x_F

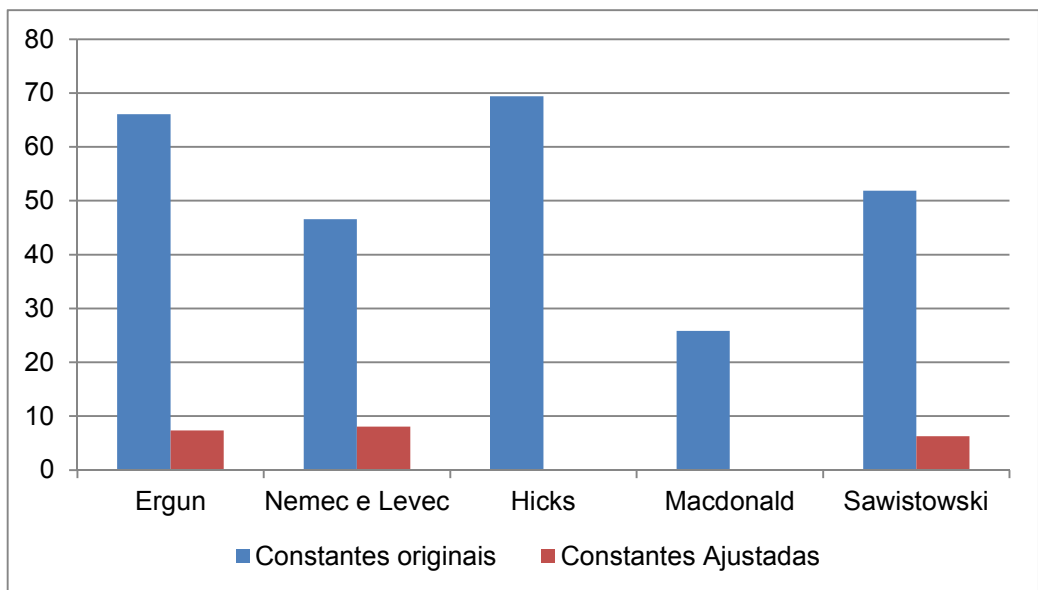


Figura 22 - Desvios obtidos entre os modelos e os dados experimentais utilizando amostras de $x_{1/2}$

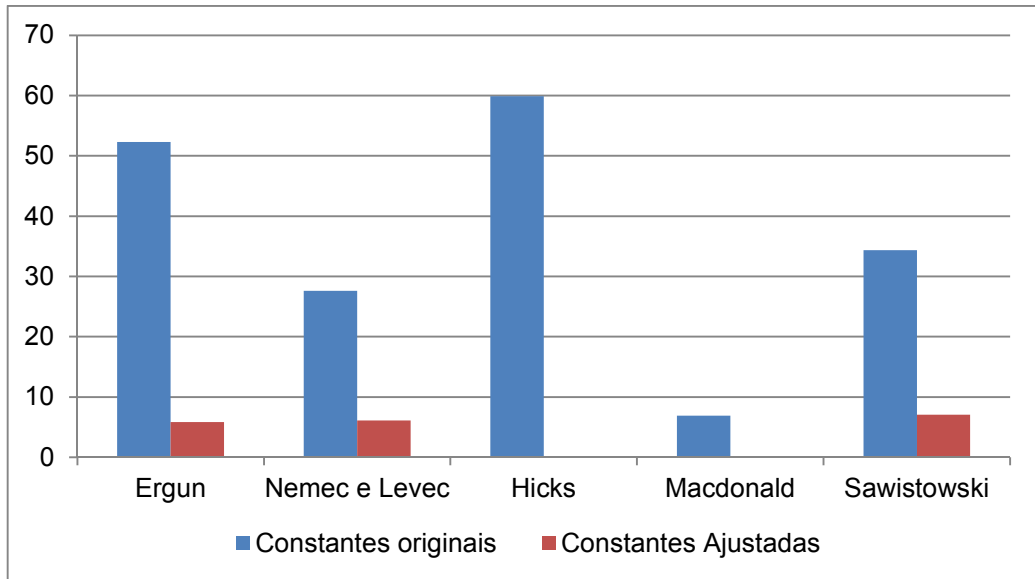


Figura 23 - Desvios obtidos entre os modelos e os dados experimentais utilizando amostras de x_1

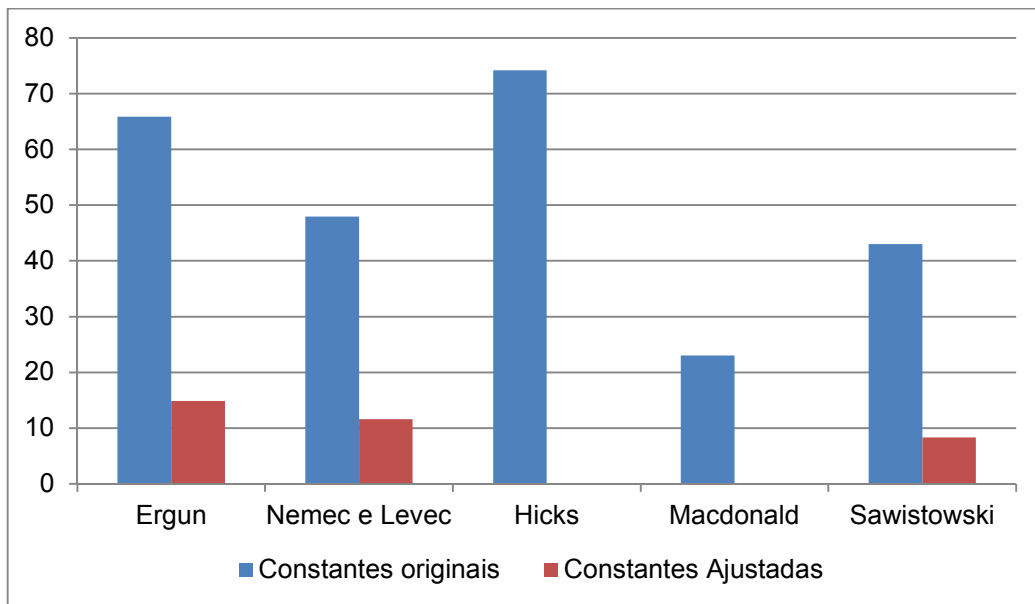


Figura 24 - Desvios obtidos entre os modelos e os dados experimentais utilizando amostras de x_2

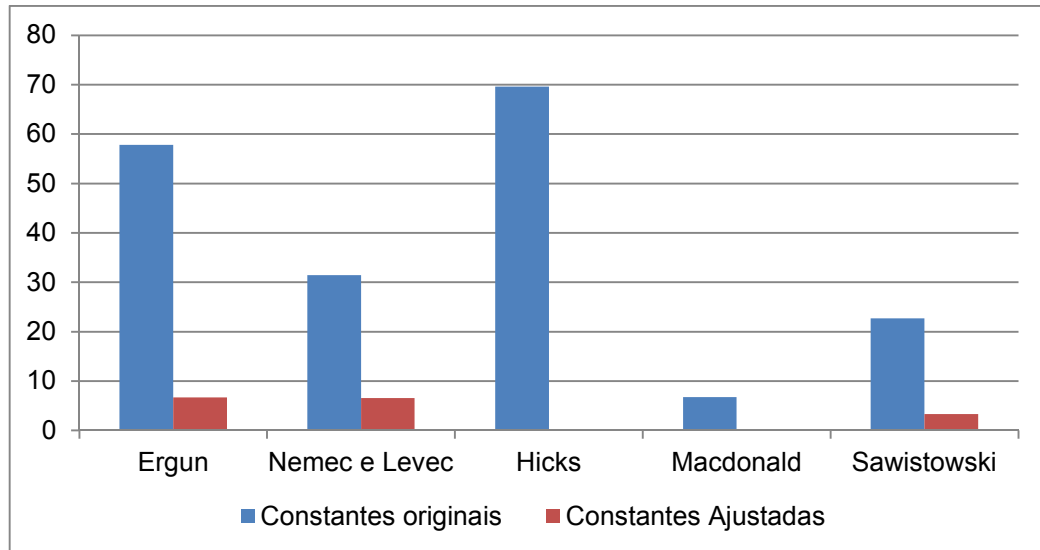


Figura 25 - Desvios obtidos entre os modelos e os dados experimentais utilizando amostras de x_3

Analisando os gráficos que trazem informações sobre o desvio médio percentual de cada um dos modelos aplicados com seus devidos ajustes é perceptível que o ajuste das constantes torna maior a capacidade do modelo em reproduzir os dados experimentais. A equação de Ergun e os modelos de Nemec e Levec e Sawistowski apresentaram aproximadamente os mesmos valores de desvio, quando utilizadas as constantes ajustadas.

Os desvios apresentados por Sawistowski apresentaram valores um pouco abaixo daqueles fornecidos pelos outros modelos. Isso deve-se ao fato de Sawistowski ajustar três constantes, enquanto Ergun e Nemec e Levec ajustam apenas uma. Aumentando o número de constantes a ser ajustadas, torna-se mais difícil encontrar um único valor para cada uma das constantes que seja capaz de prever o comportamento dos diferentes sistemas.

4.2 Misturas das diferentes faixas granulométricas

A segunda parte do trabalho experimental foi desenvolvida utilizando-se misturas das amostras utilizadas na primeira parte, com o mesmo procedimento experimental descrito anteriormente. Um ponto importante a ser ressaltado é que, mesmo com a utilização de uma pequena quantidade de partículas x_F a perda de carga das misturas manteve-se entre os valores de perda de carga das frações puras de x_F e $x_{1/2}$, valores apresentados na Figura 26.

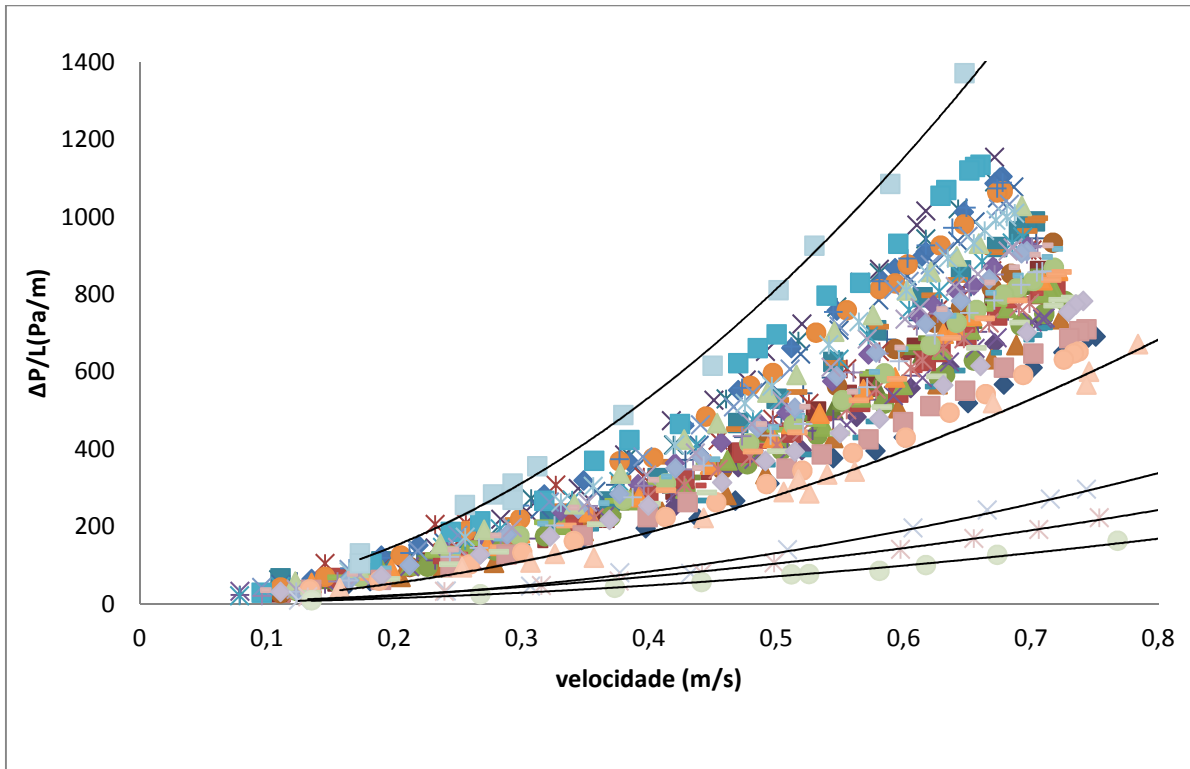


Figura 26 - Dados experimentais obtidos para as frações puras e para as misturas.

As linhas contínuas representam a perda de carga para as frações puras, sendo os maiores valores de perdas de carga observados para as partículas menores. Os pontos representam os valores obtidos para cada um dos testes, evidenciando a influência significativa de partículas menores sobre o sistema, pois partículas de menores diâmetros tendem a ocupar espaços vazios entre as partículas maiores, propiciando um melhor empacotamento o que gera um aumento na perda de carga do sistema.

4.2.1 Reprodutibilidade dos testes

Foram realizados quarenta e seis testes, conforme consta na Tabela 4, e os valores experimentais obtidos são apresentados na Figura 27:

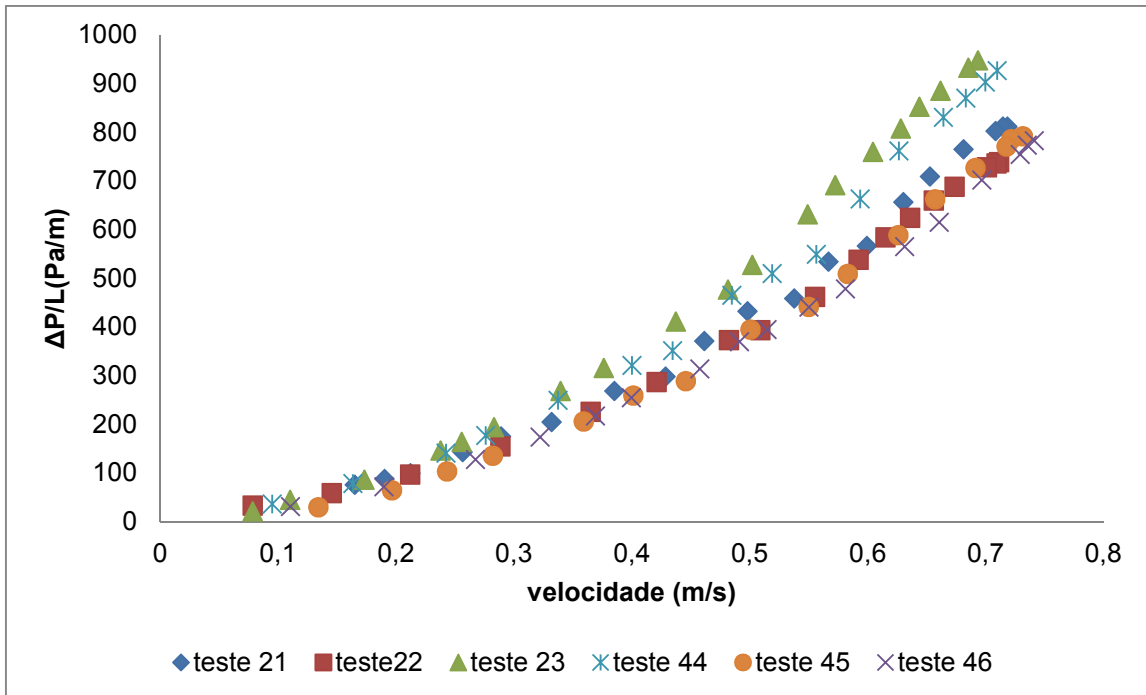


Figura 27 - Dados obtidos para os testes de mesma distribuição granulométrica.

Valores retratados na Figura 27 demonstram que, assim como para as frações puras, as condições de operação do sistema são reprodutíveis. Os valores da porosidade para os testes são listados na Tabela 15:

Tabela 15 - Valores de porosidade apresentados pelos testes utilizados para avaliar a reprodutibilidade do sistema

	Teste 21	Teste 22	Teste 23	Teste 44	Teste 45	Teste 46
ε	0,46	0,45	0,45	0,45	0,46	0,43

Os valores de porosidade do leito influenciam os valores da perda de carga apresentada pelo sistema. Para a aplicação dos modelos matemáticos de previsão de perda de carga, foi calculada a porosidade em cada um dos testes.

4.2.2 Cálculo da porosidade do leito em cada teste

Para cada um dos testes, o leito foi montado e, em seguida, obtido os valores referentes a altura para cálculo da porosidade. Os valores de porosidade em cada um dos testes realizados estão apresentados na Figura 28.

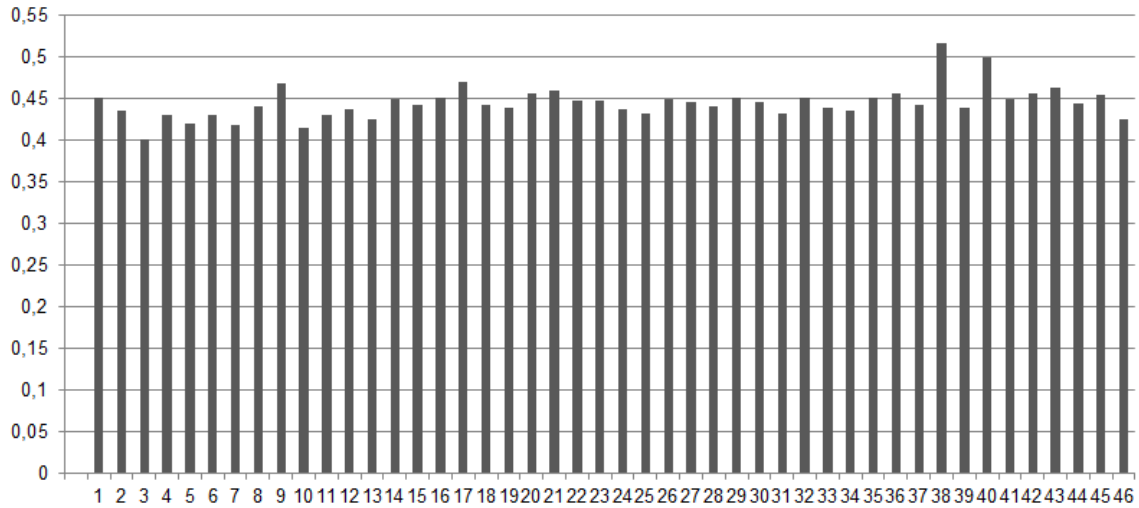


Figura 28 - Valores de porosidade para cada um dos testes realizados

Os maiores valores de porosidade foram observados nos testes 40 e 38, enquanto os menores valores foram apresentados pelos testes 03 e 10. Os testes diferem apenas na fração granulométrica utilizada, pois foram realizados sob as mesmas condições de operação e montados da mesma forma. Na Figura 29, estão apresentadas as devidas frações em cada um dos testes.

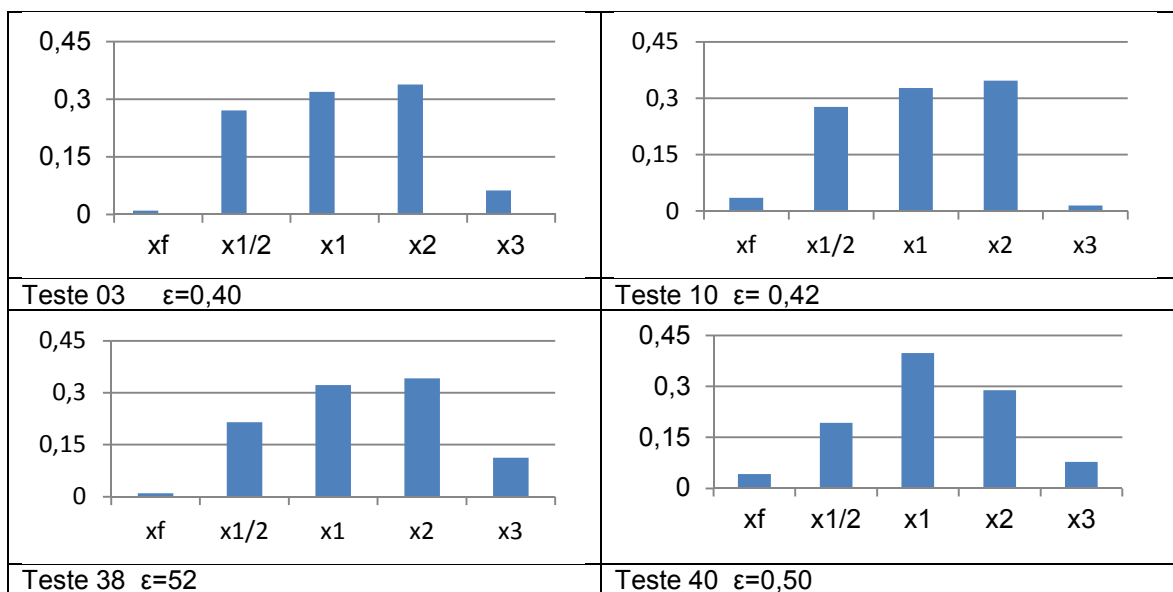


Figura 29 - Distribuição da fração granulométrica nos testes realizados

Observa-se, na Figura 29, que os testes 03 e 38 apresentam a mesma quantidade de amostras de xisto do tipo x_F . A elevação na porosidade do teste 03 em relação ao teste 38 se deve ao aumento da quantidade de partículas de x_3 ; enquanto no teste 03 foram utilizados 15,75 quilos de x_3 , no teste 38 foram utilizados 28 quilos. Comparando os diagramas de barras é possível constatar que, aumentando a quantidade de partículas maiores, a altura atingida pelo leito tende a aumentar e conseqüentemente a porosidade.

A porosidade média calculada para os ensaios experimentais realizados com as misturas foi de $0,4450 \pm 0,0002$, enquanto que, para as frações puras essa média se manteve em $0,53 \pm 0,02$, evidenciando que a mistura das partículas diminui a ocorrência de espaços vazios no interior do leito.

4.2.3 Cálculo do diâmetro médio

O leito utilizado apresenta uma ampla distribuição granulométrica. Para a aplicação dos modelos matemáticos, é preciso selecionar um diâmetro médio capaz de conservar as características do sistema. Encontram-se, na literatura, várias formas de cálculo desse diâmetro, listadas na Tabela 2 do item Revisão Bibliográfica.

A definição mais amplamente usada na equação de Ergun é a proposta por Sauter. Foram calculados os valores fornecidos pela equação de Ergun utilizando-se cada uma das definições da Tabela 2 e comparados aos valores experimentais fornecidos, os resultados são apresentados na Figura 30.

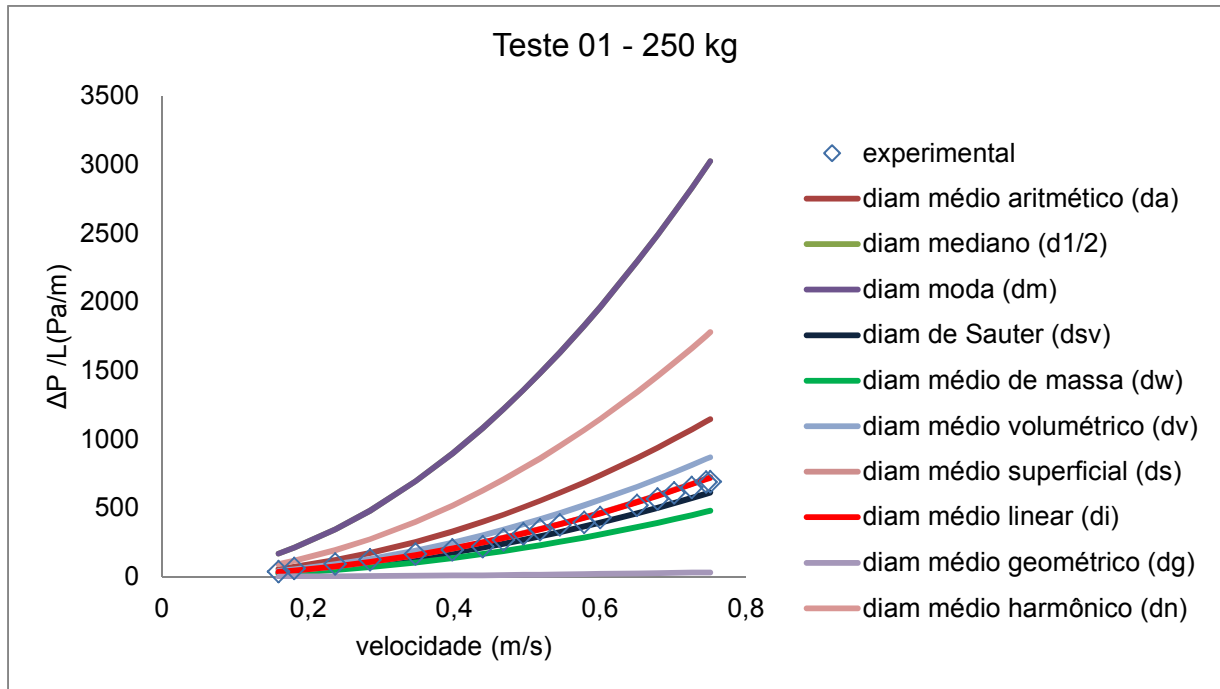


Figura 30 - Aplicação das definições de diâmetro médio na Equação de Ergun

Conforme apresentado na Figura 30 o diâmetro que melhor se ajustou para o teste 01 foi o proposto por Sauter. A fim de verificar se, para os outros testes, foi mantida a mesma tendência, foram escolhidos mais cinco testes, listados na tabela 16.

Ao invés de testar os modelos de Ergun, Nemeç e Levec e Sawistowski, optou-se por trabalhar apenas com a equação de Ergun, visto que, essa equação apresentou um bom resultado quando ajustado apenas um parâmetro, enquanto Sawistowski seria necessário o ajuste de três parâmetros e Nemeç e Levec teria a influência do fator esfericidade.

Tabela 16 - Testes escolhidos para a verificação da definição de diâmetro com suas devidas frações granulométrica e porosidade do leito.

Testes	x_F	$x_{1/2}$	x_1	x_2	x_3	ϵ
06	0,036	0,224	0,429	0,245	0,066	0,43
07	0,034	0,216	0,235	0,451	0,064	0,42
19	0,037	0,234	0,351	0,255	0,122	0,44
29	0,066	0,24	0,361	0,262	0,071	0,45
41	0,037	0,295	0,347	0,253	0,068	0,45

O teste 29, dentre todos os testes realizados é o que apresenta a maior quantidade de x_F , assim também como o teste 41, teste 06, teste 07 e o teste 41

apresentam a maior quantidade de $x_{1/2}$, x_1 , x_2 e x_3 respectivamente. Utilizando a equação (3.12), foram comparados os desvios médios apresentados para cada tipo de diâmetro escolhido.

Os valores médios obtidos para o desvio em relação a Equação de Ergun utilizando os tipos de diâmetros apresentados na Tabela 2 estão listados na Tabela 17.

Tabela 17 - Desvios observados para a Equação de Ergun utilizando vários diâmetros

	da	d1/2	dsv	dw	dv	ds	di	dg	dn
Teste 01	77,8	379,0	6,9	26,4	34,4	14,9	14,6	95,1	177,9
Teste 06	86,6	254,7	16,7	38,8	29,8	10,4	16,0	98,2	167,0
Teste 07	143,1	364,2	5,4	29,4	61,0	27,2	34,8	97,6	252,2
Teste 19	41,2	165,0	39,1	57,3	5,7	23,7	18,7	98,7	101,1
Teste 29	42,1	123,9	42,4	61,1	7,3	26,0	16,4	99,3	87,5
Teste 41	43,3	169,3	32,3	51,7	4,2	17,5	11,4	98,7	99,4
soma	434,2	1456,1	142,8	264,6	142,3	119,6	111,8	587,6	885,1

Fonte: O Autor

Para a obtenção dos valores apresentados foi utilizado o valor da constante B como sendo a média dos diâmetros, mas não se sabe ao certo se essa forma de cálculo é a mais aconselhável. Então, foram utilizados os valores de B apresentados por Macdonalds, para testar as definições de diâmetro médio. Os valores são apresentados pela Tabela 18.

Tabela 18 - Desvios observados utilizando diferentes definições de diâmetro médio para a Equação de MacDonal.

MacDonald										
	da	d1/2	dm	dsv	dw	dv	ds	di	dg	dn
Teste 01	44,18	299,59	299,59	24,14	41,00	12,06	10,42	10,75	96,12	127,67
Teste 06	52,76	196,93	196,93	32,84	50,84	9,57	17,16	10,54	98,60	121,01
Teste 07	99,42	289,71	289,71	19,742	43,37	30,77	5,46	9,47	98,05	192,47
Teste 19	16,16	122,12	122,12	50,95	65,74	22,77	38,27	34,14	98,98	66,70
Teste 29	17,41	88,24	88,24	53,49	68,76	24,36	39,93	31,92	99,43	56,48
Teste 41	16,89	123,96	123,96	45,55	61,28	18,88	33,40	28,40	99,01	64,16
soma	246,82	1120,55	1120,55	226,72	330,98	118,40	144,63	125,2	590,20	628,49

A partir dos valores de desvio obtidos, conclui-se que as definições de diâmetro que reproduzem com melhor precisão o comportamento do sistema são o diâmetro médio de Sauter e o diâmetro médio linear. Para caracterizar melhor esse resultado, foram coletados valores de perda de carga para a velocidade arbitrária de

0,6 m/s e comparados com os valores fornecidos pela equação de Ergun, inicialmente utilizando dsv e um segundo gráfico apresenta os valores utilizando di. A constante de Ergun foi utilizada como sendo a média dos valores das constantes B para as frações puras. As Figuras 31 e 32 apresentam a comparação entre os valores experimentais e os valores fornecidos pela Equação de Ergun utilizando dsv, e di, respectivamente.

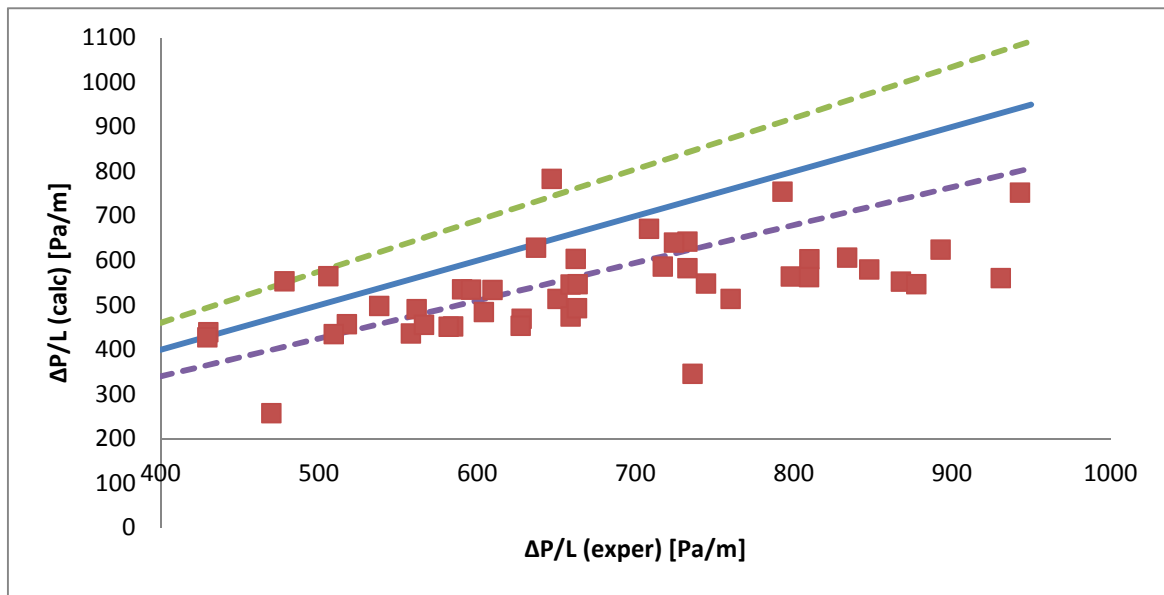


Figura 31 - Relação entre valores exper. e valores fornecidos pelo modelo de Ergun utilizando dsv

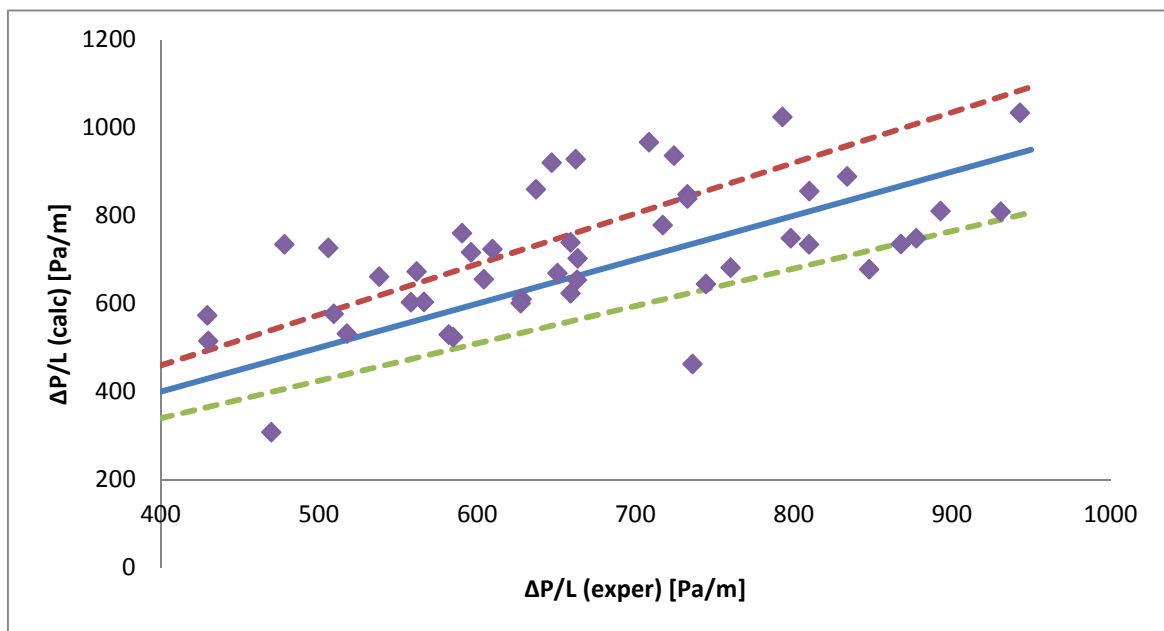


Figura 32 - Relação entre valores exper. e valores fornecidos pelo modelo de Ergun utilizando di

Quanto mais próximos a linha contínua melhor os dados fornecidos pelo modelo representam os dados experimentais. A linha pontilhada apresenta um desvio de $\pm 15\%$.

Os valores fornecidos pela equação de Ergun, utilizando a definição de d_{sv} , apresentaram valores distantes dos obtidos experimentalmente, apresentando um desvio médio de $18,43 \pm 14,71$, enquanto os valores fornecidos utilizando d_i apresentaram um desvio médio de $-8,25 \pm 20,29$, indicando que a melhor definição de diâmetro médio a ser utilizada nesse trabalho é o diâmetro médio linear. A grande dispersão dos dados em relação a média indica a necessidade de um melhor ajuste da constante B para a Equação de Ergun.

Foi escolhido um valor de velocidade de 0,6 m/s, para testar a aplicação da definição de diâmetros médios, porque essa velocidade é comum a todas as curvas e, a partir desse valor a diferença entre as curvas torna-se mais evidente, comportamento este que pode ser observado na Figura 33.

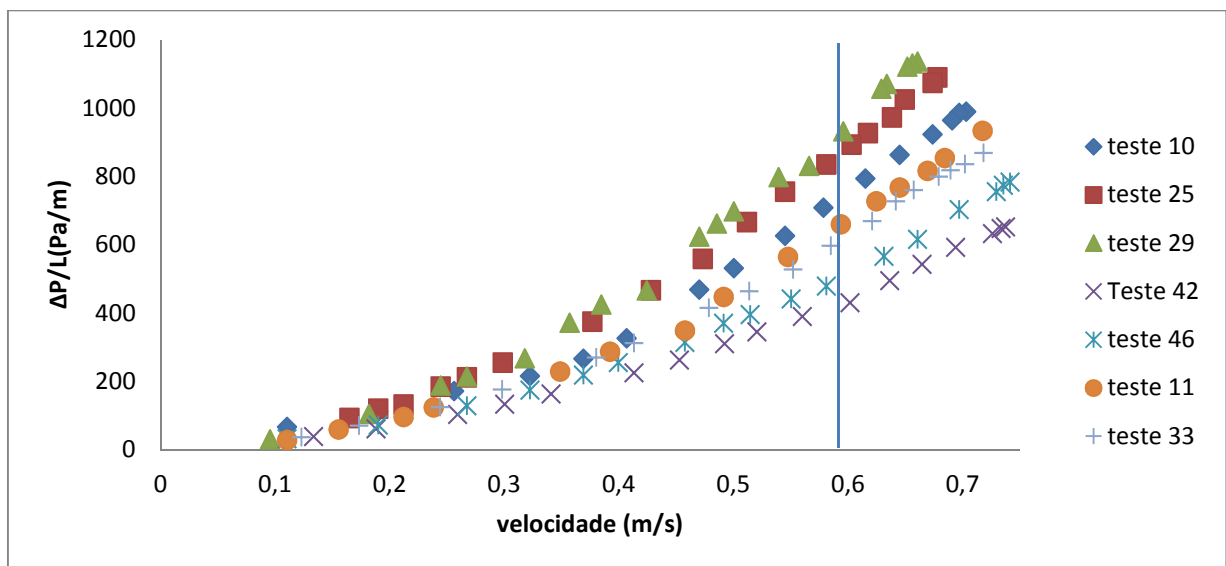


Figura 33 - Relação entre perda de carga e velocidade para diferentes testes.

Para velocidades menores, os pontos encontram-se concentrados e à medida que a velocidade aumenta, o espaçamento entre as curvas começa a se manifestar. Como alguns testes não atingiram a velocidade de 0,7 m/s, então concluiu-se que o melhor valor a ser escolhido era o de 0,6 m/s.

Definido o melhor diâmetro médio a ser adotado, é feito então o ajuste da equação de Ergun, por ser a equação mais amplamente utilizada (Mayerhofer (2011),

Nemec e Levec (2005), Hicks (1970)). Para a adequação ao sistema em questão, é feito o ajuste das constantes de Ergun.

4.2.4 Cálculo das constantes para o modelo de Ergun

Como o sistema apresenta-se em regime turbulento, o termo que quantifica a perda de carga por energia viscosa é mantido constante e apenas o termo de perda de carga por energia cinética é ajustado.

Inicialmente, foram propostas, nesse trabalho, cinco hipóteses para o cálculo da constante de Ergun, com base nos valores da constante B obtidas para os testes com as frações puras. As hipóteses encontram-se listadas na Tabela 19.

Tabela 19 - Hipóteses adotadas para o ajuste da constante B da Equação de Ergun.

Hipótese	
1	$B = \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{n}$
2	$B = \sum(x_i \cdot B_i)$
3	$B = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{B_i}}$
4	$B = \sum(x_i \cdot B_i) \varepsilon^n$
5	$B = \frac{\sum_{i=1}^n N p_i \cdot B_i}{N p_{total}}$

Fonte: O autor (2011)

A hipótese número 1 foi proposta como sendo uma média aritmética entre os valores de B obtidos para as frações puras. O valor obtido foi de 5,04, incapaz de reproduzir o comportamento de alguns sistemas e apresentando um desvio médio de $(-2,27 \pm 19,11)$ em relação aos dados obtidos experimentalmente.

A segunda proposta teve como objetivo avaliar a dependência entre a fração granulométrica e a constante B. Foram obtidos valores em torno de 4 a 4,5 e o desvio médio observado foi de $(13,32 \pm 18,27)$ em relação aos dados experimentais.

Foi buscada uma segunda relação entre a fração granulométrica e o B das frações puras, sendo proposta a hipótese número 3, também listadas na tabela 19, mas o resultado obtido não foi o esperado, e o desvio médio apresentou um aumento em relação a segunda hipótese, mantendo-se em $(13,77 \pm 17,81)$, em relação aos valores experimentais.

Uma nova abordagem utilizada foi o ajuste da constante B como dependente da porosidade do leito. Para tanto, foi introduzido um termo ε^n , em que n representa um termo ajustado para cada um dos testes. O termo n assumiu valores compreendidos entre -0,97 e 0,28, sendo impossível a utilização do mesmo valor de n para todos os testes, o que torna inviável a utilização dessa hipótese.

A perda de carga sofreu maior influência das partículas menores. Assim a constante B das partículas menores seria capaz de melhor reproduzir o sistema. Foi utilizado então o número de partículas para ponderar as constantes, pois o número de partículas menores utilizadas foi muito maior que o de partículas maiores, sendo que essa abordagem faz com o que aumente o valor da constante B média. Utilizando a quinta hipótese, 72% dos valores de perda de carga fornecidos pela equação de Ergun apresentaram um desvio em torno de $\pm 15\%$ em relação aos valores experimentais.

Os valores de B calculados pela hipótese 5 apresentaram valores entre 4,99 e 5,12. Para a maioria dos testes, como, por exemplo, para o Teste 26 apresentado na Figura 34, o resultado obtido foi satisfatório. Apenas para alguns testes, como os Testes 16 e 13 apresentados nas Figuras 35 e 36 respectivamente, o desvio dos dados fornecidos pelo modelo em relação aos dados experimentais foi acima do esperado.

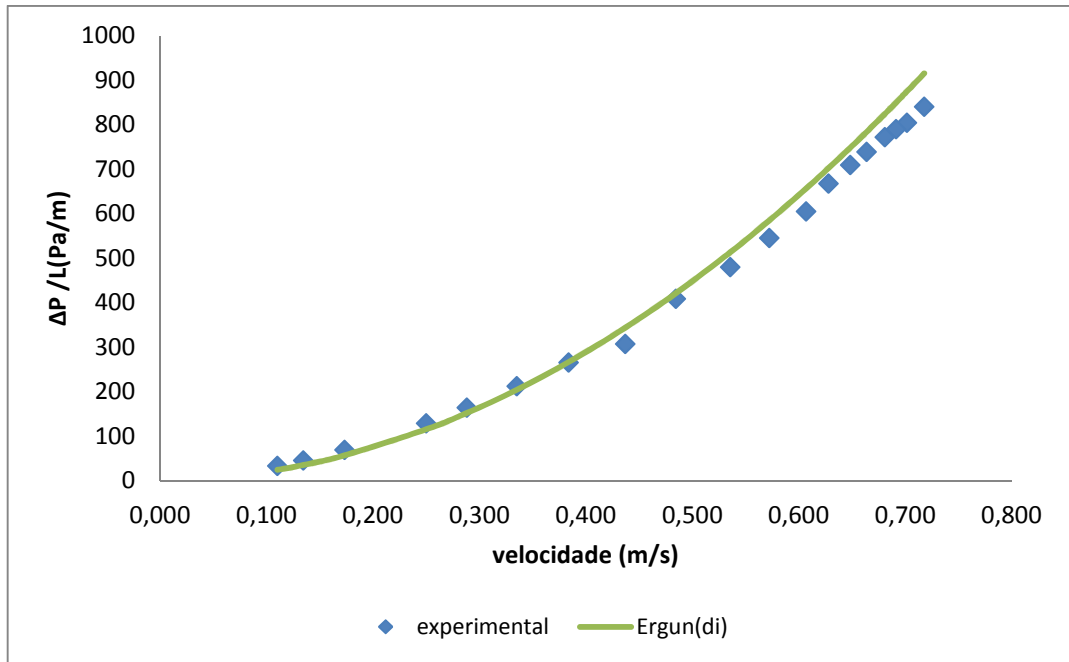


Figura 34 - Dados experimentais e fornecidos pela equação de Ergun para o Teste 26

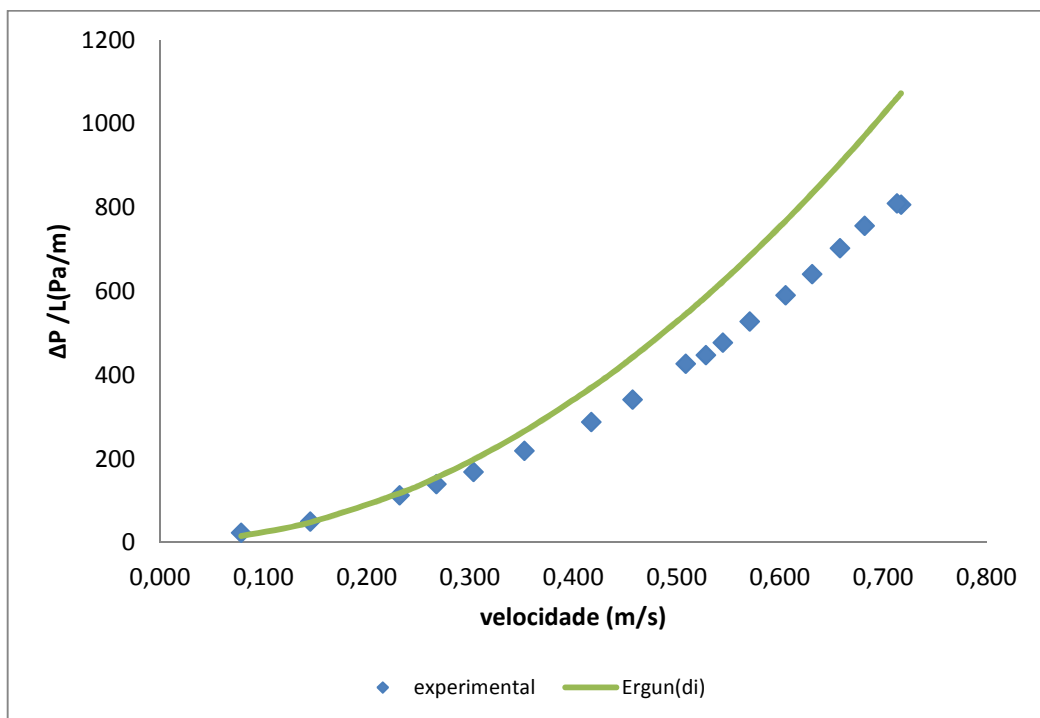


Figura 35 - Dados experimentais e fornecidos pela equação de Ergun para o Teste 16

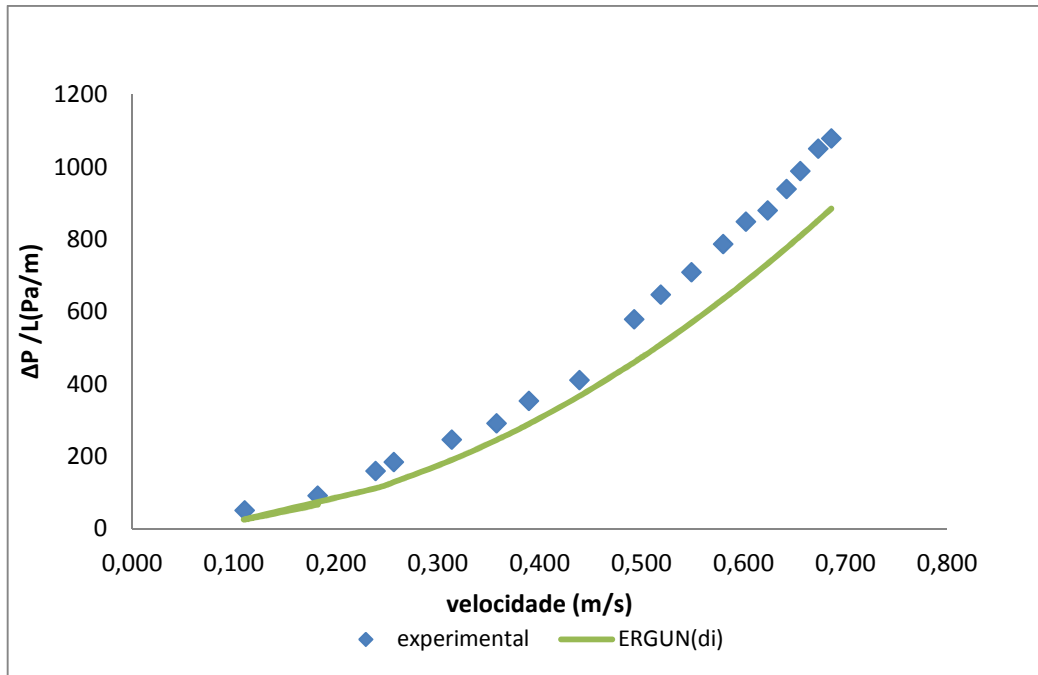


Figura 36 - Dados experimentais e fornecidos pela equação de Ergun para o Teste 13.

A Figura 37 foi confeccionada utilizando os valores, em módulo, dos desvios obtidos em relação aos dados fornecidos pela equação de Ergun, com o valor de B calculado a partir da hipótese número 5, e os valores obtidos experimentalmente para cada um dos testes.

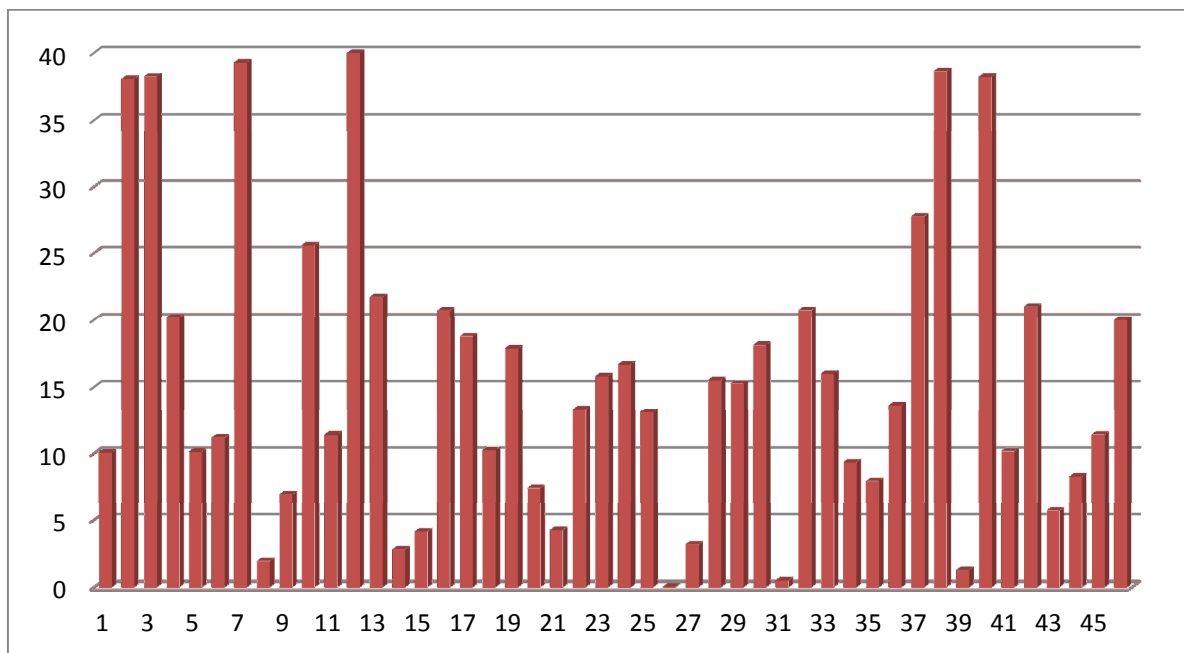


Figura 37 – Desvios em módulo para cada um dos testes.

O ajuste fornecido pela utilização da quinta hipótese foi o que melhor se adaptou ao sistema, ainda que alguns valores se afastem da média, o modelo proposto é capaz de prever a quantidade de perda de carga do sistema.

5 Conclusões

- As partículas podem ser caracterizadas, segundo seu diâmetro, utilizando a média entre as aberturas das peneiras. Dados como a esfericidade de partícula e porosidade do leito são de fundamental importância para o estudo do leito.
- A utilização de um permeâmetro de maior diâmetro minimiza o efeito de parede, o que possibilita a utilização dos dados experimentais no projeto desses equipamentos. Aumentando as dimensões do permeâmetro pode-se utilizar uma quantidade maior de xisto em cada uma das bateladas propiciando o melhor empacotamento das partículas no leito minimizando a ocorrência de erros experimentais.
- Após o processo de preparação das amostras de xisto betuminoso, foram calculados os valores de esfericidade para todas as faixas granulométricas. Obtiveram-se como resultados valores próximos entre si, indiferentes da distribuição de tamanho escolhidos.
- A partir dos dados experimentais obtidos para frações puras foram avaliados os modelos de perda de carga em leitos fixos apresentados na literatura. O modelo de MacDonald apresentou um melhor ajuste ao representar a perda de carga em um leito constituído de partículas maiores.
- A equação proposta por Ergun e o ajuste das constantes dependentes das esfericidades proposto por Nemeç e Levec apresentou um melhor resultado após o ajuste dos parâmetros, indicando assim que para cada sistema diferente faz-se necessário o ajuste dos parâmetros.
- Ao se trabalhar com um sistema constituído de partículas de superfície irregular, dados sobre a esfericidade das partículas são de fundamental importância para prever o comportamento do sistema.
- A utilização de misturas visa a obtenção da melhor quantidade de cada uma das frações das partículas de xisto. Após a realização dos experimentos verificou-se que a utilização de uma pequena quantidade de partículas x_F aumenta de forma significativa a perda de carga do sistema.
- Para o cálculo do diâmetro médio da mistura foram utilizadas as definições de diâmetro encontradas na literatura. Destaca-se a utilização do diâmetro médio

de Sauter (d_{sv}) pela sua ampla utilização em trabalhos científicos, mas no trabalho em questão foi a definição de diâmetro médio linear (d_l) que apresentou os menores desvios para os valores de perda de carga calculados.

- 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 das constantes ajustadas para as frações puras, tentou-se estabelecer uma relação entre os coeficientes ajustados e um coeficiente médio que represente as diferentes misturas das partículas de xisto. Foram propostas hipóteses em que foram relacionadas as constantes e as frações de cada uma das faixas granulométricas. Para muitas hipóteses o resultado obtido não foi satisfatório, porém para a hipótese que relacionou as constantes com a fração de números de partículas o resultado foi plenamente satisfatório para a maior parte das composições analisadas. Esses resultados possibilitam usar o modelo desenvolvido para o projeto e operação de unidades que usam tais sistemas.

6 Referências Bibliográficas

ALLEN, T., Particle Size Measurement, Ed. Springer, 5ª edição, 1997.

ALLEN, T., Particle Size Measurement. Powder Technology Series, Chapman & Hall, 1990, pág 125-126.

ANDERSSON, K.E.B. ,Pressure drop in packed beds, Trans. Royal Inst. Technol. Stockholm, Sweden, No. 201, 1963.

BARTKE JC, Duvall JJ. Proc. of ans. topical MTG. Energy and minerals resources recovery, April; 1977 p. 516.

CARMAN, P.C., Fluid flow through packed beds. Transactions of the Institution of Chemical Engineers 15, p. 150 – 166, 1937.

COMITI, J.; RENAUD, M. A new model for determining mean structure parameters of fixed beds from pressure drop measurements: application to beds packed with parallelepipedal particles. Chemical Engineering Science, Amsterdam, v. 44, no. 7, p. 1539-1545, 1989.

de KLERK, A.,(2003) Voidage variation in packed beds at small column to particle diameter ratios, AIChE J. volume 49 pag 2022–2029, 2003.

DELMÉE, G.J. Manual de medição de vazão. 2.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

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

Du Plessis JP, Woudberg S. Pore- Scale derivation of the Ergun equation to enhance its adaptability and generalization. Chemical Engineering Science , v 63, p.2576- 86, 2008.

EISFELD, B.; SCHNITZLEIN, K. ,The influence of confining walls on the pressure drop in packed beds, Chemical Engineering Science, Vol 56, p. 4321-4329, 2001.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. Chemical Engineering Progress, Philadelphia, v. 48, p. 1179-1184, 1952.

FOSCOLO, P. U.; GIBILARO, L. G.; WALDRAM, S. P. A unified model for particulate expansion of fluidised beds and flow in fixed porous media. Chemical Engineering Science, Netherlands, v. 38, no. 8. p. 1251-1260, 1983.

FOUMENY, E.A., *et al.* Elucidation of pressure drop in packed bed systems. Applied Thermal Engineering, Vol 16. N° 3. Pág 195-202, 1996.

GIBILARO, L. G. *et al.* Generalized friction factor and drag coefficient correlations for fluid particle interactions. Chemical Engineering Science, Netherlands, v. 40, no. 10. p. 1817-1823, 1985.

GIBILARO, L. G. *et al.* Generalized friction factor and drag coefficient correlations for fluid particle interactions. Chemical Engineering Science, Netherlands, v. 40, no. 10. p. 1817-1823, 1985.

HANDLEY, D., HEGGS, P.J. ,“Momentum and heat transfer mechanisms in regular shaped packings”, Trans. Inst. Chem. Eng. Vol 46, p.T251–T264, 1968.

HARAK A.E., Dockter L, Long A, Sohns HW, US BuMines RI 7995. US Bureau of Mines, Laramie, Wyoming, 1974.

HICKS, R.E. Pressure drop in packed bed of spheres, Ind. Eng. Chem. Fund. 9 (3) 500 – 502, 1970.

HIRSCH, R. L., BEZDEK, R., WENDLING, R. Peaking of world oil production: impacts, mitigation, & risk management. Washington: DOE, 2005. P.91.

JESCHAR R. Druckverlust in Mehrkornschüttungen aus Kugeln, Arch. Eisenhiittenw 35. p. 91–108, 1964.

JUKKOLA, E.E. Denilauler A.J, Jensen H.B, Barnet WI, Murphy WI. Ind Eng Chem. 45: 2711, 1953.

KEYSER, M. J. *et al.* Effect of coal particle size distribution on packed bed pressure drop and gas flow distribution. Fuel, Amsterdam, v. 85, ed. 10-11, p. 1439-1445, jul./ago. 2006.

LAMBOURNE, R.; STRIVENS, T. A. Paint and surface coatings: theory and practice. In:DOROSZKOWSKI, A. Particle size and size measurement. Cambridge:Woodhead Publishing, 1999.

LEVA, M,. Fluidization, McGraw-Hill Book Co, New York, 1959.

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.

MASSARANI, G, Fluidodinâmica em sistemas particulados, Editora UFRJ, 2002.

MATZICK A, Dannenberg RO, Ruark JR, Philips JE, Lankford JD, Guthrie B. US BuMines Bull 635. Bureau of Mines, Rifle, CO, 1966.

MAYERHOFER, M. *et al.* Experimental investigation of pressure drop in packed beds of irregular shaped wood particles. Powder Technology, 2010.

McKEE, R.H. ,“ Shale Oil” , American Chemical Society. The Chemical Catalog Company, Inc , New York U.S.A., 1925.

MONTILLET, A. *et al.* About a correlating equation for predicting pressure drops through packed beds of spheres in a large range of Reynolds numbers. Chemical Engineering and Processing, Amsterdam, v. 46, p. 329-333, 2007.

MONTILLET, A. Flow through a finite packed bed of spheres: a note on the limit of applicability of the Forchheimer-type equation, J.Fluids Eng. 126 139- 143, 2004.

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.

OZAH, *et al* “A modification on Ergun’s Correlation for Use in Cylindrical Packed Beds with Non-spherical Particles”, Advanced Powder Technology, Vol 19, p. 369-381, 2008.

PETROBRAS a. Espaço conhecer Petrobras. Disponível em <http://www2.petrobras.com.br/espacpcpnhecer/Produtos/xisto.asp>. Acesso em 28 setembro 2010.

PETROBRAS b. Espaço conhecer Petrobras. Disponível em: <http://www2.petrobras.com.br/espacoconhecer/Produtos/xisto.asp>. Acesso em 28 de setembro de 2010.

REICHEL, W., Zur Berechnung des Druckverlustes einphasig durchströmter Kugel – und Zylinderschüttungen , Chem. Ing. Tech 44. p 1068-1071, 1972.

ROSE, H.E, Rizk, A.M.A, Further researches in fluid flow through beds of granular material, Proc. Inst. Mech. Eng. 160 pag. 493 -503, 1949.

ROSE, H.E. On the resistance coefficient-Reynolds number relationship for fluid flow through beds of granular material, Proc. Inst. Mech. Eng. 153 154 – 161, 1945.

SANTOS M.M., *et al.*, A importância da industrialização do xisto brasileiro frente ao cenário energético mundial. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 63(4): 673-678, out. dez. 2010.

SANTOS, L.C. “Gestão de recursos e reservas para aumento do aproveitamento do folhelho pirobetuminoso e aumento da recuperação de sua matéria orgânica na forma dos derivados óleo e gás”. Dissertação de mestrado submetido à Escola Politécnica de São Paulo USP – São Paulo, 2009.

SAWISTOSKI, H., “ Flooding velocities in packed columns operating at reduced pressure”, Chemical Engineering Science, nº06 p. 138, 1957.

TALLMADGE, J.A.. Packed bed pressure drop – an extension to higher Reynolds numbers. A.I.C.H.E. Journal 16, 1092-1093, 1970.

UNICAMP. A Petrobras no Paraná negocia contratos para exportar tecnologias para países da Àsia. Unicamp: Núcleo de Excelência em Engenharia de Petróleo. Biblioteca Virtual de Engenharia do Petróleo. Boletim BE52 de 16.09.2004.

YONG S. C., *et al.* .A Semi- empirical Correlation for Pressure Drop in Packed Beds of Spherical Particles, 2008.

ZHAVORONKOV, N.M., AEROV, M.E., UMNİK, N.N., Hydraulic resistance and density of packing of a granular bed. Journal Phys. Chem. 23. P 342 – 361, 1949.

ZIÓLKOWSKA,I.; ZIÓLKOWSKI, D ., Fluid flow inside packed beds, Chem. Eng. Process., Vol 23 p.137-164, 1988.