



**Campus de São Carlos**

INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE LAVAGEM NAS  
CARACTERÍSTICAS DE CARVÕES ANTRACITOSO E  
BETUMINOSO UTILIZADOS EM MEIO FILTRANTE

GIOVANA KÁTIE WIECHETECK

Orientador: Prof. Dr. LUIZ DI BERNARDO

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**



**ESCOLA DE ENGENHARIA  
DE SÃO CARLOS**

✓

**INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE LAVAGEM NAS  
CARACTERÍSTICAS DE CARVÕES ANTRACITOSO E  
BETUMINOSO UTILIZADOS EM MEIO FILTRANTE**

DEDALUS - Acervo - EESC



311000366625

GIOVANA KÁTIE WIECHETECK

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, para a obtenção do Título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: PROF. DR. LUIZ DI BERNARDO

São Carlos

1996

27/09/15



Chave	TASS-EESEC
Cod.	6305
Tombo	208196

Hidráulica e saneamento

st 0745859

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

Wiecheteck, Giovana Kátie  
W642i      Influência do método de lavagem nas  
                  características de carvões antracitoso e  
                  betuminoso utilizados em meio filtrante /  
                  Giovana Kátie Wiecheteck. -- São Carlos, 1996.

Dissertação (Mestrado). -- Escola de Engenharia  
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1996.  
Orientador: Prof. Dr. Luiz Di Bernardo.

1. Meio filtrante. 2. Carvão antracitoso. 3.  
Carvão betuminoso. I. Título

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 27-9-1996  
pela Comissão Julgadora:

---

Prof. Doutor **LUIZ DI BERNARDO** (Orientador)  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade São Paulo)

---

Prof. Doutor **BERNARDO ARANTES DO NASCIMENTO TEIXEIRA**  
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)

---

Prof. Doutor **PEDRO ALÉM SOBRINHO**  
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)

---

Prof. Dr. **EDUARDO CLETO PIRES**  
Coordenador da área - Hidráulica e Saneamento

---

Prof. Dr. **JOSE CARLOS ANGELO CINTRA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*Dedico este trabalho aos meus pais,  
Gilson e Regina, pelo amor e esforço  
dedicados na formação humana e  
profissional de seus filhos.*

***Agradecimento especial***

*A Nancho pelo carinho e compreensão  
recebidos em todos os momentos.*

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Luiz Di Bernardo pela paciência e orientação sempre segura.

À Agência Financiadora da Bolsa - CAPES.

Ao CIRDE - Centro Industrial Rio Deserto pelas amostras de carvão antracitoso e de carvão betuminoso utilizadas para a realização deste trabalho.

A Felipe Ordóñez Molina, pelo convívio e amizade durante o mestrado e principalmente pela participação na fase experimental.

Ao técnico do Laboratório de Instalações Hidráulico-Sanitárias, Francisco, pela montagem da instalação piloto.

Aos técnicos do Laboratório de Saneamento, Paulo, Maria Aparecida, Julio e Miguel, pela ajuda na determinação das características químicas do material e em especial pela amizade.

Ao professor Geraldo Lombardi e funcionários do Laboratório de Metrologia, por terem auxiliado na calibração do rotâmetro de ar.

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnica pelo acompanhamento na caracterização do material.

À Oficina do Departamento de Engenharia Elétrica pela confecção do flutuador utilizado no rotâmetro para ar.

À amiga Delma pela amizade e valiosas contribuições para este trabalho.

A todos os meus amigos que participaram do meu dia a dia e que de uma forma ou de outra ajudaram na conclusão deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>viii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>x</b>
<b>"ABSTRACT".....</b>	<b>xi</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO .....</b>	<b>3</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
<b>    3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>4</b>
<b>    3.2. MATERIAIS FILTRANTES.....</b>	<b>6</b>
3.2.1. Considerações Gerais .....	6
3.2.2. Propriedades dos Materiais Filtrantes.....	7
3.2.2.1. Tamanho dos Grãos e Curva de Distribuição Granulométrica.....	7
3.2.2.2. Forma e Geometria dos Grãos .....	9
3.2.2.3. Porosidade .....	15
3.2.2.4. Massa Específica.....	15
3.2.2.5. Dureza dos Grãos.....	16
3.2.2.6. Solubilidade em Ácido Clorídrico .....	17
3.2.2.7. Solubilidade em Hidróxido de Sódio.....	18
<b>    3.3. MEIO FILTRANTE .....</b>	<b>18</b>
3.3.1. Considerações Gerais .....	18
3.3.2. Tipos de Meios Filtrantes.....	18
3.3.3. Perda de Carga em Meios Granulares.....	21
3.3.4. Meios Filtrantes Fluidificados.....	22

3.3.5. Velocidade Mínima de Fluidificação .....	24
3.3.6. Expansão do Meio Filtrante .....	26
<b>3.4. LAVAGEM DO MEIO FILTRANTE .....</b>	<b>28</b>
3.4.1. Considerações Gerais .....	28
3.4.2. Métodos de Lavagem .....	28
3.4.2.1. Lavagem Exclusivamente com Água .....	29
3.4.2.2. Lavagem Superficial ou Sub-superficial com Água Seguida de Lavagem Ascensional com Água.....	30
3.4.2.3. Lavagem Independente com Ar e Água .....	30
3.4.2.4. Lavagem Simultânea com Ar e Água.....	32
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS FILTRANTES .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS .....</b>	<b>39</b>
4.2.1. Determinação do Teor de Umidade .....	39
4.2.2. Determinação do Teor de Cinzas.....	39
4.2.3. Determinação do Teor de Óleos .....	40
4.2.4. Solubilidade em Ácido Clorídrico .....	42
4.2.5. Solubilidade em Hidróxido de Sódio.....	42
4.2.6. Difração em Raio X.....	43
4.2.7. Presença de Mercúrio na Água em Contato com o Material.....	43
<b>4.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....</b>	<b>44</b>
4.3.1. Dureza do Material .....	44
4.3.2. Curva de Distribuição Granulométrica .....	44
4.3.3. Determinação da Massa Específica.....	44
4.3.4. Determinação do Diâmetro Volumétrico.....	45
4.3.5. Determinação do Coeficiente de Esfericidade e Porosidade .....	46
<b>4.4. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO PILOTO.....</b>	<b>49</b>

<b>4.5. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS RELATIVOS À LAVAGEM DO MEIO GRANULAR.....</b>	<b>53</b>
4.5.1. Lavagem Exclusivamente com Água .....	54
4.5.2. Lavagem Independente com Ar e Água.....	54
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>59</b>
<b>    5.1. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS FILTRANTES.....</b>	<b>59</b>
5.1.1. Características Químicas.....	59
5.1.2. Características Físicas .....	60
<b>    5.2. SIMULAÇÕES DE LAVAGEM DO MEIO GRANULAR.....</b>	<b>64</b>
<b>6. DISCUSSÃO.....</b>	<b>77</b>
<b>    6.1. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS FILTRANTES.....</b>	<b>77</b>
6.1.1. Características Químicas.....	77
6.1.2. Características Físicas .....	78
<b>    6.2. SIMULAÇÕES DE LAVAGEM DO MEIO GRANULAR.....</b>	<b>79</b>
<b>7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>128</b>
<b>ANEXO D.....</b>	<b>159</b>
<b>ANEXO E.....</b>	<b>162</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>167</b>
<b>APÊNDICE 1</b>	

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Porcentagens de Carbono, Oxigênio e Hidrogênio, desde a Madeira, Turfa, Linhito, Carvão Betuminoso, Antracito Figura 3.2 - Modelo da estrutura molecular do carvão betuminoso proposto por WISER apud PEREIRA (1993) Figura 3.3 - Curva de distribuição granulométrica típica de um material filtrante. Figura 3.4 - Escala de Comparação Visual da Forma dos Grãos e Valores do Coeficiente de Esfericidade Figura 3.5 - Forma dos grãos inseridos em um círculo Figura 3.6 - Variação do tamanho dos grãos com a altura para meios filtrantes constituídos de um, dois ou três diferentes tipos de material após a lavagem e estratificação. Figura 3.7 - Variação da posição dos grãos durante a lavagem Figura 3.8 - Características de um Meio Filtrante Fluidificado Figura 3.9 - Condição de “collapse-pulsing” Figura 4.1 - Esquema da obtenção de óleos por extração a quente Figura 4.2 - Desenho esquemático da instalação piloto Figura 4.3 - Fotografia da Instalação Piloto utilizada para as Simulações de Lavagem Figura 4.4 - Fotografia do bocal fixado à 0,50 m do fundo da coluna de ensaios Figura 4.5 - Fotografia mostrando a aplicação de ar durante a lavagem independente com ar e água Figura 4.6 - Fotografia mostrando a introdução de água no sentido ascensional, logo após a aplicação de ar	4 5 8 11 13 19 23 24 33 41 51 52 53 55 56 65 66
---	---

**Figura 5.1 - Curvas de distribuição granulométrica do carvão antracitoso (amostra 1) no estado natural e após simulações de lavagens intermitentes exclusivamente com água e independente com ar e água**

**Figura 5.2 - Curvas de distribuição granulométrica do carvão antracitoso (amostra 1) no estado natural e após simulações de lavagens contínuas exclusivamente com água e independente com ar e água**

Figura 5.3 - Curvas de distribuição granulométrica do <u>carvão antracitoso (amostra 2)</u> no estado natural e após simulações de lavagens intermitentes exclusivamente com água e independente com ar e água	67
Figura 5.4 - Comparação da % de material retido em cada faixa granulométrica de <u>carvão betuminoso</u> no estado natural e após lavagens intermitentes com água e com ar e água	68
Figura 5.5 - Comparação da % de material retido em cada faixa granulométrica de <u>carvão antracitoso (amostra 1)</u> no estado natural e após lavagens intermitentes e contínuas exclusivamente com água e independente com ar e água	72
Figura 5.6 - Comparação da % de material retido em cada faixa granulométrica de <u>carvão antracitoso (amostra 2)</u> no estado natural e após lavagens intermitentes exclusivamente com água e independente com ar e água	74
Figura 5.7 - Comparação da % de material retido em cada faixa granulométrica de <u>carvão betuminoso</u> no estado natural e após lavagens intermitentes exclusivamente com água e independente com ar e água	75
Figuras B1 a B8 - Velocidade mínima de fluidificação e expansão do meio granular referentes a cada faixa granulométrica de carvão antracitoso (amostra 2)	94 a 108
Figuras B9 a B16 - Velocidade mínima de fluidificação e expansão do meio granular referentes a cada faixa granulométrica de carvão betuminoso	110 a 124
Figuras C9 a C13 - Velocidade mínima de fluidificação e expansão do meio granular referentes ao meio granular estratificado de carvão antracitoso (amostra 1)	138 a 146
Figuras C14 a C16 - Velocidade mínima de fluidificação e expansão do meio granular referentes ao meio granular estratificado de carvão antracitoso (amostra 2)	148 a 152
Figuras C17 a C19 - Velocidade mínima de fluidificação e expansão do meio granular referentes ao meio granular estratificado de carvão betuminoso	154 a 158

Figura D1 - Variação da temperatura da água e expansão do meio granular durante lavagem contínua com água	160
Figura D2 - Variação da temperatura da água e expansão do meio granular durante lavagem contínua independente com ar e água	161
Figura E1 e E2- Fotografia dos grãos correspondentes a faixa granulométrica de 0,59 - 0,71 mm de carvão antracitoso (amostra 2) no estado natural e após lavagens independentes com ar e água	163
Figura E3 e E4 - Fotografia dos grãos correspondentes a faixa granulométrica de 2,00 -2,40 mm de carvão antracitoso (amostra 2) no estado natural e após lavagens independentes com ar e água	164
Figura E5 e E6- Fotografia dos grãos correspondentes a faixa granulométrica de 0,59 - 0,71 mm de carvão betuminoso no estado natural e após lavagens independentes com ar e água	165
Figura E7 e E8 - Fotografia dos grãos correspondentes a faixa granulométrica de 2,00 - 2,40 mm de carvão betuminoso no estado natural e após lavagens independentes com ar e água	166

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Valores do Coeficiente de esfericidade, fator de forma e porosidade típica de grãos de areia	14
Tabela 3.2 - Definições de diâmetros virtuais de grãos não esféricos	14
Tabela 3.3 - Massa específica dos materiais filtrantes usuais	16
Tabela 3.4 - Escala de Mohs	17
Tabela 3.5 - Principais características de meios filtrantes utilizados em filtros com escoamento descendente	20
Tabela 3.6 - Características de materiais filtrantes avaliados em estudos de “collapse-pulsing”	34
Tabela 3.7 - Equações que descrevem o “collapse-pulsing” para os materiais filtrantes citados na Tabela 3.6	35
Tabela 4.1 - Características das amostras de carvão antracitoso e carvão betuminoso utilizadas nos ensaios	38
Tabela 4.2 - Composição das cinzas das amostras de carvão antracitoso e carvão betuminoso utilizadas nos ensaios	38
Tabela 5.1 - Resultados das análises químicas feitas para as amostras de carvão	59
Tabela 5.2 - Valores de massa específica do material granular	60
Tabela 5.3 - Velocidade mínima de fluidificação, perda de carga no meio granular fluidificado, diâmetro volumétrico, porosidade, coeficiente de esfericidade correspondentes a cada faixa granulométrica de <u>carvão antracitoso (amostra 2)</u>	61
Tabela 5.4 - Velocidade mínima de fluidificação, perda de carga no meio granular fluidificado, diâmetro volumétrico, porosidade, coeficiente de esfericidade correspondentes a cada faixa granulométrica de <u>carvão betuminoso</u>	62
Tabela 5.5 - Valores de Vmf observados e calculados para as faixas granulométricas de <u>carvão antracitoso (amostra 2)</u>	62
Tabela 5.6 - Valores de Vmf observados e calculados para as faixas granulométricas de <u>carvão betuminoso</u>	63

Tabela 5.7 - Resumo comparativo do tamanho do menor grão, tamanho do maior grão, $d_{10}$ , $d_{60}$ e CD antes e depois das simulações de lavagens	69
Tabela 5.8 - Velocidade mínima de fluidificação, perda de carga no meio granular fluidificado, diâmetro equivalente, porosidade, coeficiente de esfericidade médios correspondentes aos meios granulares estratificados	70
Tabela 5.9 - % Material retido em cada faixa granulométrica do <u>carvão antracitoso (amostra 1)</u> no estado natural e após as simulações de lavagens	71
Tabela 5.10 -% Material retido em cada faixa granulométrica do <u>carvão antracitoso (amostra 2)</u> no estado natural e após as simulações de lavagens	73
Tabela 5.11 --% Material retido em cada faixa granulométrica do <u>carvão antracitoso (amostra 2)</u> no estado natural e após as simulações de lavagens	73
Tabela D1 - Leituras de Temperatura da Água e Expansão do Meio Granular correspondentes à Lavagem Contínua com Água	160
Tabela D2 - Leituras de Temperatura da Água e Expansão do Meio Granular correspondentes à Lavagem Contínua com Ar e Água	161

## LISTA DE QUADROS

Quadro A1 - Determinação da massa específica dos materiais granulares..	84
Quadro A2 - Determinação do diâmetro volumétrico médio.....	85
Quadro A3 a A8 - Determinação do diâmetro equivalente do meio granular estratificado.....	86 a 91
Quadro B1 a B8 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação de cada faixa granulométrica de carvão antracitoso (amostra 2).....	93 a 107
Quadro B9 a B16 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação de cada faixa granulométrica de carvão betuminoso.....	109 a 123
Quadro B17 a B19 - Composição e curva de distribuição granulométrica do carvão antracitoso (amostra 1), carvão antracitoso (amostra 2) e carvão betuminoso no estado natural.....	125 a 127
Quadro C1 a C4- Composição e curva de distribuição granulométrica do carvão antracitoso (amostra 1) após simulações de lavagem .....	129 a 132
Quadro C5 e C6- Composição e curva de distribuição granulométrica do carvão antracitoso (amostra 2) após simulações de lavagem .....	133 e 134
Quadro C7 e C8 - Composição e curva de distribuição granulométrica do carvão betuminoso após simulações de lavagem .....	135 e 136
Quadro C9 a C13 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação do meio granular estratificado no estado natural e após simulações de lavagens intermitentes e contínuas de carvão antracitoso (amostra 1).....	137 a 145
Quadro C14 a C16 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação do meio granular estratificado no estado natural e após simulações de lavagens intermitentes exclusivamente com água e independente com ar e água de carvão antracitoso (amostra 2).....	147 a 151
Quadro C17 a C19 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação do meio granular estratificado no estado natural e após	

simulações de lavagens intermitentes exclusivamente com água e independente com ar e água de carvão betuminoso.....153 a 157

## LISTA DE SÍMBOLOS

a, b	Constantes que relacionam a vazão de água e a vazão de ar para a condição de “collapse-pulsing”
c, d	Constantes dependentes do número de Reynolds de grãos esféricos para a determinação do fator de forma dinâmico
$d_h$	Diâmetro de uma esfera de mesma massa específica e mesma velocidade de sedimentação de um grão em um fluido (L)
$d_v$	Diâmetro volumétrico médio (L)
$d_{10}$	Tamanho efetivo do material granular (L)
$d_{60}$	Tamanho equivalente a 60% (em peso) de uma amostra representativa do material granular que passa no peneiramento (L)
$d_{90}$	Tamanho equivalente a 90% (em peso) de uma amostra representativa do material granular que passa no peneiramento (L)
g	Aceleração da gravidade ( $LT^{-2}$ )
CD	Coeficiente de desuniformidade do material granular
$D_{eq}$	Diâmetro equivalente do meio granular (L)
$D_i$	Diâmetro médio correspondente a cada subcamada do meio granular (L)
E (%)	Expansão do meio filtrante (%)
FFD	Fator de forma dinâmico
FFG	Fator de forma dos grãos
$G_a$	Número de Galileu
$K_o$	Constante de Kozeny
$L_o$	Altura da camada de meio filtrante (L)
$L_{ex}$	Altura do meio filtrante expandido (L)
$M_g$	Massa de grãos correspondente a cada faixa granulométrica do material granular (M)
$N_g$	Número de grãos
$Q_a$	Taxa de aplicação de ar nas condições normais de pressão e temperatura ( $L^3 L^{-2} T^{-1}$ )

$Re$	Número de Reynolds
$Re_{mf}$	Número de Reynolds correspondente a velocidade mínima de fluidificação
$S_v$	Superfície específica dos grãos ( $L^2 L^{-3}$ )
$V$	Velocidade superficial da água ( $LT^{-1}$ )
$V_a$	Velocidade ascensional de água de lavagem ( $LT^{-1}$ )
$V_g$	Volume dos grãos correspondente a cada subcamada ( $L^3$ )
$V_{mf}$	Velocidade mínima de fluidificação ( $LT^{-1}$ )
$V_{mf90}$	Velocidade mínima de fluidificação correspondente ao $d_{90}$ do material granular do meio filtrante ( $LT^{-1}$ )
$V_n$	Velocidade de sedimentação de grãos esféricos de mesmo volume ( $LT^{-1}$ )
$V_s$	Velocidade de sedimentação para uma amostra representativa de grãos ( $LT^{-1}$ )
$X_i$	Fração de material no caso de material granular não uniforme
$\varepsilon_{ex}$	Porosidade do meio filtrante expandido
$\varepsilon_{exi}$	Porosidade de cada subcamada do meio filtrante expandido
$\varepsilon_0$	Porosidade inicial do meio filtrante fixo
$\mu$	Viscosidade absoluta da água ( $ML^{-1}T^{-1}$ )
$\rho_a$	Massa específica da água ( $ML^{-3}$ )
$\rho_g$	Massa específica do material granular ( $ML^{-3}$ )
$\psi_{sub}$	Coeficiente de esfericidade correspondente a cada subcamada
$\psi_{méd}$	Coeficiente de esfericidade médio correspondente ao meio granular não uniforme
$\Delta H$	Perda de carga total no meio filtrante (L)
$\Delta H_o$	Perda de carga no meio filtrante limpo (L)
$\Delta H_{imp}$	Perda de carga no meio filtrante devido à retenção de impurezas (L)
$\Delta H_f$	Perda de carga no meio filtrante fluidificado (L)

WIECHETECK, G.K. *Influência do Método de Lavagem na Características de Carvões Antracitoso e Betuminoso Utilizados em Meio Filtrante*. São Carlos, 1996, 169 p. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo verificar e comparar a alteração das características do carvão antracitoso e do carvão betuminoso utilizados em meio filtrante, devido ao efeito abrasivo causado entre os grãos decorrentes de lavagens exclusivamente com água e lavagens independentes com ar e água. Foram estudados dois tipos de carvão antracitoso e um tipo de carvão betuminoso, para os quais foram determinadas suas características químicas e físicas. Os ensaios foram realizados em uma instalação piloto montada na Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, USP, na qual foram feitas simulações de lavagens admitindo-se 1 lavagem diária durante um ano (365 lavagens) para cada método, de modo intermitente, em que o meio granular era compactado ao final de cada lavagem, e contínuo, sem compactação do meio granular. A velocidade ascensional utilizada para cada simulação de lavagem foi de 0,9 m/min, promovendo expansão no meio granular de 35 a 40%. A taxa de ar utilizada para as simulações de lavagens com aplicação de ar foi de 15 l/sm<sup>2</sup>. Após o término das 365 lavagens, foram determinados os valores médios do coeficiente de esfericidade e da porosidade do meio granular estratificado e construída a curva de distribuição granulométrica das amostras utilizadas nos ensaios. Concluiu-se que o carvão betuminoso apresentou comportamento semelhante ao dos carvões antracitosos e que o metodologia de lavagem contínua produz praticamente o mesmo efeito abrasivo comparada à metodologia de lavagem intermitente.

Palavras-chave: Meio filtrante, carvão antracitoso, carvão betuminoso.

WIECHETECK, G.K. *Washing Method Influence on Anthracite coal and Betuminous Coal Properties Used in Filter Media*. São Paulo, 1996, 169p. Dissertation (Master), School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo.

### **"ABSTRACT"**

This work had the objective to verify and to compare the alterations on the properties of Anthracite coal and Betuminous coal, due to the abrasive effect caused between the grains resulted from washing exclusively with water and independent washing with air and water. There were studied two types of Anthracite coal and one type of Betuminous coal, their chemical and physical properties were determined. The tests were performed at a pilot instalation setted at the School of Engineering of São Carlos - EESC,USP; where, were done simulations of washing, it was admitted one washing a day during one year (365 washing) for each method, in an intermitent way, in which the granular medium was compacted at the end of each washing, and continous without compactation of the granular medium. The ascending speed used for each simulation of washing was 0,9 m/min, promoting an expansion in the granular medium of 35 to 40%. The rate of air used for the simulations of washing with the apllication of air was 15 l/sm<sup>2</sup>. After the last of the 365 washing, were determined the average values of the coefficient of sphericity and porosity of the granular estratified medium and was constructed a curve of the granulometric distribution of the samples used during the tests. It was concluded that Betuminous coal shows similar behaviour as Anthracite coal and the continous method produce the same effect abrasive compared intermitent method.

Keywords: Filter media, anthracite coal, bituminous coal

## 1. INTRODUÇÃO

A filtração é a etapa principal e responsável pela produção de água em uma estação de tratamento, com qualidade condizente com o padrão de potabilidade.

Os meios filtrantes são constituídos de materiais granulares e utilizados para remover as impurezas presentes na água, sendo periodicamente necessária sua limpeza ou lavagem, a qual é realizada por meio de lavagem com água ou ar e água nos filtros rápidos.

O material granular comumente utilizado é a areia, que apresenta alta resistência à abrasão e não causa preocupação de perda de material devido aos efeitos abrasivos que ocorrem entre os grãos durante a lavagem. Devido ao aumento progressivo do consumo de água tratada, iniciou-se o estudo do desempenho de filtros com dupla camada, empregando-se o carvão antracitoso sobre a camada de areia em instalações existentes na década de sessenta. Foi constatado que com a utilização de meio filtrante constituído de camada dupla carvão antracitoso e areia, resultava mais profunda a penetração de impurezas, as carreiras de filtração eram mais longas, podiam ser usadas taxas de filtração mais altas e era menor a taxa de crescimento de perda de carga, quando comparados ao meio filtrante constituído por camada simples de areia.

O desgaste excessivo por abrasão observado principalmente no carvão antracitoso pode causar uma perda gradual do meio filtrante e redução do tamanho dos grãos, alterando a curva de distribuição granulométrica do material filtrante e diminuindo a duração da carreira de filtração, sendo necessária a reposição de carvão nos filtros, o que é geralmente feito anualmente nas estações de tratamento de água.

Além da qualidade, a disponibilidade e o custo do material filtrante são também fatores de grande importância, sendo necessário estudar a aplicabilidade de novos materiais granulares, como o carvão betuminoso, o qual, além de ser abundante no Brasil, apresenta custo da ordem de 10 a 20% do carvão antracitoso.

A formação do carvão betuminoso antecede ao carvão antracitoso, sendo eles diferenciados pelo grau de carbonificação, ou seja, o teor de carbono presente em cada tipo de carvão. No entanto, deve-se considerar que os carvões somente poderão ser empregados nas estações de tratamento de água, após conhecimento de certas propriedades físicas-químicas, normalmente não mencionadas em publicações sobre carvões nacionais, as quais até agora se limitaram a mencionar as propriedades energéticas e possibilidades de sua utilização como combustíveis.

## 2. OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa foi verificar e comparar a alteração das características do carvão antracitoso e do carvão betuminoso, utilizados em meio filtrante, devido ao efeito abrasivo entre os grãos, decorrentes de lavagens exclusivamente com água e de lavagens independentes com ar e água.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O carvão mineral pode ser definido como uma rocha sedimentar formada pela decomposição parcial de restos vegetais, que passa por várias fases denominadas turfa, linhito, hulha, carvão betuminoso e carvão antracitico.

De acordo com SILVA (1989), a evolução de turfa a antracito, através dos diferentes estágios a carvão marrom, carvão sub-betuminoso e a carvão betuminoso, é um processo geoquímico, chamado carbonificação, durante o qual os compostos gasosos ricos em oxigênio e hidrogênio são liberados ocorrendo uma relativa concentração de material sólido rico em carbono.

Na Figura 3.1 é mostrado o aumento do teor de carbono evidenciando um crescimento gradual do grau de carbonificação, nas fases de formação do antracito.

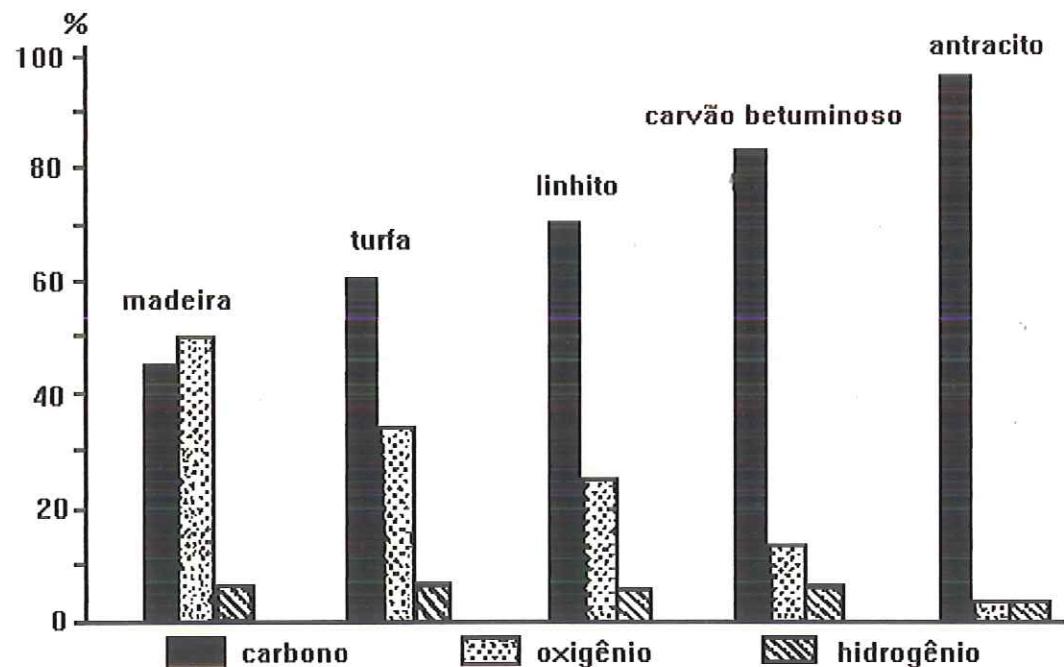


Figura 3.1 - Porcentagens de Carbono, Oxigênio e Hidrogênio, desde a Madeira, Turfa, Linhito, Carvão Betuminoso, Antracito

Fonte: LEINZ et al. (1969)

Segundo STACH apud SILVA (1989), o processo de carbonificação é causado principalmente pelo aumento de temperatura e tempo geológico, e o grau de carbonificação é determinado através da composição química do carvão.

A facilidade que os átomos de carbono possuem de estabelecer ligações entre si formando cadeias com diferentes estruturas, conferem aos carvões uma grande complexidade, sendo a estrutura química do carvão altamente controvertida. Um modelo para a estrutura molecular do carvão betuminoso, proposto por WISER apud PEREIRA (1993) está apresentado na Figura 3.2.

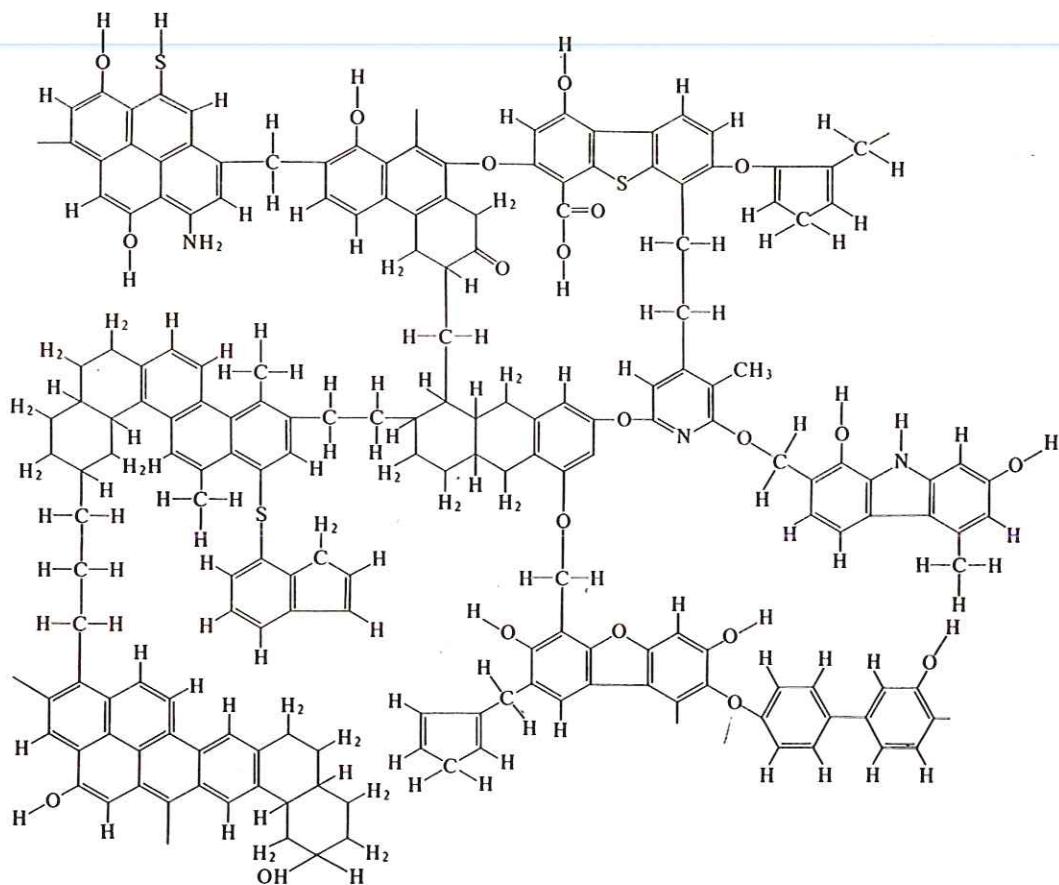


Figura 3.2 - Modelo da estrutura molecular do carvão betuminoso proposto por WISER apud PEREIRA (1993)

De acordo com GIBSON apud PEREIRA (1993), a maior parte dos átomos de carbono forma anéis aromáticos, apresentando também em sua estrutura grupos oxigenados na forma de carbonila, hidroxila e outros, assim como heteroátomos como N e S, além de cátions metálicos como Fe, Al, Si e Ca.

Algumas propriedades do carvão, como umidade e cinzas também são importantes para a sua caracterização. Segundo LEINZ et al.(1969), as cinzas são formadas pelos detritos de natureza inorgânica que se depositam junto aos restos vegetais. São minerais argilosos além de silte, havendo também a verdadeira cinza, isto é, os compostos minerais que constituíam o tecido vegetal formador do carvão. A importância da umidade reside no fato de ser necessária uma grande quantidade de energia para transformar a água líquida em vapor. Por isso, quanto maior a quantidade de água no carvão, menor será o seu valor energético.

No Brasil, as ocorrências de carvão limitam-se aos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná e vestígios no estado de São Paulo. A produção anual de carvão de 2,5 milhões de toneladas, sendo 1,5 milhão proveniente de Santa Catarina, segundo LEINZ et al.(1969).

### **3.2. MATERIAIS FILTRANTES**

#### **3.2.1. Considerações Gerais**

Os materiais granulares comumente utilizados como meios filtrantes são areia, carvão antracitoso e granada. Mais recentemente, o carvão ativado granular tem sido usado para remoção de odor e sabor da água, e também para adsorção de compostos orgânicos.

Como foi visto anteriormente, o carvão betuminoso, na sua formação, apresenta um grau de carbonificação inferior ao do carvão antracitoso, sendo possível sua utilização como material filtrante. Apesar do carvão betuminoso ser um material mais friável que o carvão antracitoso, e possivelmente sofrer maior desgaste devido ao atrito entre os grãos durante a lavagem do meio

filtrante, o mesmo apresentou desempenho semelhante ao do carvão antracitoso em filtros de dupla camada, segundo estudos feitos por ORDÓÑEZ (1996).

Algumas propriedades físicas importantes que caracterizam um material filtrante, como o diâmetro dos grãos e a sua curva de distribuição granulométrica, sua forma e geometria, porosidade, massa específica e dureza, podem afetar o desempenho da filtração. É de grande importância também, a caracterização química do material granular, como a solubilidade em ácido clorídrico e em hidróxido de sódio, e a possibilidade da presença de substâncias químicas, como o mercúrio, que podem ser liberadas na água.

### 3.2.2. Propriedades dos Materiais Filtrantes

#### 3.2.2.1. Tamanho dos Grãos e Curva de Distribuição Granulométrica

Para cada material granular que compõe o meio filtrante são feitos ensaios granulométricos, por meio dos quais são definidos o tamanho do menor grão, tamanho do maior grão, tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade. O ensaio granulométrico é feito através de peneiras padronizadas, cujo tamanho das aberturas das malhas mantém uma relação aproximada de  $\sqrt{2}$ , de uma peneira para outra. O material é colocado na peneira de maior tamanho, localizada na parte superior, sob a qual encontram-se sucessivamente as peneiras com malha de menor abertura. Através de agitador, o material granular é distribuído nas peneiras, pesando-se em seguida, as quantidades retidas em cada uma delas. As quantidades que passam ou ficam retidas são acumuladas e calculadas em porcentagens, para a construção da curva de distribuição granulométrica, como a mostrada na Figura 3.3.

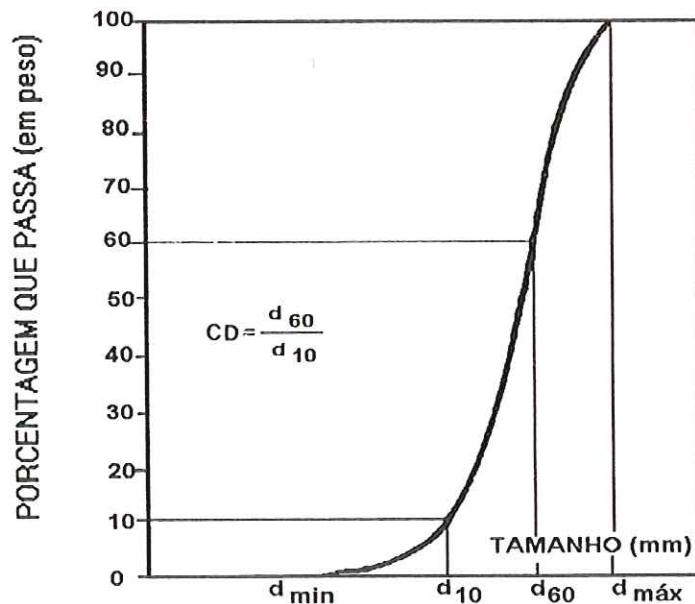


Figura 3.3 - Curva de distribuição granulométrica típica de um material filtrante.

Fonte: DI BERNARDO (1993)

A partir da curva de distribuição granulométrica são definidos os seguintes parâmetros:

- a) tamanho efetivo ( $d_{10}$ ): corresponde ao tamanho equivalente a 10% (em peso) do material que passa no peneiramento. De acordo com a "AWWA Standard for Filtering Material" (1989), o tamanho efetivo do carvão antracitoso deve estar entre 0,6 e 1,6 mm e o da areia entre 0,35 e 0,65 mm.
- b) coeficiente de desuniformidade (CD): é a relação entre o tamanho equivalente a 60% (em peso) de uma amostra representativa de material filtrante que passa no peneiramento ( $d_{60}$ ), dividido pelo tamanho equivalente a 10% (em peso) da mesma amostra que passa no peneiramento ( $d_{10}$ ). De acordo com a "AWWA Standard for Filtering Material" (1989), o coeficiente de desuniformidade para o carvão antracitoso e para a areia deve ser menor ou igual a 1,7.

Segundo DI BERNARDO (1993), as observações de Hazen indicaram que se o diâmetro efetivo permanecesse inalterado em meios granulares não

estratificados (com coeficiente de desuniformidade inferior a 5), a perda de carga não se modificaria, mesmo que ocorressem variações no diâmetro dos grãos. Na filtração rápida, na qual normalmente os meios filtrantes encontram-se estratificados devido à lavagem no sentido ascensional, ocorrerão mudanças significativas se o coeficiente de desuniformidade for alterado, mesmo mantendo-se constante o tamanho efetivo. A penetração de impurezas ao longo do meio filtrante está intimamente relacionada ao coeficiente de desuniformidade. Quanto menor for o valor de CD, mais uniforme será o material granular e, portanto, mais profunda resultará a penetração de impurezas e maior será a duração da carreira de filtração.

### 3.2.2.2. Forma e Geometria dos Grãos

A forma e geometria dos grãos exercem grande influência na perda de carga no meio filtrante limpo, na velocidade mínima de fluidificação e no comportamento da expansão durante a lavagem. Quanto mais irregular for a forma geométrica dos grãos, melhor o desempenho durante a filtração; enquanto, grãos de forma arredondada são mais fáceis de serem lavados, apresentando perda de carga final entre 20 a 30% inferior àquela desenvolvida em grãos de forma irregular (DI BERNARDO, 1993).

Os parâmetros mais utilizados para a caracterização de um grão de forma não esférica são o coeficiente de esfericidade e o tamanho volumétrico médio ou equivalente. Tendo-se esses dois parâmetros, é possível calcular a superfície específica do material.

Para grãos esféricos, o valor da superfície específica ( $S_v$ ) é dado por:

$$S_v = \frac{6}{d_v} \quad (1)$$

em que:

$S_v$  = superfície específica dos grãos ( $L^2 L^{-3}$ )

$d_v$  = diâmetro volumétrico médio (L)

Para grãos não esféricos, a superfície específica ( $S_v$ ) pode ser calculada pelas seguintes equações:

a) para materiais granulares praticamente uniformes:

$$S_v = \frac{6}{\psi_{sub} d_v} \quad (2)$$

em que:

$\psi_{sub}$  = coeficiente de esfericidade correspondente a cada subcamada

b) para materiais granulares não uniformes (FAIR et al., 1971):

$$S_v = \frac{6}{\psi_{med} D_{eq}} \quad (3)$$

$$D_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{D_i}} \quad (4)$$

em que:

$\psi_{med}$  = coeficiente de esfericidade médio correspondente ao meio granular não uniforme

$D_{eq}$  = diâmetro equivalente do meio granular (L)

$X_i$  = fração do material no caso de material granular não uniforme

$D_i$  = diâmetro médio correspondente a cada subcamada do meio granular (L)

WADDELL apud DHARMARAJAH et al. (1986) definiu “esfericidade” como sendo a relação da área superficial de uma esfera de mesmo volume do grão e a área superficial do grão propriamente dito. O coeficiente de esfericidade pode ser determinado através de dois métodos: a) por comparação visual, utilizando-se uma lupa e escala de comparação visual para vários valores de coeficiente de esfericidade, mostrada na Figura 3.4; b) proposto por CLEASBY et al.(1986), o qual consiste na determinação de perdas de carga no meio granular no estado fixo e em estado fluidificado, variando-se a velocidade de escoamento descendente e ascendente da água, a uma determinada temperatura. Aplicando-se a equação de Ergun pode-se determinar o coeficiente de esfericidade.

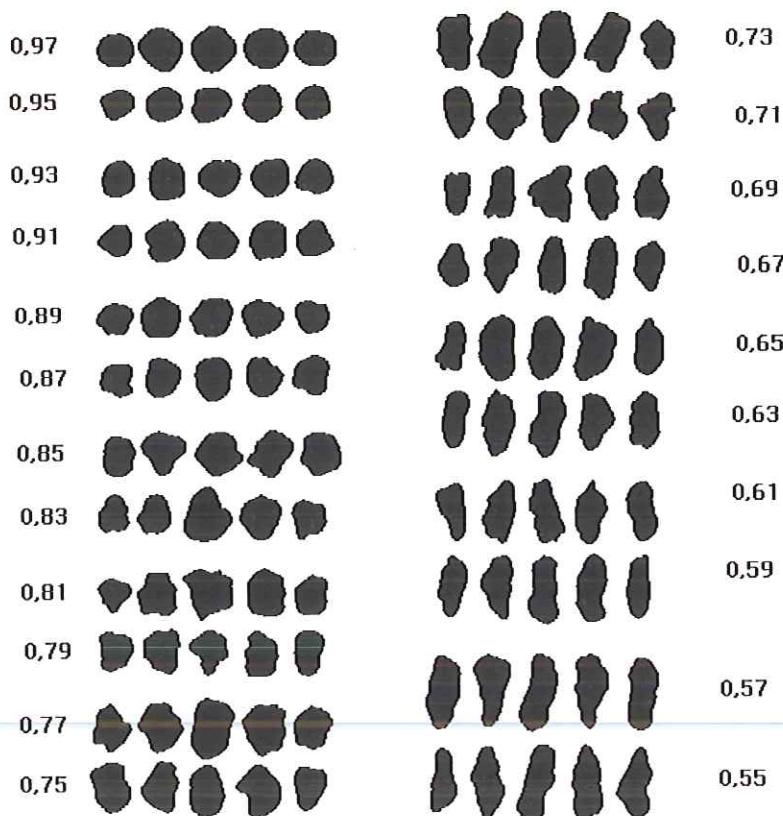


Figura 3.4 - Escala de Comparação Visual da Forma dos Grãos e Valores do Coeficiente de Esfericidade  
Fonte: SUGUIO (1973)

Para a determinação do diâmetro volumétrico médio, pode-se empregar a técnica de contagem e pesagem de um determinado número de grãos e conhecendo-se a massa específica do material, aplica-se a seguinte equação:

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{6M_g}{\pi\rho_g N_g}} \quad (5)$$

em que:

$d_v$  = diâmetro volumétrico médio (L)

$M_g$  = massa de grãos correspondente a cada faixa granulométrica do material granular (M)

$\rho_g$  = massa específica do material ( $ML^{-3}$ )

$N_g$  = número de grãos

De acordo com DHARMARAJAH et al. (1986), fatores de forma alternativos que refletem o comportamento hidrodinâmico dos grãos também têm sido relatados na literatura da engenharia sanitária, para caracterizar a esfericidade dos grãos. CLEASBY et al. (1981) utilizam o fator de forma dinâmico sugerido por Briggs et al., como método indireto para caracterizar os grãos do material filtrante, determinado pela equação:

$$FFD = \left( \frac{V_s}{V_n} \right)^2 \quad (6)$$

ou

$$FFD = a \left( \frac{V_s}{V_n} \right) + b \left( \frac{V_s}{V_n} \right)^2 \quad (7)$$

em que:

FFD : fator de forma dinâmico

$V_s$  : velocidade de sedimentação para uma amostra representativa de grãos ( $LT^{-1}$ )

$V_n$  : velocidade de sedimentação de grãos esféricos de mesmo volume ( $LT^{-1}$ )

a, b : constantes dependentes do número de Reynolds dos grãos esféricos, em que:

$$a + b = 1 \quad (8)$$

$$\frac{b}{a} = Re \quad (9)$$

$$Re = \frac{d_v V_n \rho_a}{\mu} \quad (10)$$

em que:

Re = número de Reynolds

$\rho_a$  = massa específica da água ( $ML^{-3}$ )

$\mu$  = viscosidade absoluta da água ( $ML^{-1}T^{-1}$ )

GUNASINGHAM et al. apud DHARMARAJAH (1986) utilizaram a seguinte equação para determinar o fator de forma dos grãos:

$$FFG = \frac{d_h}{d_v} \quad (11)$$

em que:

FFG : fator de forma dos grãos

$d_h$  = diâmetro de uma esfera de mesma massa específica e mesma velocidade de sedimentação de um grão em um fluido (L)

CLEASBY et al.(1981) afirmam que o fator de forma dinâmico determinado pelas equações (6) e (7), não é igual ao coeficiente de esfericidade em conceito ou em valor numérico, mas dá uma indicação relativa de esfericidade, e que FFG e FFD são dependentes do número de Reynolds do grão.

Na Figura 3.5 estão mostradas as diferentes formas dos grãos inseridos em um círculo, e na Tabela 3.1 estão os valores de coeficiente de esfericidade, fator de forma e porosidade típicos de grãos de areia, relacionados com as formas dos grãos da Figura 3.5.

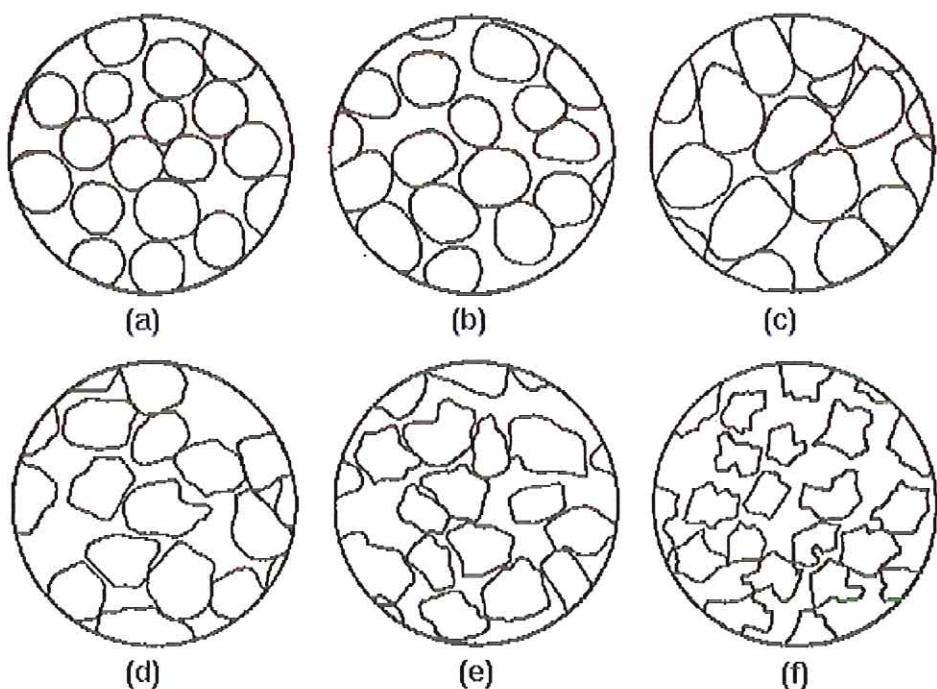


Figura 3.5 - Forma dos grãos inseridos em um círculo

Fonte: FAIR et al. (1971)

Tabela 3.1 - Valores do Coeficiente de Esfericidade, Fator de Forma e Porosidade Típica de Grãos de Areia

Forma do grão	Coeficiente de esfericidade (Ce)		Fator de forma (FF)	Porosidade ( $\epsilon$ )
		(a)		
Esférico		1,00	6,0	0,38
Arredondado	(b)	0,98	6,1	0,38
Desgastado	(c)	0,94	6,4	0,39
Agudo	(d)	0,81	7,4	0,40
Angular	(e)	0,78	7,7	0,43
Triturado	(f)	$\leq 0,70$	8,5	0,48

Fonte: FAIR et al. (1971)

Para grãos não esféricos não é possível definir a sua geometria com uma única dimensão. Uma alternativa é considerar que este grão possua um diâmetro, denominado diâmetro virtual, que esteja relacionado com alguma grandeza característica do grão. Na Tabela 3.2 são apresentados alguns diâmetros virtuais mais citados na literatura.

Tabela 3.2 - Definições de diâmetros virtuais de grãos não esféricos

Símbolo	Designação	Definição
$d_v$	Diâmetro volumétrico médio	Diâmetro da esfera de mesmo volume
$d_s$	Diâmetro superficial	Diâmetro da esfera de mesma área superficial
$d_{sv}$	Diâmetro superfície volume	Diâmetro da esfera que possui mesma relação área externa e volume
$d_{st}$	Diâmetro de Stokes	Diâmetro da esfera de mesma velocidade de sedimentação em regime laminar ( $Re < 0,2$ )
$d_a$	Diâmetro da área projetada	Diâmetro do círculo com a área projetada da partícula em posição estável
$d_q$	Diâmetro de sedimentação livre	Diâmetro da esfera de mesma massa específica com velocidade de sedimentação igual ao grão num fluido de mesma massa específica e viscosidade
$d_p$	Diâmetro de peneira	Largura da mínima abertura quadrada através do qual o grão não é retido

Fonte: ALLEN apud DHARMARAJAH et al. (1986)

### 3.2.2.3. Porosidade

A porosidade é definida como sendo a relação entre o volume de vazios e o volume total do meio filtrante. É um parâmetro muito importante na determinação da velocidade de água requerida para lavagem do meio filtrante, perda de carga no meio filtrante fixo e na capacidade do meio filtrante na retenção de impurezas. A porosidade está relacionada com a esfericidade dos grãos; quanto menor o coeficiente de esfericidade dos grãos, maior a porosidade em meio filtrante fixo.

De acordo com AWWA (1991), a porosidade em meio filtrante fixo é determinada, colocando-se uma amostra de material filtrante de massa e massa específica conhecidas em uma coluna transparente com diâmetro interno conhecido. Com a altura da camada de material filtrante pode-se determinar o volume total ocupado pelo material. O volume dos grãos é o total da massa de material filtrante dividido pela sua respectiva massa específica. O volume de vazios é igual ao volume total ocupado pelo material menos o volume dos grãos. A porosidade do meio filtrante fixo é substancialmente afetada pela compactação do material granular. Se o material é colocado no filtro, permitindo que os grãos sedimentem livremente, sem compactação, a maior porosidade será obtida, que é a porosidade em meio filtrante expandido, podendo ser 5% maior que porosidade medida depois da compactação do material. Materiais de baixo coeficiente de esfericidade apresentam maior mudança na porosidade em condições de meio filtrante sem compactação e meio filtrante compactado.

### 3.2.2.4. Massa Específica

A massa específica é definida como sendo a massa do material dividido pelo seu volume. A sua determinação é fundamental no cálculo de perda de carga, fluidificação e expansão do meio filtrante. É também fator determinante na velocidade ascensional da água para fluidificar o meio filtrante.

A técnica mais adequada para a determinação da massa específica é a do picnômetro, muito utilizada na Mecânica dos Solos. Na Tabela 3.3 são

apresentados os principais materiais granulares usados como meio filtrante e suas respectivas massas específicas.

Tabela 3.3 - Massa Específica dos Materiais Filtrantes Usuais

Material	Massa Específica ( $\rho_s$ ) (kg/m <sup>3</sup> )
Areia	2650 - 2670
Antracito	1400 - 1700
Granada	4100 - 4500

Fonte: DI BERNARDO (1993)

### 3.2.2.5. Dureza dos Grãos

A dureza dos grãos está relacionada com a resistência mínima à abrasão, pois durante o processo de fluidificação e expansão do meio filtrante decorrentes da lavagem, pode haver desgaste dos grãos, originando maior quantidade de material fino e com isto, a curva granulométrica do material é alterada, o que pode trazer prejuízos à filtração. Quando a lavagem dos filtros é feita com ar, o efeito abrasivo que ocorre entre os grãos é maior, possibilitando maior redução nos seus tamanhos.

Para a comparação da dureza dos diferentes minerais, usa-se uma escala relativa, segundo Mohs, na qual os intervalos não obedecem à proporcionalidade dos números, que simplesmente ordenam os minerais. Assim, o mineral mais duro, o diamante (dureza 10) é 140 vezes mais duro que o corindon (dureza 9). A escala de Mohs, muito usual na prática, é apresentada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Escala de Mohs

1 - Talco	6 - Ortoclásio
2 - Gipsita	7 - Quartzo
3 - Calcita	8 - Topázio
4 - Fluorita	9 - Corindon
5 - Apatita	10 - Diamante

Fonte: LEINZ et al. (1969)

Os dois materiais com dureza Mohs conhecida que risca e não risca o material granular são usados para estimar a dureza do mesmo. Conforme "AWWA Standard for Filtering Material" (1989), a escassez de resultados que correlacionam o teste de dureza Mohs com a resistência à abrasão do carvão antracítico como material filtrante, comprova a necessidade de investigar um teste de abrasão alternativo. Entretanto, a dureza Mohs continua sendo usada como uma indicação de resistência à abrasão.

Segundo a ABNT (1989), a dureza do carvão antracítico na escala Mohs, não deve ser menor que 2,7.

### 3.2.2.6. Solubilidade em Ácido Clorídrico

O teste de solubilidade em ácido clorídrico determina as impurezas e compostos solúveis em ácido, presentes no material granular utilizado para meio filtrante, que podem ser liberados para a água. Em muitos casos, a principal impureza solúvel em ácido, presentes em areia e pedregulho, é o carbonato de cálcio.

Os limites de valores de solubilidade em ácido clorídrico são para assegurar a ausência de quantidades substanciais de minerais prejudiciais ou outras substâncias no material filtrante em águas ácidas. De acordo com a ABNT (1989), a solubilidade em ácido do antracito não deve exceder 1%.

### 3.2.2.7. Solubilidade em Hidróxido de Sódio

A solubilidade em hidróxido de sódio determina a porcentagem mássica de compostos presentes no material filtrante solúveis em solução de hidróxido de sódio 1% (massa/volume). Estes compostos são óxidos solúveis dissolvidos quando uma amostra de ensaio é imersa em um volume conhecido de solução de hidróxido de sódio 1%.

## 3.3. MEIO FILTRANTE

### 3.3.1. Considerações Gerais

O meio filtrante é constituído por grãos de diferentes tamanhos e normalmente apresenta-se estratificado devido à lavagem, de modo que os grãos mais finos posicionam-se no topo do meio filtrante, enquanto que os mais grossos situam-se nas partes inferiores do mesmo.

A escolha da granulometria de um meio filtrante depende de algumas variáveis, tais como taxa de filtração, carga hidráulica disponível, qualidade do afluente, sistema de lavagem, disponibilidade e custo.

Para cada granulometria do meio filtrante pode-se otimizar o desempenho da filtração. Em meios filtrantes de menor granulometria, dificilmente ocorre o transpasse, que é o aumento progressivo da turbidez da água filtrada; porém, as carreiras de filtração resultam mais curtas devido ao aumento de perda de carga. Por outro lado, com meios filtrantes de maior granulometria, há possibilidade de ocorrência do transpasse, entretanto, as carreiras de filtração são mais longas e, geralmente, maior volume de água é requerido para a lavagem.

### 3.3.2. Tipos de Meios Filtrantes

Os meios filtrantes utilizados em filtros para tratamento de água podem ser constituídos de camada única de areia, camada dupla com carvão antracitoso sobre a areia ou camada tripla (misto) com carvão antracitoso,

areia e granada. Na Figura 3.6 são mostradas as variações do tamanho dos grãos com a altura de meios filtrantes único, duplo e triplo, após a lavagem e estratificação.

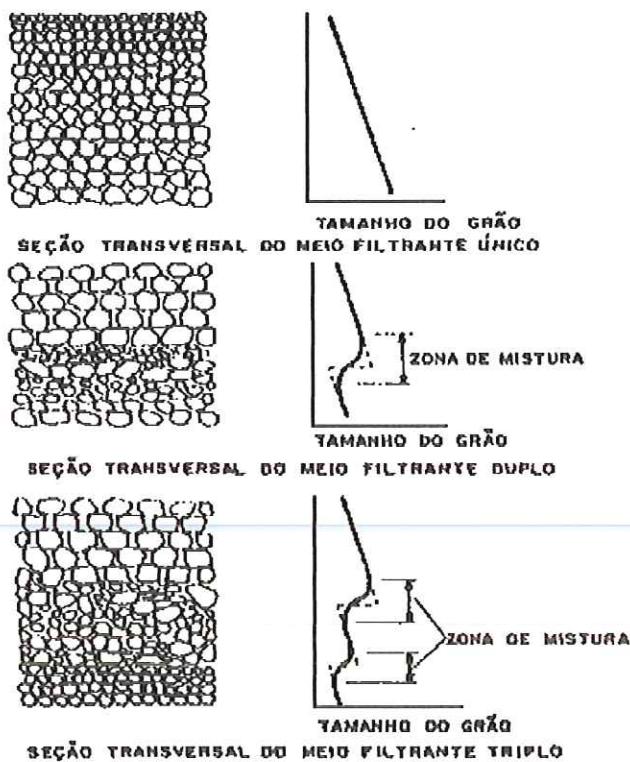


Figura 3.6 - Variação do tamanho dos grãos com a altura para meios filtrantes constituídos de um, dois ou três diferentes tipos de material após a lavagem e estratificação.

Fonte: METCALF & EDDY (1985)

Segundo DIAPER et al.(1965), nos filtros constituídos de camada única de areia ocorre rapidamente a obstrução dos poros, devido a remoção de sólidos ocorrer somente na superfície do meio filtrante. Isto acontece porque os grãos menores de areia se situam na superfície do meio filtrante, e os maiores no fundo. Assim, o afluente com maior quantidade de impurezas escoa, inicialmente, pelas subcamadas de areia, nos quais são menores os vazios intergranulares.

Já nos meios filtrantes duplos, contendo uma camada de carvão antracítoso com grãos maiores sobre a de areia mais fina, há penetração

mais profunda de sólidos, evitando a rápida obstrução das camadas de menor granulometria.

De acordo com AWWA (1991) o meio filtrante de camada dupla foi o primeiro de uma série de desenvolvimentos de meios filtrantes tentando aproximar-se da gradação reversa ideal com escoamento no sentido dos grãos mais grossos para os mais finos, para obter carreiras de filtração mais longas e melhorar a qualidade de água filtrada. Os benefícios ganhos pelo uso de meios filtrantes de camada dupla levaram ao desenvolvimento de meios filtrantes de camada tripla, nos quais uma camada mais fina de material mais denso (granada ou ilmenita) é adicionada abaixo da camada de areia. Conforme a AWWA (1991), este tipo de meio filtrante é algumas vezes referido como meio filtrante misto, porque os tamanhos dos grãos e os coeficientes de desuniformidade das três camadas são selecionados para que haja uma intermistura parcial dos maiores grãos de um material com os menores do outro.

Na Tabela 3.5 são apresentadas as principais características de meios filtrantes mais utilizados em unidades de filtração com escoamento descendente.

Tabela 3.5 - Principais características de meios filtrantes utilizados em filtros com escoamento descendente.

Meio filtrante	Tamanho dos grãos (mm)	$d_{10}$ (mm)	CD	Espessura da camada (m)
Camada Única de Areia				
Areia	0,42 - 1,41	0,45 - 0,55	$\leq 1,60$	0,6 - 0,8
Areia (camada torpedo)	0,84 - 2,00	0,90 - 1,00	$\leq 1,70$	0,1 - 0,2
Camada Única de Areia Praticamente Uniforme				
Areia	0,84 - 1,68	0,90 - 1,30	$\leq 1,20$	$\geq 1,0$
Camada Dupla de Areia e Antracito				
Areia	0,42 - 1,41	0,40 - 0,60	$\leq 1,60$	0,2 - 0,3
Antracito	0,59 - 2,00	0,90 - 1,10	$\leq 1,60$	0,4 - 0,6

Fonte: DI BERNARDO (1993)

### 3.3.3. Perda de Carga em Meios Granulares

A perda de carga no meio filtrante aumenta devido a retenção de impurezas, e está relacionada com a espessura da camada filtrante, de acordo com a seguinte equação:

$$\Delta H = \Delta H_0 + \Delta H_{imp} \quad (12)$$

em que:

$\Delta H$  = perda de carga total no meio filtrante (L)

$\Delta H_0$  = perda de carga no meio filtrante limpo (L)

$\Delta H_{imp}$  = perda de carga no meio filtrante devido a retenção de impurezas (L)

A equação mais usual, apresentada na literatura, para o cálculo da perda de carga no meio filtrante limpo é a de Carman-Kozeny, dada por:

$$\left( \frac{\Delta H}{\Delta L} \right)_0 = \frac{K_0 \mu V (1 - \varepsilon_0)^2}{\rho_a g \varepsilon_0^3} \left( \frac{S_v}{Vg} \right)^2 \quad (13)$$

em que:

$\Delta H_0$  = perda de carga no meio filtrante fixo (L)

$L_0$  = altura da camada de meio filtrante (L)

$K_0$  = constante de Kozeny

$V$  = velocidade superficial da água ( $LT^{-1}$ )

$\varepsilon_0$  = porosidade inicial do meio filtrante fixo

$g$  = aceleração da gravidade ( $LT^{-2}$ )

$Vg$  = volume dos grãos esféricos ( $L^3$ )

Segundo FAIR apud CLEASBY (1981), o valor da constante de Kozeny ( $K_0$ ) resulta próximo de 5, e assumindo-se que o meio filtrante é composto por grãos não esféricos, tem-se que:

$$\left( \frac{\Delta H}{\Delta L} \right)_0 = \frac{180 \mu V (1 - \varepsilon_0)^2}{g \rho_a \varepsilon_0^3 \psi^2} \quad (14)$$

Segundo MOHANKA (1969), a equação de Carman-Kozeny só é válida para regime de escoamento laminar, com número de Reynolds menor que 6.

Para regime de escoamento de transição ou turbulento, a equação usada é a de Ergun, dada por:

$$\left( \frac{\Delta H}{\Delta L} \right)_0 = \frac{150 \mu V (1 - \varepsilon_0)^2}{g \rho_a \varepsilon_0^3} \left( \frac{S_v}{6} \right)^2 + \frac{1,75 (1 - \varepsilon_0) V^2}{\varepsilon_0^3 g} \left( \frac{S_v}{6} \right) \quad (15)$$

Nota-se que o primeiro termo da equação (15) refere-se à perda de energia viscosa, a qual é proporcional a  $V$ ; e o segundo termo refere-se à perda de energia cinética, a qual é proporcional a  $V^2$ . Comparando as equações de Ergun e Carman-Kozeny, o primeiro termo da equação de Ergun é idêntico ao da equação de Carman-Kozeny, exceto o valor da constante numérica.

### 3.3.4. Meios Filtrantes Fluidificados

Segundo CLEASBY et al. (1977), a fluidificação pode ser descrita como o escoamento ascendente de um fluído (gás ou líquido) através de um meio granular com velocidade suficiente para suspender os grãos no fluído. Esta velocidade é atingida quando a resistência dos grãos aos efeitos da viscosidade e cinéticos se iguala à força gravitacional.

Em função da velocidade da água no sentido ascensional, os grãos do meio filtrante podem permanecer em uma das três condições mostradas na Figura 3.7, no qual se tem três situações:

- a) a velocidade ascensional é baixa e a porosidade permanece inalterada;
- b) com o aumento da velocidade, os grãos tendem a se orientar, porém, a força resultante da passagem do fluxo de água é ainda inferior ao peso dos grãos e, portanto, não ocorre a fluidificação; é como se houvesse um inchamento do meio granular;
- c) aumentando-se mais a velocidade ascensional, as forças devido ao atrito entre a água e os grãos superam o peso destes, que ficam suspensos no meio granular fluidificado.

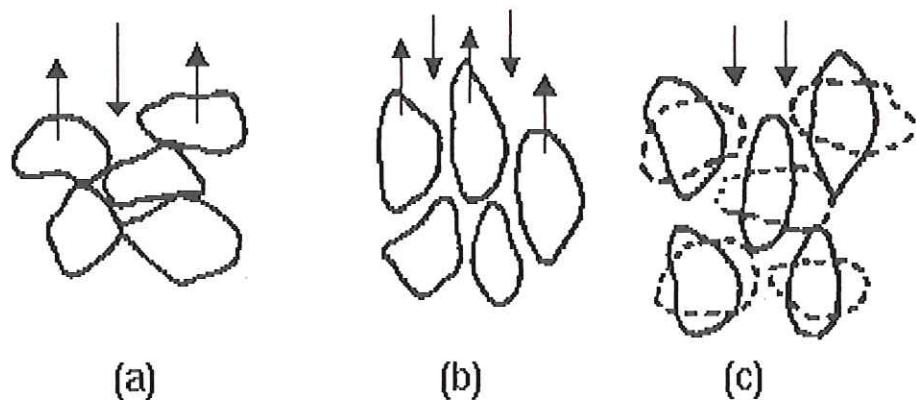


Figura 3.7 - Variação da posição dos grãos durante a lavagem

Fonte: DI BERNARDO (1993)

Com a aplicação da velocidade ascensional na lavagem do meio filtrante, haverá uma variação teórica da perda de carga em função da velocidade ascensional aplicada, na qual a declividade da curva da fase inicial (em que não há expansão), mostrada na Figura 3.8, depende do grau de compactação do meio granular. Entre os pontos A e B, não há alteração na porosidade e na espessura do meio filtrante, e a perda de carga cresce de forma aproximadamente linear. As curvas cheias representadas acima do ponto B se diferenciam pelo grau de compactação de dois tipos diferentes de meios granulares. A partir deste ponto, a perda de carga permanece praticamente constante e esta velocidade ascensional limite é denominada de velocidade mínima de fluidificação.

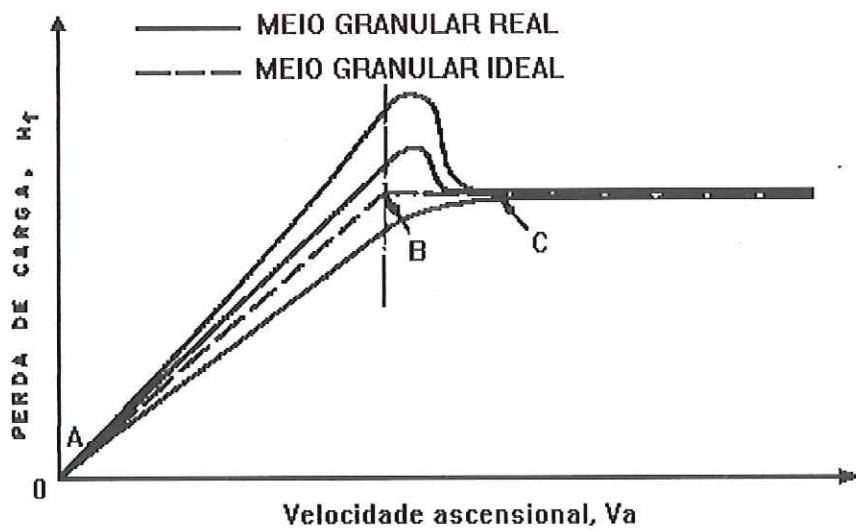


Figura 3.8 - Características de um Meio Filtrante Fluidificado

Fonte: DI BERNARDO (1993)

Segundo CLEASBY et al. (1981), a perda de carga depois da fluidificação é igual ao peso flutuante dos grãos e pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\Delta H_f = \frac{(\rho_g - \rho_a)(1 - \varepsilon_0)L_0}{\rho_a} \quad (16)$$

em que:

$\Delta H_f$  = perda de carga no meio filtrante fluidificado (L)

### 3.3.5. Velocidade Mínima de Fluidificação

Conforme CLEASBY et al. (1981), a velocidade mínima de fluidificação é a velocidade requerida para o começo da fluidificação, podendo ser definida no ponto B da Figura 3.8, para um meio filtrante fluidificado ideal composto de grãos esféricos uniformes.

O cálculo da velocidade mínima de fluidificação pode ser feito baseando-se no fato de que a perda de carga no meio filtrante fixo é igual a perda de carga constante no meio filtrante fluidificado no ponto de fluidificação incipiente. Portanto, a equação (16) pode ser igualada à equação (15), resultando:

$$\frac{\rho_a d_v^3 (\rho_g - \rho_a) g}{\mu^2} = \frac{150(1 - \varepsilon_o) \rho_a d_v V_{mf}}{\varepsilon_o^3 \mu \psi^2} + \frac{1,75 \rho_a^2 d_v^2 V_{mf}^2}{\varepsilon_o^3 \mu^2 \psi} \quad (17)$$

em que:

$V_{mf}$  = velocidade mínima de fluidificação ( $LT^{-1}$ )

A precisão dos resultados, utilizando a equação (17), depende dos valores de esfericidade e porosidade do meio filtrante fixo.

CLEASBY et al. (1981) citam duas expressões empíricas relacionando a porosidade do meio filtrante com o coeficiente de esfericidade, propostas por WEN et al. (1966):

$$\frac{(1 - \varepsilon_o)}{\psi^2 \varepsilon_o^3} = 11 \quad (18)$$

$$\frac{1}{\psi \varepsilon_o^3} = 14 \quad (19)$$

Substituindo as equações (18) e (19) na equação (17), obtém-se:

$$V_{mf} = \frac{\mu}{\rho_a d_v} (33,7^2 + 0,0408 Ga)^{0,5} - \frac{33,7 \mu}{\rho_a d_v} \quad (20)$$

O número de Reynolds correspondente à velocidade mínima de fluidificação é dado por:

$$Re_{mf} = \frac{d_v V_{mf} \rho_a}{\mu} \quad (21)$$

Substituindo a equação (21) na equação (20), resulta:

$$Re_{mf} = [(33,7)^2 + 0,0408 Ga]^{0,5} - 33,7 \quad (22)$$

$$Ga = \frac{d_v^3 \rho_a (\rho_g - \rho_a) g}{\mu^2} \quad (23)$$

em que:

$Ga$  = número de Galileu

Para meios filtrantes constituídos de grãos não esféricos, geralmente utilizados na prática, a velocidade mínima de fluidificação dos menores grãos é menor que a dos maiores grãos. Como é preciso fluidificar total do meio filtrante para garantir eficiência na lavagem, CLEASBY et al. (1981) recomendam substituir o diâmetro volumétrico médio da equação (20) pelo  $d_{90}$  (tamanho correspondente a 90% da amostra que passou no peneiramento) o qual pode ser determinado na curva de distribuição granulométrica do material filtrante.

### 3.3.6. Expansão do Meio Filtrante

Com o aumento da velocidade ascensional de lavagem do meio filtrante, acima da mínima fluidificação, o meio filtrante expandirá, e os grãos se separarão um dos outros, aumentando a porosidade média, sendo que a perda de carga permanecerá aproximadamente constante.

O grau de expansão é afetado por muitas variáveis tais como tamanho, forma e massa específica dos grãos do meio filtrante, e viscosidade e massa específica da água. É importante prever a expansão do meio filtrante, para que ele permaneça abaixo das calhas coletores de água de lavagem, evitando assim, a perda de material.

DHARMARAJAH et al. (1986) recomendam o cálculo da previsão da expansão do meio filtrante utilizando a seguinte equação:

$$\log A_1 = 0,56543 + 1,09348(\log Re_1) + 0,17979(\log Re_1)^2 - 0,00392(\log Re_1)^2 - 1,5(\log \psi)^2 \quad (24)$$

Sendo  $A_1$  e  $Re_1$  calculados pelas seguintes equações:

$$A_1 = \frac{\varepsilon_{ex}^3 \rho_a (\rho_g - \rho_a) g}{(1 - \varepsilon_{ex})^2 S_v^3 \mu^2} \quad (25)$$

$$Re_1 = \frac{V_a \rho_a}{S_v (1 - \varepsilon_{ex}) \mu} \quad (26)$$

em que:

$\varepsilon_{ex}$  = porosidade do meio filtrante expandido

$V_a$  = velocidade ascensional de lavagem ( $LT^{-1}$ )

A equação (24) é usada para prever a porosidade de um meio filtrante expandido ( $\varepsilon_{ex}$ ), constituído de grãos uniformes. Como  $A_1$  e  $Re_1$  estão em função da porosidade do meio filtrante expandido, a solução para a equação (24) deve ser feita por tentativas, apresentando melhores resultados por cálculo eletrônico.

Quando a equação (24) é aplicada para um meio filtrante constituído de grãos de diferentes tamanhos, o meio filtrante deve ser dividido por subcamadas, para que seja calculada a porosidade de cada subcamada expandida. A altura de cada subcamada expandida pode ser calculada por:

$$L_o(1 - \varepsilon_o) = L_{ex}(1 - \varepsilon_{ex}) \quad (27)$$

em que:

$L_{ex}$  = altura do meio filtrante expandido (L)

Segundo DI BERNARDO (1993), a porosidade do meio filtrante expandido pode ser calculada pela seguinte equação:

$$(1 - \varepsilon_{ex}) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{1 - \varepsilon_{exi}}} \quad (28)$$

em que:

$\varepsilon_{exi}$  = porosidade de cada subcamada de meio filtrante expandido.

Outras equações que permitem o cálculo da expansão de um meio filtrante são:

$$E(\%) = \frac{L_{ex} - L_o}{L_o} \times 100 \quad (29)$$

ou

$$E(\%) = \frac{\varepsilon_{ex} - \varepsilon_o}{1 - \varepsilon_o} \times 100 \quad (30)$$

em que:

E(%) = expansão do meio filtrante, em porcentagem

Para o cálculo da expansão do meio filtrante constituído de grãos de tamanhos diferentes, WEN et al. apud AMIRTHARAJAH et al. (1972), recomendam o uso do diâmetro equivalente, que pode ser calculado pela equação (4).

### **3.4. LAVAGEM DO MEIO FILTRANTE**

#### **3.4.1. Considerações Gerais**

A qualidade da água filtrada no ínicio de funcionamento de um filtro recém lavado depende fundamentalmente, das características da água remanescente e do estado do meio filtrante após a lavagem.

De acordo com DI BERNARDO (1993), a lavagem inadequada dos filtros apresenta diversos problemas, tais como: a) aparecimento de bolas de lodo no interior do meio filtrante; b) menor volume de água produzido na carreira de filtração; c) água filtrada de pior qualidade; d) aumento da perda de carga no meio filtrante.

Independente do método utilizado para a lavagem, deve-se promover a liberação das partículas depositadas no interior do meio filtrante para que em seguida elas sejam carreadas para fora do filtro.

#### **3.4.2. Métodos de Lavagem**

Para a obtenção de limpeza eficiente dos grãos do meio filtrante, deve-se levar em conta os seguintes fatores (CLEASBY et al., 1977):

- a) tamanho dos grãos: em relação aos grãos finos, os mais grossos apresentam reações diferentes para determinada velocidade ascensional aplicada para fluidificar o meio filtrante;
- b) forma dos grãos: grãos arredondados são geralmente mais fáceis de limpar que grãos de forma angular;

- c) massa específica dos grãos: materiais com maior massa específica precisam velocidades mais altas para a suspensão dos grãos no fluido, aumentando as forças hidrodinâmicas;
- d) qualidade da água: água com cor ou turbidez alta ou com dureza baixa, comportam-se diferentemente com relação à capacidade de formar bolas de lodo ou à aderência da sujeira firmemente aos grãos;
- e) coagulante utilizado: a dosagem e o tipo de coagulante utilizado mudam a aderência da película formada ao redor dos grãos.

Estes fatores estão interrelacionados e são importantes na escolha do método de lavagem de meios filtrantes, que podem ser classificados em:

- a) Lavagem exclusivamente com água
- b) Lavagem superficial ou sub-superficial com água seguida de lavagem ascensional com água
- c) Lavagem independente com ar e água
- d) Lavagem simultânea com ar e água

#### **3.4.2.1. Lavagem Exclusivamente com Água**

Este é um método de lavagem no qual a água é introduzida no sentido ascensional com velocidade suficiente para promover a fluidificação total do meio filtrante. Geralmente, a aplicação de água se dá durante 10 minutos e resulta elevada a quantidade de água empregada, pois a expansão total do meio filtrante deve estar entre 30 a 50%, permitindo desta forma, sua limpeza adequada. Para que produza uma expansão de, no mínimo, 5% no  $d_{90}$  do material granular, deve-se aplicar uma velocidade ascensional compreendida entre 0,6 a 1,0 m/min. Obviamente, esta velocidade dependerá do material granular utilizado como meio filtrante (DI BERNARDO, 1993).

Segundo CAMP apud FERREIRA (1993), a colisão que ocorre entre os grãos, decorrentes da fluidificação do meio filtrante é desprezível, e o principal mecanismo de limpeza é devido a tensão cisalhante nos grãos decorrente da ação da água. AMIRTHARAJAH apud CLEASBY et al. (1977) afirma que a máxima tensão cisalhante aplicada em um grão ocorre quando a porosidade do meio filtrante expandido é da ordem de 0,68 a 0,71 para

areia. No entanto, valores de porosidade desta ordem de grandeza ocorrem no topo da camada do meio filtrante fluidificado com expansões de 70 a 90%, o que na prática é inviável.

#### **3.4.2.2. Lavagem Superficial ou Sub-superficial com Água Seguida de Lavagem Ascensional com Água**

O método de lavagem superficial consiste na introdução de água na camada superior do meio filtrante por meio de tubulações fixas ou de torniquetes hidráulicos situados cerca de 5 a 10 cm acima do topo do meio filtrante fixo. As tubulações fixas são providas de orifícios de 2 a 3 mm de diâmetro.

De acordo com DI BERNARDO (1993), a lavagem superficial inicia-se após o nível de água no interior do filtro ter baixado próximo à crista das calhas de coleta de água de lavagem, sendo mantida por um período de 2 a 4 minutos; em seguida, inicia-se a lavagem com água no sentido ascensional, promovendo expansão da ordem de 20 a 30% no meio filtrante, e mantida por um período de 7 a 10 minutos.

A lavagem sub-superficial pode ser feita através de torniquetes hidráulicos ou de tubulações fixas, providas de bocais especiais, sendo acionada a aproximadamente 1 minuto após a lavagem com água no sentido ascensional ter sido iniciada, de modo que o meio filtrante já se encontra expandido. A taxa de aplicação de água para a lavagem sub-superficial é geralmente da ordem de 20 a 50 l/min m<sup>2</sup>, e a velocidade da água para a lavagem no sentido ascensional deve produzir expansão de 20 a 30% no meio filtrante durante um período de 10 minutos. A pressão requerida nos bocais varia de 30 a 70 mca, e os dispositivos utilizados na lavagem sub-superficial devem estar a cerca de 20 a 50 cm abaixo do topo do meio filtrante em repouso. A lavagem sub-superficial não é comumente usada no Brasil, pelas dificuldades encontradas na operação e manutenção dos dispositivos empregados (DI BERNARDO, 1993).

### 3.4.2.3. Lavagem Independente com Ar e Água

A aplicação de ar na lavagem do meio filtrante cria um sistema de três fases (gasoso, líquido, sólido). Quando o ar é introduzido no fundo do filtro, as bolhas propagam-se para cima, transportando os sólidos retidos ao longo do meio filtrante, arrebentando-se na superfície do filtro.

Neste caso, deve-se baixar o nível de água no interior do filtro até que se situe a cerca de 20 a 30 cm acima do topo do meio filtrante, para se evitar a perda de material. Iniciando-se a aplicação de ar, o nível de água aumenta por causa do volume ocupado pelo ar, permanecendo abaixo da calha coletora de água de lavagem. A introdução de ar geralmente é de 2 a 5 minutos, com uma taxa de aplicação de 10 a 20 l/sm<sup>2</sup> (DI BERNARDO, 1993).

O sistema de ar é desligado e em seguida, aplica-se água no sentido ascensional, que vagarosamente, expulsa o ar do meio filtrante antes que comece a descarga de água de lavagem, desta maneira, transportando os sólidos liberados do meio filtrante para fora do filtro. Conforme DI BERNARDO (1993), a velocidade ascensional de água seguida da aplicação de ar, deve produzir uma expansão de 30 a 50% no meio filtrante, durante um período de 5 a 8 minutos.

Este método de lavagem é essencial para meios filtrantes constituídos de dupla ou tripla (misto) camada, em que a aplicação de água permite a expansão do meio filtrante.

De acordo com a AWWA (1991), este método de lavagem apresenta algumas vantagens e desvantagens.

a) Vantagens:

- A aplicação de ar cobre a área total de filtros retangulares e é adaptável a qualquer dimensão do mesmo;
- A ação do ar é ao longo de toda a profundidade do meio filtrante; portanto, pode agir na interface de meios constituídos de dupla camada, podendo atingir as bolas de lodo formadas em regiões profundas do meio filtrante.

b) Desvantagens:

- É preciso um conjunto adicional de tubulações para o suprimento de ar e equipamentos para seu fornecimento;
- O sistema deve ser operado com muito cuidado, pois é grande a possibilidade de perda de material filtrante;
- Devido a violenta ação do ar, é necessário um cuidado especial com o dimensionamento da camada suporte, para que esta não seja alterada na sua constituição granulométrica, o que poderia causar a penetração de material filtrante nos seus interstícios, causando uma possível obstrução no sistema de drenagem do filtro.

#### **3.4.2.4. Lavagem Simultânea com Ar e Água**

AMIRTHARAJAH (1978) concluiu que a principal ação de limpeza em um meio filtrante é devido à tensão cisalhante que ocorre entre os grãos pela ação da água, e sugere a lavagem simultânea com ar e água, que provavelmente causa maior efeito de erosão nos grãos e consequentemente, maior é a tensão cisalhante entre eles.

O efeito de abrasão entre os grãos está relacionado à tensão cisalhante entre eles e à magnitude de seus movimentos relativos. Estes dois efeitos são contraditórios com o aumento da taxa de água, sendo necessária uma combinação ótima da taxa de aplicação de ar e de água para que este método de lavagem resulte eficiente.

HEWITT et al.(1984) estudaram o comportamento microscópico das interações entre o ar e a água, e concluíram que o maior número de colisões entre os grãos que compunham o meio filtrante ocorria a um certo par de valores de velocidade ascensional de água de lavagem, abaixo da velocidade mínima de fluidificação, e vazão de ar, de modo que as bolhas de ar colidiram no interior do meio filtrante, causando maior abrasão possível entre os grãos. Esta condição foi denominada “*collapse-pulsing*” e é mostrada na Figura 3.9.

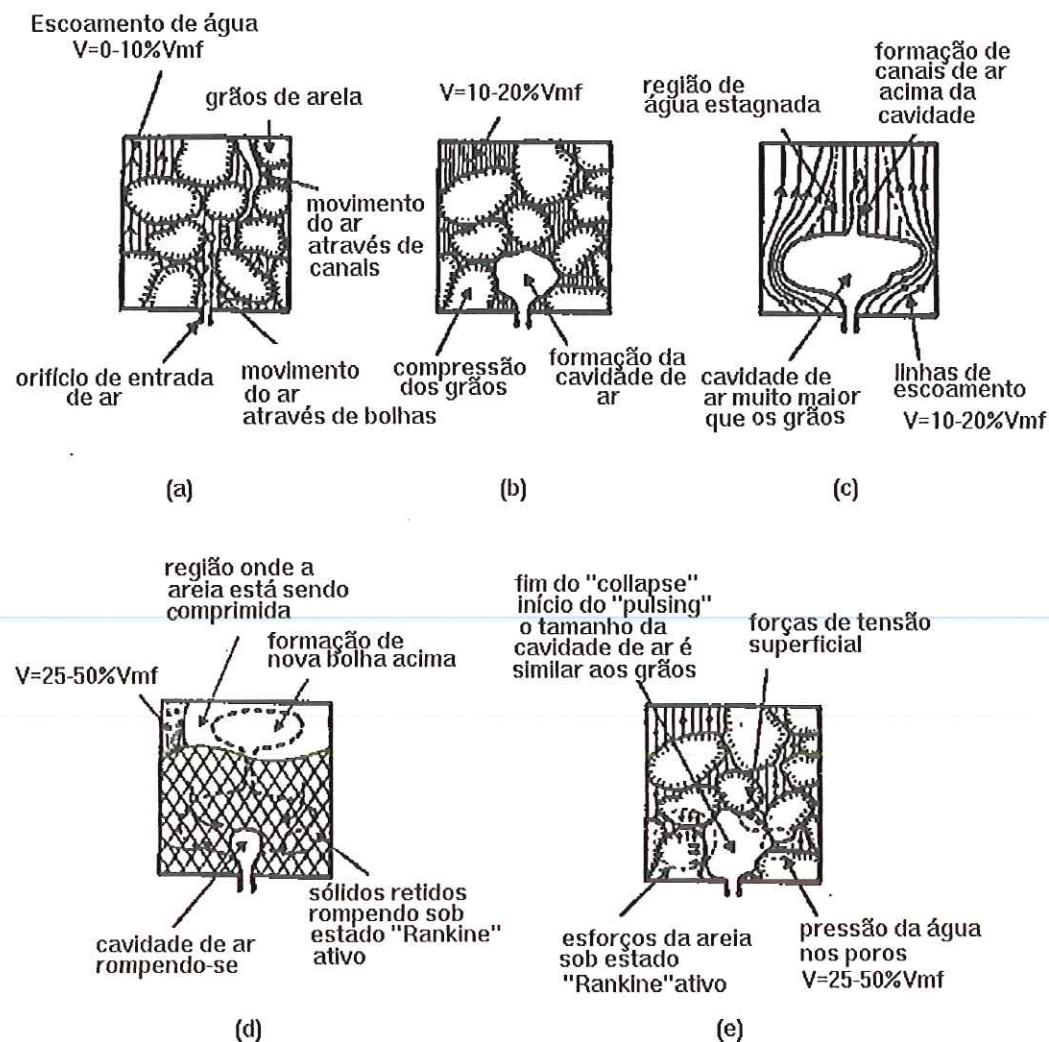


Figura 3.9 - Condição de “collapse-pulsing”.

Fonte: AMIRTHARAJAH (1984)

AMIRTHARAJAH (1984) desenvolveu uma equação teórica para o “collapse-pulsing”, baseando-se em conceitos de mecânica dos solos e termodinâmica de fluidos compressíveis, relacionando o par de vazões de água e ar necessário para atingir tal condição, a saber:

$$cQ_a^2 + \left( \% \frac{V_a}{V_{mf90}} \right) = d \quad (31)$$

em que:

c, d : constantes para um sistema particular

$Q_a$  : taxa de aplicação de ar nas condições normais de pressão e temperatura ( $L^3 L^{-2} T^{-1}$ )

$V_{mf90}$  : velocidade mínima de fluidificação correspondente ao  $d_{90}$  do material granular do meio filtrante ( $LT^{-1}$ )

Com o objetivo de avaliar a condição de “*collapse-pulsing*” em meios filtrantes de camada dupla, AMIRTHARAJAH (1993) desenvolveu equações para os materiais granulares usualmente utilizados como meio filtrante. Para a obtenção destas equações, foram aplicadas diversas velocidades ascensionais de água de lavagem com valores abaixo da velocidade mínima de fluidificação (correspondente ao  $d_{90}$  do material granular), para cada meio filtrante. Para cada um destes valores foi determinada a vazão de ar necessária para atingir a condição de “*collapse pulsing*”. Estas equações estão apresentadas na Tabela 3.7 , sendo os tamanhos característicos de cada material granular, apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Características de materiais filtrantes avaliados em estudos de “*collapse-pulsing*”

Material Filtrante	$d_{10}$ (mm)	$d_{90}$ (mm)	CD	$\rho_g$ (g/cm <sup>3</sup> )
AREIA	0,38	0,69	1,53	2,65
ANTRACITO	1,10	1,99	1,55	1,70

Fonte: AMIRTHARAJAH (1993)

Tabela 3.7 - Equações que descrevem o “collapse-pulsing” para os materiais filtrantes citados na tabela 3.6.

Meio Filtrante	Equação	Variações de $Q_a$
AREIA	$8,5Q_a^2 + \left( \% \frac{V_a}{V_{mf90}} \right) = 43,5$	0,5 a 1,4 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> min
ANTRACITO	$17,8Q_a^2 + \left( \% \frac{V_a}{V_{mf90}} \right) = 43,0$	0,4 a 1,3 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> min
ANTRACITO+AREIA	$18,5Q_a^2 + \left( \% \frac{V_a}{V_{mf90}} \right) = 39,5$	0,2 a 0,7 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> min

Fonte: AMIRTHARAJAH (1993)

Na operação de um sistema utilizando este método de lavagem, é necessário evitar a perda de material filtrante, que pode ocorrer devido a violenta ação do ar. Para que isto não ocorra, o nível de água no interior do filtro deve ser abaixado até 5 a 10 cm acima do meio filtrante.

DI BERNARDO (1993) recomenda que para uma limpeza eficiente, a aplicação de ar com taxa de 4 a 8 l/sm<sup>2</sup> e água com velocidade ascensional de 0,15 a 0,30 m/min, por um período de 2 a 5 minutos. Depois, a lavagem com ar e água simultaneamente é interrompida e em seguida, aplica-se água com velocidade ascensional compreendida entre 0,6 e 1,0 m/min, por um período de 3 a 7 minutos, com o objetivo de transportar as partículas liberadas da superfície dos grãos do meio filtrante para a calha coletora de água de lavagem.

AMIRTHARAJAH et al. (1991) apud FERREIRA (1993) recomendam que, após a aplicação de ar, a aplicação de água no sentido ascensional seja interrompida em cerca de 2 a 3 minutos para que seja possível a sedimentação dos grãos do meio filtrante, para se evitar a perda de material. Após este intervalo de tempo pode-se com segurança, aplicar água ascensionalmente, expandindo-se o meio filtrante.

CLEASBY apud HUMBY et al. (1996) estudaram a perda de antracito por abrasão, durante duas semanas de lavagem contínua com ar. Os

resultados obtidos foram perda de 5% em peso de material e redução de 2,5% no tamanho efetivo, valores considerados desprezíveis pelos autores.

HUMBY et al. (1995) consideram que as colisões que ocorrem entre os grãos durante a lavagem não produzem energia suficiente para causar a ruptura dos mesmos. Os autores estudaram a perda de material filtrante decorrente da lavagem simultânea com ar e água através de monitoramento da concentração de material fino no efluente, concluindo que a maior perda de antracito foi de aproximadamente 7%.

As conclusões de que a perda de material filtrante utilizando-se lavagem com aplicação de ar é desprezível, evidencia a eficiência deste método de lavagem. Entretanto, deve ser feito um estudo em escala piloto para cada caso, visando sempre a redução de custos de implantação, manutenção e operação, além da produção de água de melhor qualidade.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS FILTRANTES

Os materiais filtrantes utilizados nos ensaios foram carvão antracitoso (amostra 1 e amostra 2), e carvão betuminoso, fornecidos pelo CIRDE - Centro Industrial Rio Deserto e procedente do Estado de Santa Catarina - Brasil. Os dois tipos de carvão antracitoso, diferenciados como amostra 1 e amostra 2 apresentam características diferentes pelo fato de serem de minas diferentes. A amostra 2 de carvão antracitoso e o carvão betuminoso foram fornecidos embalados em sacos de 25 kg, cada um deles contendo uma faixa granulométrica diferente, que variou de 0,59 a 2,40 mm, e a amostra 1 de carvão antracitoso também embalado em sacos de 25 kg, mas com os grãos totalmente misturados. Juntamente com o material, foram enviados resultados de parâmetros característicos dos diferentes tipos de carvão, apresentados na Tabela 4.1. Na Tabela 4.2 está apresentada a composição das cinzas presentes em cada material.

Com o objetivo de comparar os resultados fornecidos, foram feitas algumas análises das características químicas e ensaios físicos dos materiais filtrantes.

Características Químicas:

- a) determinação do teor de umidade
- b) determinação do teor de cinzas
- c) determinação do teor de óleos
- d) solubilidade em ácido clorídrico
- e) solubilidade em hidróxido de sódio
- f) difração em raio X
- g) presença de mercúrio na água em contato com o material

Características Físicas:

- a) dureza do material
- b) curva de distribuição granulométrica
- c) determinação da massa específica
- d) determinação do diâmetro volumétrico médio
- e) determinação do coeficiente de esfericidade e porosidade

**Tabela 4.1 - Características das Amostras de Carvão Antracitoso e Carvão Betuminoso Utilizadas nos Ensaios**

ANÁLISES	CARVÃO ANTRACITOSO		CARVÃO BETUMINOSO
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	
% Umidade	4,47	2,09	1,86
% Cinzas	10,55	36,69	36,37
% Materiais Voláteis	6,96	11,68	23,70
% Carbono Fixo	82,49	-	-
% Carbono Livre	84,39	82,97	70,77
% Enxofre Total	0,39	1,06	1,97
% Enxofre Pirítico	-	0,28	1,23
% Enxofre Sulfático	-	0,22	0,08
% Enxofre Orgânico	-	0,56	0,66
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,42	1,67	1,62
Densidade Verdadeira	-	1,69	1,71
% Solubilidade em HCl	0,54	0,60	0,70
% Solubilidade em NaOH	-	0,19	0,66
Tamanho Efetivo (mm)	1,01	-	-
Coeficiente de Desuniformidade	1,70	-	-
pH	5,46	3,85	4,84
Nº Iodo (mg/g)	204	266	227
Poder Calorífico (KCal/Kg)	-	5067	5192

Fonte: Centro Industrial Rio Deserto, Estado de Santa Catarina, 1995.

**Tabela 4.2. Composição das Cinzas das Amostras de Carvão Antracitoso e Carvão Betuminoso Utilizadas nos Ensaios**

COMPONENTES	CARVÃO ANTRACITOSO		CARVÃO BETUMINOSO
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	
% Silica	68,27	59,82	56,80
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,04	30,91	31,93
% TiO <sub>2</sub>	0,69	ND*	0,08
% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,82	3,18	5,86
% CaO	1,12	0,45	0,22
% MgO	0,22	1,05	0,97
% Na <sub>2</sub> O	1,52	0,67	0,34
% K <sub>2</sub> O	1,07	2,86	2,71
TOTAL	100,75	99,35	99,44

Fonte: Centro Industrial Rio Deserto, Estado de Santa Catarina, 1995.

\* Não Detectável

## 4.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

### 4.2.1. Determinação do Teor de Umidade

A determinação do teor de umidade foi feita no Laboratório de Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) - USP. O procedimento consiste na medição da perda de massa da amostra quando aquecida sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e massa pré-estabelecidos.

A determinação deste parâmetro foi feita para os três tipos de carvão, e segue o procedimento descrito em PEREIRA (1993):

As amostras de carvão foram moídas e pesadas (aproximadamente 1000 mg) em balança com precisão de 0,1 mg, e colocadas dentro de cadiinhos. As tampas acompanham os cadiinhos no forno, porém, não ficam tampados no período de aquecimento. As amostras foram aquecidas durante 1 hora; após este tempo, os cadiinhos foram retirados do forno, rapidamente tampados e colocados em dessecador para resfriamento. Depois de resfriados, os cadiinhos foram pesados em balança analítica.

A porcentagem de umidade foi determinada pela seguinte equação:

$$\%Umidade = \left[ \frac{(A - B)}{A} \right] \times 100 \quad (32)$$

em que:

A : massa da amostra antes do aquecimento (M)

B : massa da amostra após aquecimento (M)

### 4.2.2. Determinação do Teor de Cinzas

A determinação das cinzas também foi feita no Laboratório de Saneamento da EESC - USP e baseada em PEREIRA (1993), que consiste na pesagem do resíduo que ficou após a queima do carvão.

As amostras resultantes da determinação de umidade foram colocadas em forno, que após uma hora, atingiu uma temperatura de

aproximadamente 773 °K, está temperatura foi aumentada e quando atingiu 1023 °K, foi mantida durante 2 horas. Após um tempo de 4 horas desde o início do aquecimento, os cadiinhos foram retirados do forno, tampados e resfriados em dessecador. Em seguida, foram pesados em balança analítica.

A porcentagem de cinzas foi determinada pela seguinte equação:

$$\% \text{Cinzas} = \left[ \frac{(C - D)}{B} \right] \times 100 \quad (33)$$

em que:

C = massa do cadiinho com tampa + cinzas (M)

D = massa do cadiinho vazio com a tampa (M)

#### 4.2.3. Determinação do Teor de Óleos

A determinação do teor de óleos foi feita somente para a amostra 2 de carvão antracitoso e para o carvão betuminoso, tendo o ensaio sido realizado no Laboratório de Química da EESC - USP e foi baseado em PEREIRA (1987).

Primeiramente foi feita uma extração a quente, em sistema de refluxo, utilizando-se metanol como solvente extrator, na proporção 1:10 (massa/volume). A mistura da amostra de carvão e metanol ficou sob aquecimento controlado, no ponto de ebulação do solvente, por um período de 8 horas. Após resfriamento, a mistura foi filtrada e concentrada em evaporador rotatório. Ao extrato, foi adicionado benzeno na proporção 40:1 (volume/volume), sob agitação, e deixado em repouso por 15 horas. O material insolúvel em benzeno (asfaltol) foi eliminado por filtração, sendo o restante concentrado em evaporador rotatório. Ao extrato obtido foi adicionado hexano na mesma proporção (40:1) e deixado em repouso por 15 horas. O material insolúvel em hexano (asfaltenos) foi eliminado por filtração, sendo o restante concentrado em evaporador rotatório. O extrato obtido foi a quantidade de óleos referentes à amostra inicial de carvão.

Na Figura 4.1 está apresentado um diagrama do processo de extração a quente para a obtenção de óleos.

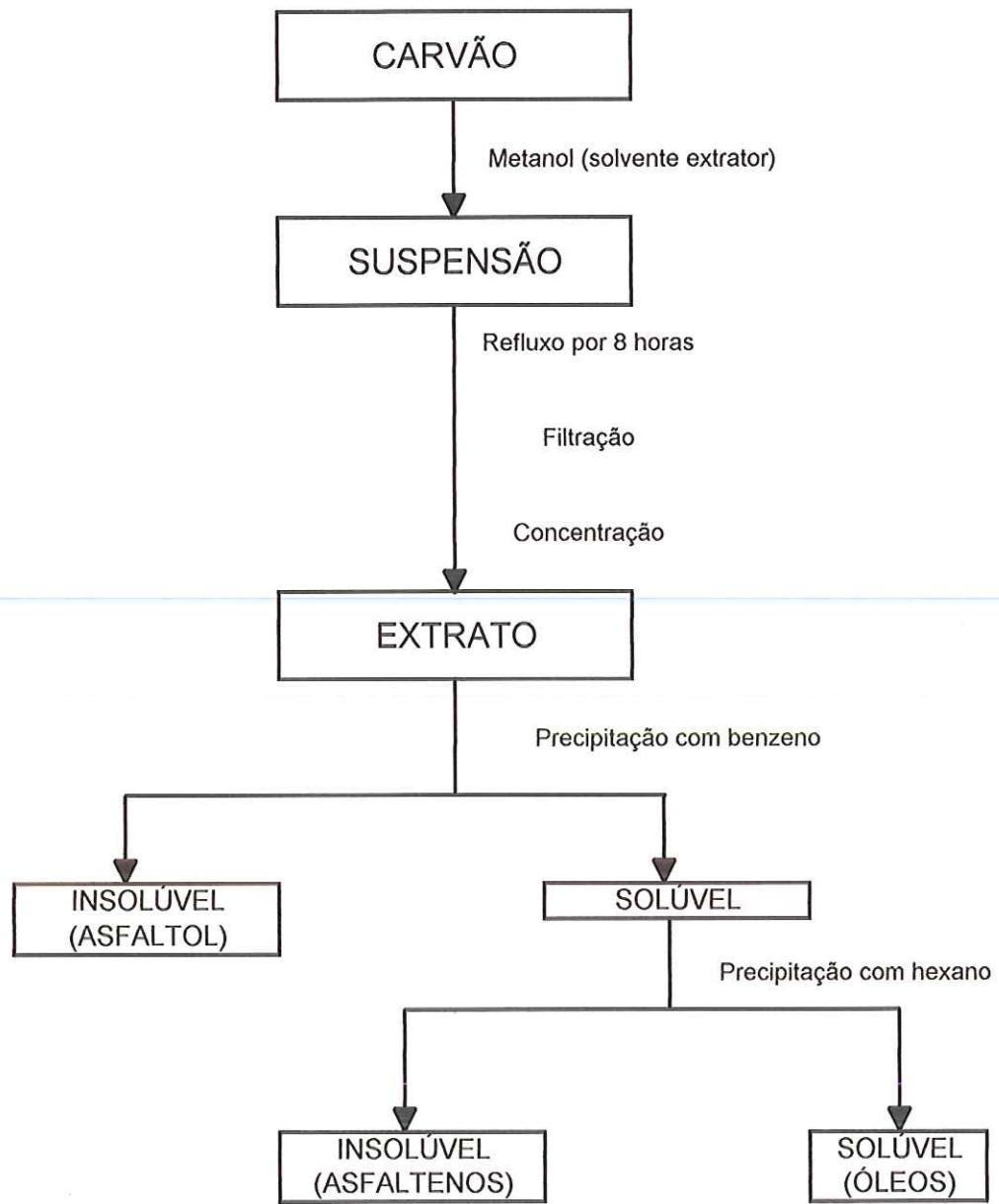


Figura 4.1 - Esquema da obtenção de óleos por extração a quente  
Fonte: PEREIRA (1987)

#### 4.2.4. Solubilidade em Ácido Clorídrico

A solubilidade em HCl foi determinada para a amostra 2 de carvão antracitoso e carvão betuminoso. Os ensaios foram feitos no Laboratório de Saneamento da EESC - USP, e estão descritos no Projeto 2:09.67-001/1989 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Uma amostra de 100 g de cada material foi pesada e colocada na estufa ( $105\pm3^{\circ}\text{C}$ ) durante 1 hora. Depois de resfriadas em dessecador, as amostras foram pesadas, determinando-se sua massa seca, e foram transferidas para recipientes volumétricos de 2 litros, aos quais foram adicionados 1 litro de HCl previamente diluído a 1:1 (em volume) com água destilada. Em seguida, foram deixados em repouso à temperatura ambiente, durante 30 minutos. A solução de HCl foi descartada e as amostras foram lavadas por decantação com água destilada, e colocadas em estufa para secar durante 3 horas, resfriadas em dessecador e pesadas.

A solubilidade em HCl dos materiais ensaiados foi calculada pela seguinte equação:

$$\text{Solubilidade}(\%) = \left( \frac{m_1 - m_2}{m_1} \right) \times 100 \quad (34)$$

em que:

$m_1$  = massa da amostra seca (M)

$m_2$  = massa da amostra seca depois da adição de HCl (M)

#### 4.2.5. Solubilidade em Hidróxido de Sódio

A solubilidade em NaOH foi determinada para os três tipos de carvão. Os ensaios foram feitos no Laboratório de Saneamento da EESC - USP e a metodologia está descrita no Projeto 02:009.05-53 da ABNT.

Uma amostra de 60 g de cada material foi pesada e colocada na estufa ( $105\pm3^{\circ}\text{C}$ ) durante 1 hora. Depois de resfriadas em dessecador, as amostras foram pesadas, determinando-se sua massa seca, que foram transferidas para recipientes volumétricos de 1000 ml, aos quais foram

adicionados 500 ml de solução de NaOH 1% previamente diluída em água destilada. Em seguida, foram deixados em repouso à temperatura ambiente, durante 24 horas. A solução de NaOH foi descartada e as amostras foram lavadas por decantação com água destilada, e colocadas em estufa para secar durante 3 horas, resfriadas em dessecador e pesadas.

A solubilidade em NaOH dos materiais ensaiados foi calculada pela seguinte equação:

$$\text{Solubilidade}(\%) = \left( \frac{P_1 - P_2}{P_1} \right) \times 100 \quad (35)$$

em que:

$P_1$  = massa da amostra seca (M)

$P_2$  = massa da amostra seca depois da adição de NaOH (M)

#### 4.2.6. Difração em Raio X

A difração em raio X foi feita com intuito de se obter análise química qualitativa do material estudado, que é representada por fases presentes na amostra de ensaio. A técnica de difração em raio X é caracterizada por um campo elétrico de ondas eletromagnéticas exercendo influência sobre os elétrons de um átomo, que passam a vibrar com frequência idêntica a das ondas eletromagnéticas, que neste caso são os raios X. Esta análise foi feita no laboratório de raio X do departamento de Física da EESC - USP.

#### 4.2.7. Presença de Mercúrio na Água em Contato com o Material

As amostras de carvão antracitoso (amostra 2) e de carvão betuminoso foram analisadas quanto a possível presença de compostos químicos, como mercúrio, que podem ser liberadas para a água, prejudicando a qualidade de água filtrada.

Os ensaios para esta determinação foram feitos na Lápis Johann Faber S/A, em São Carlos.

Primeiramente, coletou-se uma amostra de água filtrada, da Estação de Tratamento de Água de São Carlos (ETASC). Em seguida, uma amostra de aproximadamente 50 g de cada tipo de carvão, no estado natural em que foi fornecido, foi colocada em dois recipientes volumétricos de 1000 ml, aos quais foram adicionados 500 ml da amostra de água coletada.

Com o auxílio de um bastão, mexia-se diariamente a mistura de carvão e água. Da água resultante desta mistura, foram coletadas amostras, após 1, 7 e 20 dias. Estas amostras foram enviadas a Lápis Johann Faber S/A, as quais foram analisadas em espectrofotômetro de absorção atômica.

### 4.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

#### 4.3.1. Dureza do Material

A dureza do material foi determinada somente para o carvão antracítoso (amostra 2) e para o carvão betuminoso; foi riscada uma amostra bruta do material, antes de sua moagem, utilizando-se os minerais da escala Mohs (ver Tabela 3.4).

#### 4.3.2. Curva de Distribuição Granulométrica

O ensaio para a obtenção da curva de distribuição granulométrica foi realizado no Laboratório de Geotecnia da EESC - USP. O procedimento do ensaio está descrito no Projeto 2:09.67-001/1989 da ABNT.

As peneiras foram selecionadas e montadas no agitador, obedecendo a seguinte ordem, do fundo para o topo: fundo; 0,21; 0,25; 0,30; 0,35; 0,42; 0,59; 0,71; 0,84; 1,00; 1,19; 1,41; 1,68; 2,00; 2,40 mm

As amostras de carvão foram peneiradas em quantidades de aproximadamente 80 gramas, por um período de 5 minutos. Foram pesadas as massas retidas em cada peneira, calculadas as porcentagens retidas e as porcentagens acumuladas, e posteriormente foi construída a curva de distribuição granulométrica para cada amostra.

#### 4.3.3. Determinação da Massa Específica

Os ensaios para a determinação da massa específica das amostras de carvão foram realizados no Laboratório de Geotecnia da EESC - USP. A técnica do picnômetro foi utilizada para tal determinação, descrita na norma NBR 6508.

Foram retiradas duas amostras de aproximadamente 60g de cada tipo de carvão, com exceção do carvão antracitoso (amostra 1), sendo uma delas correspondente a uma faixa granulométrica de material fino e a outra de material grosso. O resultado da média aritmética, forneceu o valor representativo da massa específica dos materiais.

Os vazios intergranulares do carvão, são ocupados por ar, que interferem na determinação da massa específica e, portanto, foi necessário deixar as amostras em repouso durante 24 horas. Depois deste período, as amostras foram submetidas à intensa agitação durante 10 minutos para conseguir uma melhor saturação do material, permitindo que o ar retido fosse facilmente expulso no momento de aplicar vácuo nos picnômetros, seguindo-se o procedimento normal da técnica referida inicialmente.

#### 4.3.4. Determinação do Diâmetro Volumétrico

O método aplicado para a determinação do diâmetro volumétrico médio para cada faixa granulométrica dos carvões antracitoso (amostra 2) e betuminoso, foi o método proposto por CLEASBY et al. (1981). Os ensaios para a determinação deste parâmetro foram realizados no Laboratório de Saneamento da EESC - USP.

Primeiramente, uma amostra representativa de cada faixa foi selecionada, após quarteamentos sucessivos de uma amostra inicial. Em seguida, as amostras foram colocadas em cápsulas e secas em estufa à temperatura de  $105 \pm 3^\circ\text{C}$ , durante um período de 2 horas. Depois de esfriadas em dessecador, foi retirada e pesada uma quantidade de material de cada cápsula.

Os grãos de cada amostra foram contados, de forma que se obedecessem os valores recomendados por CLEASBY et al. (1981), mais de

200, para os grãos de tamanhos menores que 1,00 mm, e mais de 150 grãos para os maiores que este tamanho.

Com o número e o peso total de grãos, e sabendo-se a massa específica do material, foi possível obter o diâmetro volumétrico médio de cada faixa granulométrica, utilizando-se a equação (5).

#### 4.3.5. Determinação do Coeficiente de Esfericidade e Porosidade

Os ensaios para determinar o coeficiente de esfericidade e a porosidade média dos materiais estudados foram realizados em uma instalação piloto montada na EESC - USP, mostrada na Figura 4.2. e descrita no item 4.5.

O método empregado foi proposto por CLEASBY et al. (1981), que consiste na determinação de perdas de carga para meio granular no estado fixo, e depois em estado fluidificado, variando-se a velocidade de escoamento descendente e ascendente da água. As leituras de perda de carga eram feitas em um quadro de piezômetros, primeiramente no sentido descendente com o meio granular em estado fixo. Feitas as leituras, para diferentes vazões, media-se a altura da camada do material granular, e em seguida, invertia-se o sentido do escoamento, para ascendente, procedendo-se as medições de perda de carga com o meio granular fixo até a sua completa fluidificação. Desta forma, podia-se observar também o valor da velocidade mínima de fluidificação, bem como a expansão do meio granular.

A temperatura da água foi considerada um fator de grande importância na precisão dos resultados e portanto, foi controlada dentro de determinado limite ( $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ), não apresentando alterações significativas nas propriedades da água, como massa específica e viscosidade.

A porosidade e o coeficiente de esfericidade médios foram determinados de acordo com o seguinte procedimento:

- a) A perda de carga no estado de fluidificação de um meio granular uniforme é constante a partir do ponto de fluidificação incipiente, em que a porosidade ( $\varepsilon_{mf}$ ) é igual a porosidade inicial do meio granular fixo ( $\varepsilon_0$ ). Conhecidos então, o valor da perda de carga no meio fluidificado ( $\Delta H_f$ ) e a altura da camada ( $L_0$ ), e tendo-se a massa específica do material granular ( $\rho_g$ ) e a massa

específica da água ( $\rho_a$ ) em função da temperatura da água, é possível calcular a porosidade média do meio granular fixo ( $\varepsilon_0$ ), utilizando-se a equação (16).

b) O coeficiente de esfericidade médio pode ser calculado através da Equação de Ergun (equação (15)).

Todos os parâmetros envolvidos na equação (15), com exceção da superfície específica ( $Sv$ ), são conhecidos. Rearranjando a equação (15), obtém-se:

$$\frac{g\rho_a\Delta H_0}{LV} = \frac{150\mu(1-\varepsilon_0)^2(Sv)^2}{36(\varepsilon_0)^3} + \frac{1,75(1-\varepsilon_0)(Sv)}{(\varepsilon_0)^3}(\rho_a V) \quad (36)$$

ou

$$Y = a + bX \quad (37)$$

Sendo:

$$Y = \frac{g\rho_a\Delta H_0}{LV} \quad (38)$$

$$a = \frac{150\mu(1-\varepsilon_0)^2(Sv)^2}{36(\varepsilon_0)^3} \quad (39)$$

$$b = \frac{1,75(1-\varepsilon_0)(Sv)}{(\varepsilon_0)^3} \quad (40)$$

$$X = (\rho_a V) \quad (41)$$

Tendo-se uma série de pares de resultados experimentais ( $V, \Delta H_0$ ), aplicando-se as equações (38) e (41), calcula-se outra série de dados ( $X, Y$ ), e aplicando o método de mínimos quadrados, são determinados os valores de  $a$  e  $b$ . Conhecendo-se  $a$  e usando-se a equação (39), determina-se a superfície específica ( $Sv$ ) e finalmente, com a equação (2) calcula-se o

coeficiente de esfericidade médio de cada subcamada ( $\psi_{sub}$ ), e com a equação (3) calcula-se o coeficiente médio do meio granular não uniforme ( $\psi_{méd}$ ).

Com os valores de porosidade para cada faixa granulométrica e a curva de distribuição granulométrica para cada material, foi possível calcular a massa de material necessária para compor o meio granular não uniforme, utilizando-se a seguinte equação:

$$M_g = V_g \rho_g (1 - \varepsilon_o) \quad (42)$$

$$V_g = S_c h_{sub} \quad (43)$$

em que:

$M_g$  = massa de grãos correspondente a cada faixa granulométrica do material granular (M)

$V_g$  = volume de grãos ( $M^3$ )

$S_c$  = área da coluna ( $M^2$ )

$h_{sub}$  = altura da subcamada, obtida através da curva de distribuição granulométrica (L)

Para a determinação do coeficiente de esfericidade e porosidade foram seguidos os procedimentos:

- a) lavagem manual do material granular para eliminar os finos, sem causar alteração nos grãos;
- b) o material era colocado em pequenas quantidades na coluna de ensaios, que estava cheia em quase sua totalidade com água, desde a parte superior, utilizando-se recipiente plástico, até que o material compactado ocupasse aproximadamente uma altura de 20 cm na coluna;
- c) a compactação do material era efetuada através de manobras de aberturas e fechamentos sucessivos da válvula de entrada de água na parte inferior da coluna, até que a espessura resultasse igual a 20 cm, fixada para cada ensaio;

- d) a temperatura da água era monitorada em um termômetro colocado dentro da coluna de ensaios;
- e) as leituras de perda de carga eram feitas somente após a estabilização da vazão;
- f) a expansão do meio granular era medida com auxílio de uma régua.

#### **4.4. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO PILOTO**

As simulações de lavagem foram feitas na mesma instalação piloto utilizada para a determinação do coeficiente de esfericidade e porosidade do material granular, cujo esquema é apresentado na Figura 4.2, e possuindo basicamente os seguintes componentes:

- a) caixa de fibrocimento com capacidade de 1000 L com resistência elétrica de 3000 watts de potência instalada no interior da caixa. A caixa foi enchida até 70% de seu volume com água da rede de abastecimento público. A temperatura da água era controlada a  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  (quando necessário, ligava-se a resistência ou colocava-se gelo).
- b) coluna de seção circular, com diâmetro interno de 91,4 mm e 1,30 m de altura, construída em acrílico transparente e dividida em módulos tubulares presos entre si por meio de flanges com parafusos. A 0,50 m do fundo havia um bocal com ranhuras de 0,60 mm. Abaixo do bocal, havia entradas para água e para ar. Na coluna havia duas saídas, uma superior quando o escoamento era ascendente e outra inferior, quando o escoamento era descendente. Em qualquer das saídas, a água escoava livremente em um coletor em forma de copo, o qual estava ligado à caixa de água, fechando desta forma, um circuito que permitia a sua recirculação.
- c) bomba de 1,0 CV para o recalque de água da caixa para coluna, sendo o excesso da vazão recalculada, retornado para a caixa, promovendo agitação na água, a fim de que a temperatura da água se mantivesse uniforme.
- d) dispositivos de medição de vazão, constituídos por rotâmetros com escalas de 0 a 600 L/h para água, e de 0 a 200 L/h previamente adaptado e calibrado, para ar (ver APÊNDICE 1). As vazões eram reguladas através de válvulas tipo esfera. O rotâmetro de água era útil para determinação

aproximada da vazão. Para garantir uma medição satisfatória de vazão, eram feitas medidas volumétricas utilizando-se uma proveta plástica de 1000 ml e um cronômetro digital.

- e) filtro de areia e manta sintética não tecida para evitar que houvesse alteração da qualidade da água utilizada nos ensaios, localizado na linha de recalque da água, entre a bomba e a coluna de ensaio.
- f) compressor de ar de  $\frac{1}{2}$  HP modelo MCD 3,5, do tipo rotativo (sem reservatório).

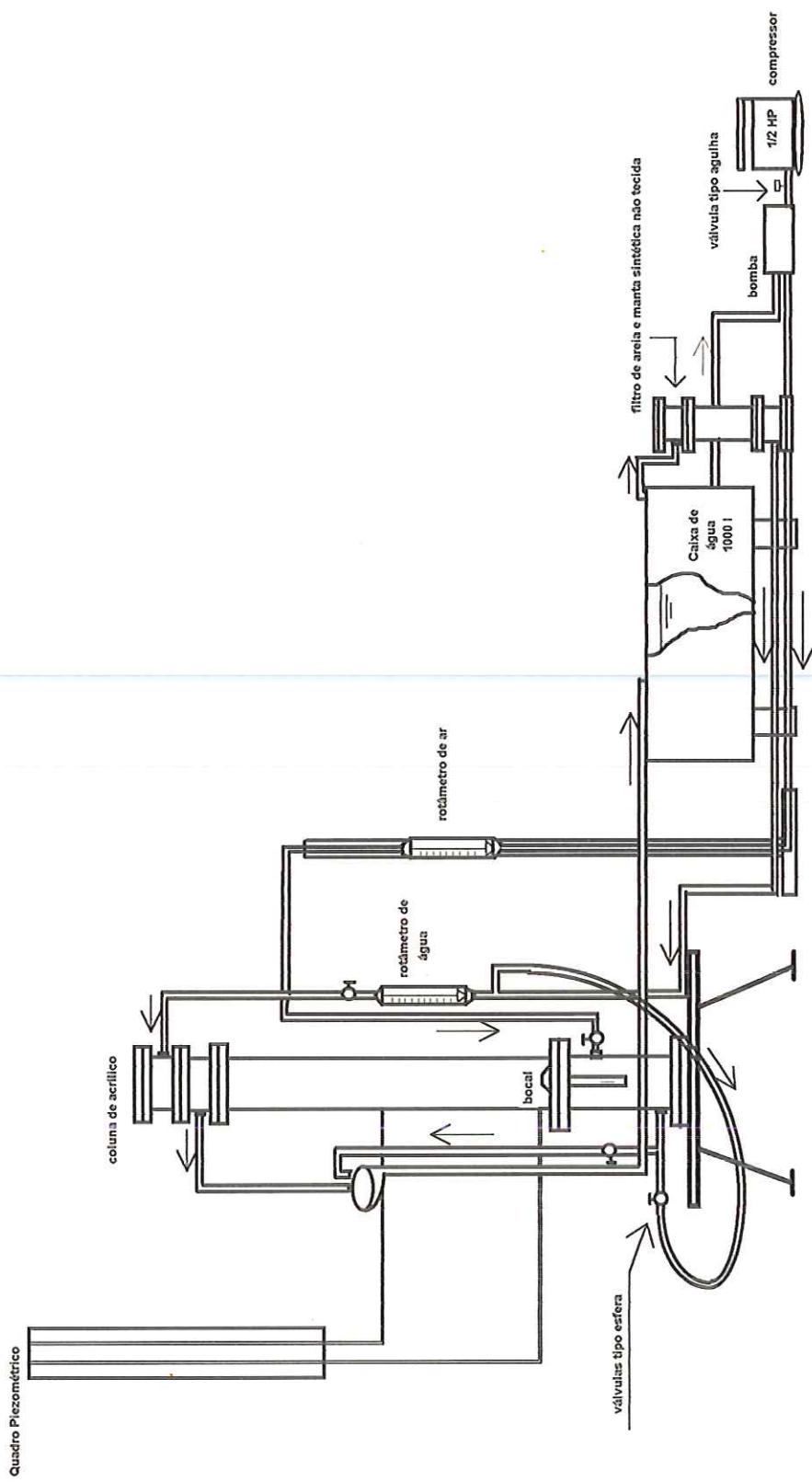


Figura 4.2 - Desenho Esquemático da Instalação Piloto

Na Figura 4.3 tem-se a fotografia mostrando a instalação piloto utilizada para os ensaios, e na Figura 4.4, a fotografia do bocal com ranhuras de 0,60 mm fixado a 0,50 m do fundo da coluna de ensaios.



Figura 4.3 - Fotografia da Instalação Piloto utilizada para as Simulações de Lavagem (ver legenda abaixo)

- A - caixa de fibrocimento (1000 litros)
- B - coluna de acrílico de seção circular
- C - rotâmetro de ar
- D - rotâmetro de água
- E - coletor para saída de água de lavagem
- F - filtro de areia e manta sintética não tecida
- G - peneira



Figura 4.4 - Fotografia do bocal fixado à 0,50 m do fundo da coluna de ensaios

#### 4.5. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS RELATIVOS À LAVAGEM DO MEIO GRANULAR

Foram estudados dois métodos de lavagem, a saber:

- Lavagem exclusivamente com água
- Lavagem independente com ar e água

Inicialmente foram feitas simulações de lavagens intermitentes, admitindo-se 1 lavagem diária durante um ano (365 lavagens), para os três

tipos de carvão, sendo o meio granular retornado à posição original após cada simulação. Com o decorrer dos ensaios, surgiu a possibilidade de simular as lavagens continuamente, ou seja, as simulações eram feitas sem que o meio granular voltasse à posição original, durante um período de tempo igual àquele necessário para promover as 365 lavagens.

Os procedimentos executados para a realização de cada método de lavagem são descritos a seguir:

#### **4.5.1. Lavagem Exclusivamente com Água**

##### **a) Intermítente**

Depois de colocado o material na coluna de ensaio, era introduzida água no sentido ascensional, durante 10 minutos, com velocidade de 0,9 m/min, de modo que a expansão do meio granular atingisse cerca de 35 a 40%. Terminado este tempo, o material era compactado até que voltasse à sua posição inicial, e em seguida iniciava-se uma nova lavagem, totalizando 365 simulações.

##### **b) Contínua**

A válvula de água no sentido ascensional era aberta, com velocidade de 0,9 m/min, iniciando-se a lavagem contínua, que durou 60 horas e 50 minutos, correspondente a 365 lavagens com duração de 10 minutos. Leituras de temperatura e medição da expansão do meio granular eram efetuadas a cada 4 horas.

#### **4.5.2. Lavagem Independente com Ar e Água**

##### **a) Intermítente**

Para este método de lavagem, o nível de água no interior da coluna de ensaio era diminuído até que atingisse 30 cm acima do topo do meio granular.

Introduzia-se ar com taxa de  $15 \text{ l/sm}^2$ , durante 3 minutos. Após este intervalo de tempo, o ar era desligado sendo em seguida, introduzida água, com velocidade ascensional de  $0,9 \text{ m/min}$ , de modo que a expansão do meio granular atingisse cerca de 35 a 40%. A compactação do meio granular era feita após cada simulação de lavagem.

Na foto da Figura 4.5 é mostrada a aplicação de ar durante uma simulação de lavagem, utilizando este método e, em seguida, na foto da Figura 4.6 é mostrada a introdução de água após a aplicação de ar.

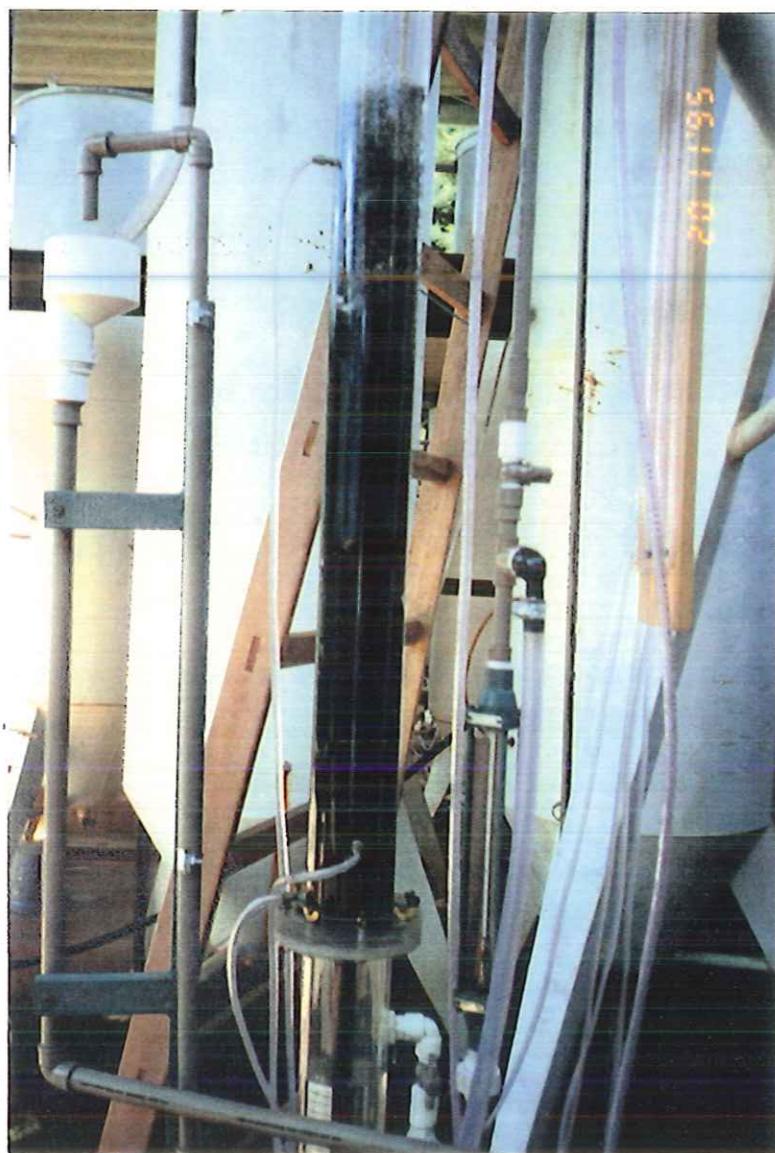


Figura 4.5 - Fotografia mostrando a aplicação de ar durante a lavagem independente com ar e água.



Figura 4.6 - Fotografia mostrando a introdução de água no sentido ascensional, logo após a aplicação de ar.

#### b) Contínua

Da mesma maneira que o modo intermitente, o nível de água no interior da coluna de ensaio era diminuído, até que atingisse 30 cm acima do topo do meio granular. Em seguida, foi introduzido ar com taxa de  $15 \text{ l/sm}^2$ , durante 18 horas e 15 minutos. Após este intervalo de tempo, o ar foi desligado sendo em seguida, introduzida água, com velocidade ascensional

de 0,9 m/min, durante 42 horas e 35 minutos, simulando assim, 365 lavagens de 3 minutos com ar e 7 minutos com água.

Durante a lavagem contínua com água, fazia-se leitura de temperatura e media-se a expansão do meio granular, a cada 4 horas.

Para a realização das simulações de lavagem, foram seguidos os procedimentos:

- a) lavagem manual do material granular para eliminar os finos, sem causar alteração nos grãos;
- b) o material fornecido separado por faixas granulométricas foi colocado na coluna de ensaio de forma que os grãos se apresentassem estratificados, e o material fornecido misturado foi colocado totalmente misturado, até que o material compactado ocupasse 50 cm na coluna;
- c) a compactação do material foi efetuada por meio de manobras de aberturas e fechamentos sucessivos da válvula de entrada de água na parte inferior da coluna, até que a espessura resultasse igual a 50 cm, fixada para cada ensaio;
- d) a temperatura da água era controlada em  $25\pm1^{\circ}\text{C}$  com termômetro colocado dentro da caixa de fibrocimento;
- e) a expansão do meio granular era medida com auxílio de uma régua;
- f) na saída da água de lavagem foi colocada uma peneira de malha inferior ao menor grão do material, para que pudessem ser devolvidos à coluna, os eventuais grãos carreados pela água;
- g) ao final de cada método de lavagem, lavava-se a caixa de fibrocimento e a coluna de ensaio;
- h) as simulações de lavagem contínua foram feitas somente para a amostra 1 de carvão antracitoso, pois não haviam mais quantidades suficientes da amostra 2 de carvão antracitoso e carvão betuminoso.

No início e no término de cada método de lavagem utilizado, determinavam-se os valores médios de porosidade e do coeficiente de esfericidade, pelo método mencionado anteriormente, a fim de analisar as alterações que ocorreram depois das simulações de lavagem. O diâmetro

utilizado para o cálculo destes parâmetros, foi o diâmetro equivalente do meio granular, calculado pela equação (4). Depois disso, retirava-se o material da coluna, por sifonamento, o qual era secado e peneirado. O peneiramento do material era feito utilizando-se peneiras da série americana dispostas em agitador, conforme descrito no item 4.3.2. Pesava-se o material retido em cada peneira e verificava-se a mudança na curva de distribuição granulométrica.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS FILTRANTES

#### 5.1.1. Características Químicas

As determinações do teor de umidade, teor de cinzas, solubilidade em hidróxido de sódio foram feitas para os três tipos de carvão, e as determinações do teor de óleos, solubilidade em ácido clorídrico, difração em raio X e presença de mercúrio na água em contato com o material, foram feitas somente para o carvão antracitoso (amostra 2) e para o carvão betuminoso.

Na Tabela 5.1 estão apresentados os resultados das análises químicas feitas para os três carvões.

**Tabela 5.1 - Resultados das análises químicas feitas para as amostras de carvão**

Análise	Carvão Antracitoso		Carvão Betuminoso
	Amostra 1	Amostra 2	
Umidade (%)	3,6	1,6	1,3
Cinzas (%)	23,45	38,25	34,28
Solubilidade em HCl (%)	-	1,47	3,16
Solubilidade em NaOH (%)	0,44	0,28	0,35
Óleos (%)	-	3,13	3,81

Com os resultados das análises feitas em espectrofotômetro de absorção atômica para determinar a possível presença de mercúrio nas amostras de água resultantes da mistura de carvão em contato com a água filtrada da ETASC, em 1, 7 e 20 dias, foi comprovado a ausência de mercúrio nas amostras coletadas.

A análise química qualitativa através de difração em raio X apresentou uma série de estruturas moleculares de compostos químicos com grande

quantidade de átomos de C e H representados por anéis aromáticos condensados com radicais alquílicos ligados em seus sítios periféricos, apresentando também heteroátomos como N, O e S.

### 5.1.2. Características Físicas

O valor da dureza do material obtido foi entre 2 e 3 na escala Mohs, para o carvão antracitoso (amostra 2) e para o carvão betuminoso.

A determinação da massa específica foi feita para duas amostras de granulometrias diferentes de carvão antracitoso (amostra 2) e de carvão betuminoso. Os resultados com os valores mínimo, médio e máximo correspondentes a cada amostra estão apresentados na Tabela 5.2 e os dados obtidos durante o ensaio estão apresentados no ANEXO A. Para o carvão antracitoso (amostra 1) foi utilizado o valor de massa específica fornecido (Tabela 4.1).

**Tabela 5.2 - Valores de massa específica do material granular**

<b>Tipo de carvão</b>	<b>Valores de massa específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>		
	<b>mínimo</b>	<b>médio</b>	<b>máximo</b>
<b>Antracitoso (amostra 2)</b>	1637	1670	1705
<b>Betuminoso</b>	1563	1596	1635

Os valores da velocidade mínima de fluidificação ( $V_{mf}$ ) e perda de carga no meio granular fluidificado para cada faixa granulométrica de carvão antracitoso (amostra 2) e de carvão betuminoso foram obtidos através dos gráficos representados nas Figuras B1 a B16 do ANEXO B, utilizando-se a técnica descrita por CHEN et al. apud FERREIRA (1993), onde são traçadas duas retas, uma que engloba o trecho cuja variação de perda de carga no meio filtrante é linear com a velocidade ascensional de água, e outra que engloba todos os pontos cujo trecho de variação de perda de carga é constante e independente do valor da velocidade ascensional de água. O

ponto de cruzamento destas retas define o valor da velocidade mínima de fluidificação no eixo das abscissas, e o valor da perda de carga do meio granular fluidificado no eixo das ordenadas. Com os valores de perda de carga no meio granular fluidificado, foram calculados os valores de porosidade no meio granular uniforme utilizando-se a equação (16).

A superfície específica dos grãos e o coeficiente de esfericidade médio do meio granular uniforme foram calculados utilizando-se o diâmetro volumétrico médio obtido para cada faixa granulométrica que estão apresentados no ANEXO A.

Nas Tabelas 5.3 e 5.4 são mostrados os valores referentes à velocidade mínima de fluidificação ( $V_{mf}$ ), perda de carga no meio granular fluidificado ( $\Delta H_f$ ), diâmetro volumétrico (dv), porosidade ( $\varepsilon_o$ ), coeficiente de esfericidade ( $\psi_{sub}$ ) e superfície específica dos grãos (Sv) médios, para cada faixa granulométrica de carvão antracitoso (amostra 2) e de carvão betuminoso.

**Tabela 5.3 - Velocidade mínima de fluidificação, perda de carga no meio granular fluidificado, diâmetro volumétrico, porosidade, coeficiente de esfericidade correspondentes a cada faixa granulométrica de carvão antracitoso (amostra 2)**

Faixa Granulométrica (mm)	$V_{mf} \times 10^{-3}$ (m/s)	$\Delta H_f$ (m)	dv (mm)	$\varepsilon_o$	$\psi_{sub}$	Sv ( $m^2/m^3$ )
0,59 - 0,71	1,50	0,058	0,653	0,57	0,38	24332
0,71 - 0,84	2,00	0,058	0,763	0,55	0,41	18992
0,84 - 1,00	3,17	0,071	0,952	0,48	0,56	11248
1,00 - 1,19	4,83	0,069	1,144	0,47	0,64	8193
1,19 - 1,41	5,83	0,075	1,224	0,47	0,68	7207
1,41 - 1,68	7,83	0,075	1,524	0,44	0,65	6087
1,68 - 2,00	8,00	0,080	1,763	0,44	0,57	5946
2,00 - 2,40	10,50	0,074	2,170	0,46	0,59	4649

**Tabela 5.4 - Velocidade mínima de fluidificação, perda de carga no meio granular fluidificado, diâmetro volumétrico, porosidade, coeficiente de esfericidade correspondentes a cada faixa granulométrica de carvão betuminoso**

Faixa Granulométrica (mm)	$V_{mf} \times 10^{-3}$ (m/s)	$\Delta H_f$ (m)	$d_v$ (mm)	$\epsilon_0$	$\psi_{sub}$	$S_v$ ( $m^2/m^3$ )
0,59 - 0,71	1,50	0,060	0,627	0,53	0,46	20650
0,71 - 0,84	1,60	0,053	0,763	0,54	0,41	19057
0,84 - 1,00	2,33	0,056	0,831	0,53	0,47	15300
1,00 - 1,19	3,50	0,057	1,049	0,51	0,51	11167
1,19 - 1,41	5,17	0,059	1,334	0,52	0,47	9602
1,41 - 1,68	6,33	0,056	1,512	0,54	0,44	9066
1,68 - 2,00	8,83	0,052	1,835	0,55	0,40	8104
2,00 - 2,40	9,33	0,058	2,202	0,51	0,43	6387

Comparando-se os valores da velocidade mínima de fluidificação observados ( $V_{mf,obs}$ ) com os calculados ( $V_{mf,calc}$ ), utilizando-se a equação (20), tem-se os resultados apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.6 para o carvão antracitoso (amostra 2) e para o carvão betuminoso respectivamente.

**Tabela 5.5 - Valores de  $V_{mf}$  observados e calculados para as faixas granulométricas de carvão antracitoso (amostra 2)**

Faixa Granulométrica (mm)	$V_{mf,obs} \times 10^{-3}$ (m/s)	$V_{mf,calc} \times 10^{-3}$ (m/s)	E (%)
0,59 - 0,71	1,50	1,87	24,7
0,71 - 0,84	2,00	2,52	26,0
0,84 - 1,00	3,17	3,82	20,5
1,00 - 1,19	4,83	5,31	9,9
1,19 - 1,41	5,83	5,97	2,4
1,41 - 1,68	7,83	8,53	8,9
1,68 - 2,00	8,00	10,60	32,5
2,00 - 2,40	10,50	13,99	33,2

**Tabela 5.6 - Valores de Vmf observados e calculados para as faixas granulométricas de carvão betuminoso**

Faixa Granulométrica (mm)	V <sub>mf<sub>obs</sub></sub> x10 <sup>-3</sup> (m/s)	V <sub>mf<sub>calc</sub></sub> x10 <sup>-3</sup> (m/s)	E (%)
0,59 - 0,71	1,50	1,54	2,7
0,71 - 0,84	1,60	2,25	40,6
0,84 - 1,00	2,33	2,65	13,7
1,00 - 1,19	3,50	4,08	16,6
1,19 - 1,41	5,17	6,22	20,3
1,41 - 1,68	6,33	7,63	20,5
1,68 - 2,00	8,83	10,21	15,6
2,00 - 2,40	9,33	13,05	39,9

$$E = \frac{Vmf_{cal} - Vmf_{obs}}{Vmf_{obs}} \times 100 \quad (44)$$

em que:

E = erro porcentual

Para a construção da curva de distribuição granulométrica foi peneirada uma amostra de 1000 gramas de carvão antracitoso (amostra 1) determinando-se os tamanhos do menor e maior grão, tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade.

Para o carvão antracitoso (amostra 2) e para o carvão betuminoso foi adotado  $d_{10} = 1,00$  mm e adotando-se uma espessura de 50 cm para o meio granular, foi possível a construção da curva de distribuição granulométrica. Com a altura de cada subcamada, os valores de porosidade e massa específica de cada material foi possível calcular a massa de grãos correspondente a cada faixa granulométrica, utilizando-se a equação (42).

Nos Quadros B17, B18 e B19 do ANEXO B estão apresentadas a composição e a curva de distribuição granulométrica para cada material granular no estado natural em que foram fornecidos.

## 5.2. SIMULAÇÕES DE LAVAGEM DO MEIO GRANULAR

Após as simulações de cada método de lavagem, as amostras utilizadas para os ensaios foram peneiradas, verificando-se as alterações que ocorreram na composição da curva de distribuição granulométrica, que estão apresentadas nos Quadros C1 a C8, do ANEXO C.

A seguir, estão as comparações das curvas de distribuição granulométrica antes e depois das simulações de lavagens, e na Tabela 5.7 é mostrado um resumo comparando os valores dos tamanhos do menor e do maior grão,  $d_{10}$ ,  $d_{60}$  e CD referentes a cada método de lavagem. Os valores de  $d_{10}$  e  $d_{60}$  foram obtidos através de interpolação linear na curva de distribuição granulométrica.

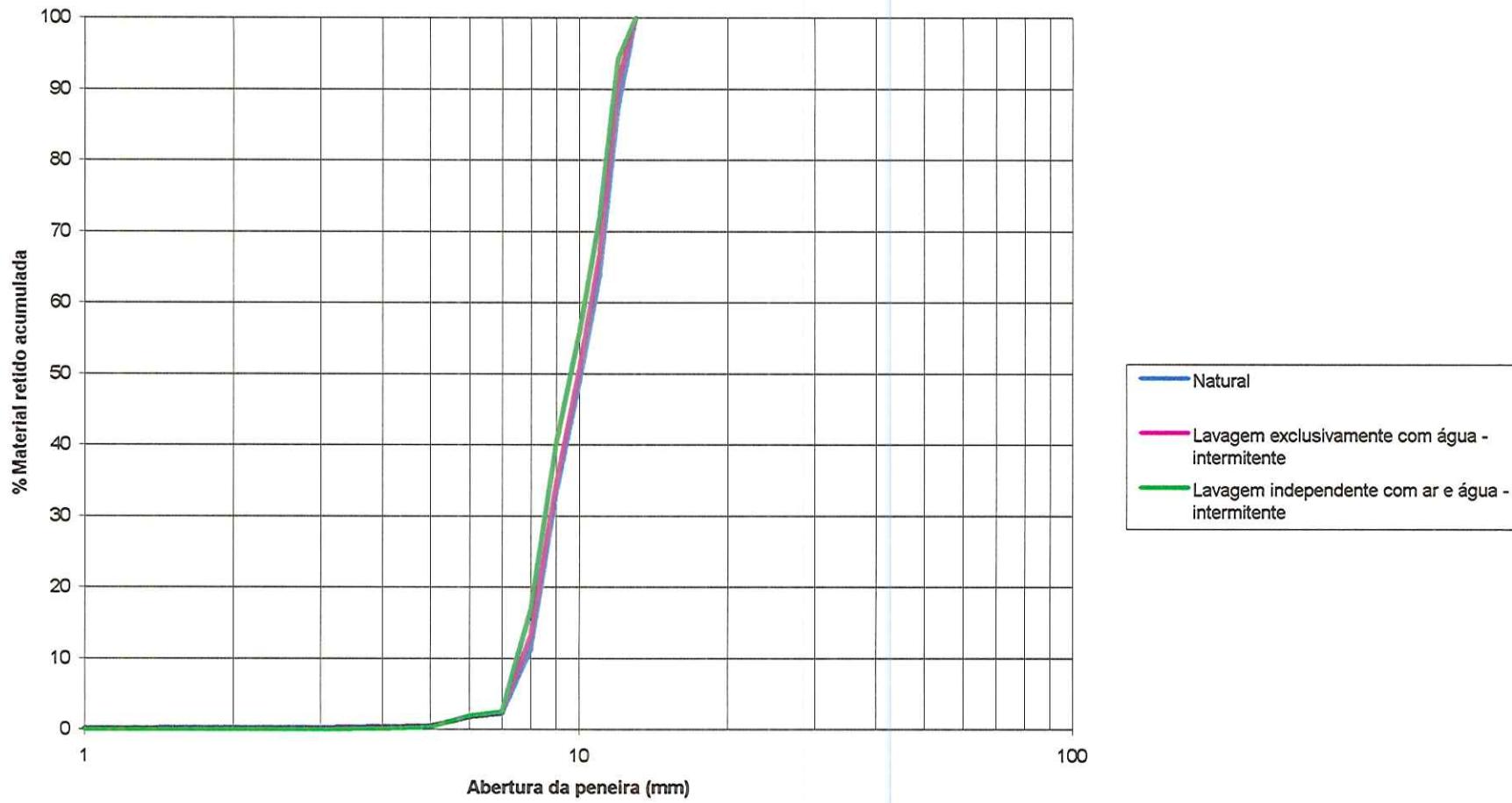


Figura 5.1 - Curvas de distribuição granulométrica do carvão antracitoso (amostra\_1) no estado natural e após simulações de lavagens intermitentes exclusivamente com água e independente com ar e água

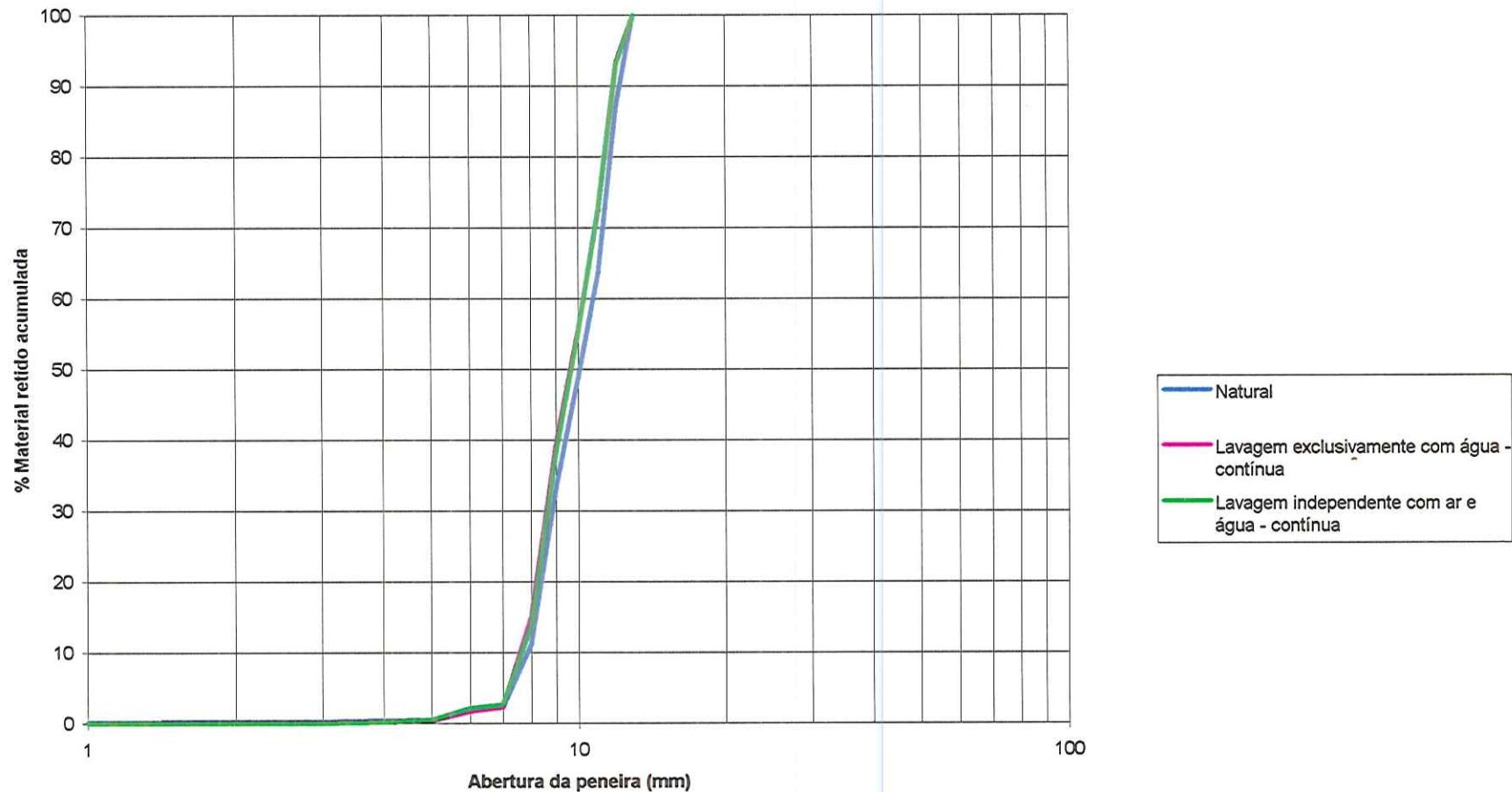


Figura 5.2 - Curvas de distribuição granulométrica do carvão antracitoso (amostra 1) no estado natural e após simulações de lavagens contínuas exclusivamente com água e independente com ar e água

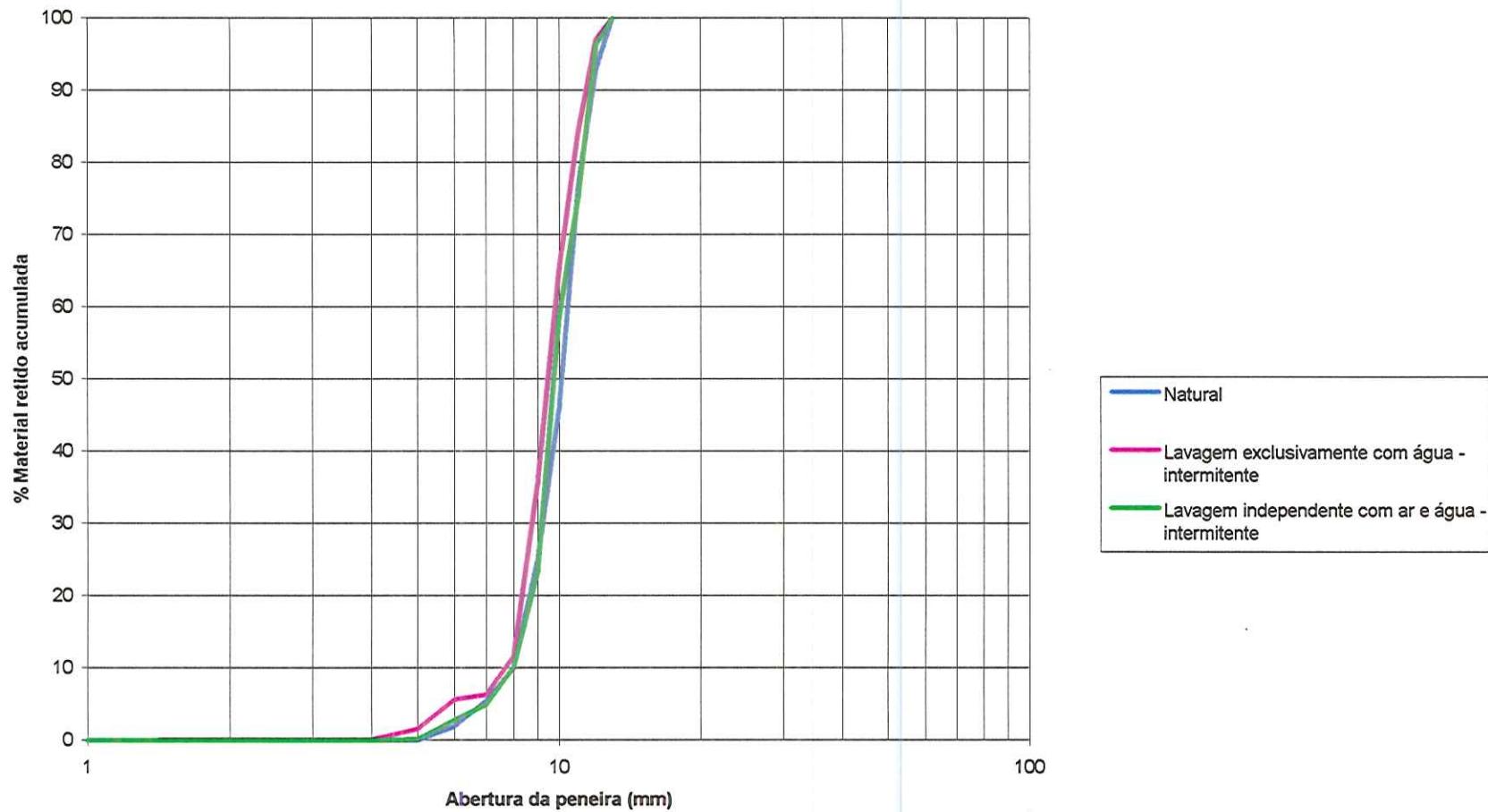


Figura 5.3 - Curvas de distribuição granulométrica do carvão antracítico (amostra 2) no estado natural e após simulações de lavagens intermitentes exclusivamente com água e independente com ar e água

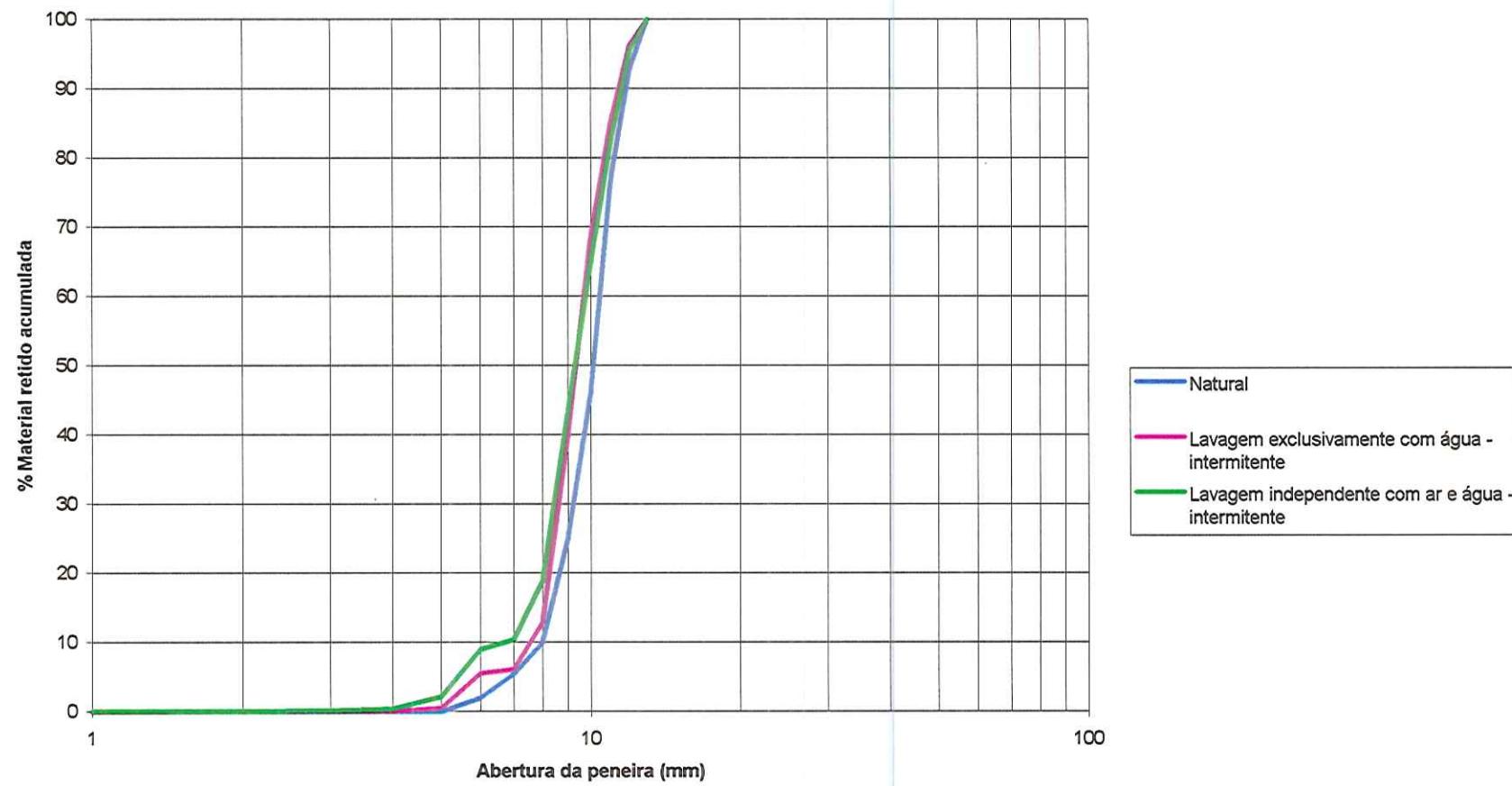


Figura 5.4 - Curvas de distribuição granulométrica do carvão betuminoso no estado natural e após simulações de lavagens intermitentes exclusivamente com água e independente com ar e água

**Tabela 5.7 - Resumo comparativo do tamanho do menor grão, tamanho do maior grão,  $d_{10}$ ,  $d_{60}$  e CD antes e depois das simulações de lavagens**

<b>Natural</b>					
<b>Tipo de carvão</b>	<b>menor grão (mm)</b>	<b>maior grão (mm)</b>	<b><math>d_{10}</math> (mm)</b>	<b><math>d_{60}</math> (mm)</b>	<b>CD</b>
<b>Antracitoso (amostra 1)</b>	0,21	2,40	0,98	1,61	1,64
<b>Antracitoso (amostra 2)</b>	0,59	2,40	1,00	1,53	1,53
<b>Betuminoso</b>	0,59	2,40	1,00	1,53	1,53
<b>Lavagem exclusivamente com água - intermitente</b>					
<b>Antracitoso (amostra 1)</b>	0,21	2,40	0,95	1,57	1,65
<b>Antracitoso (amostra 2)</b>	0,21	2,40	0,95	1,37	1,44
<b>Betuminoso</b>	0,21	2,40	0,94	1,35	1,44
<b>Lavagem independente com ar e água - intermitente</b>					
<b>Antracitoso (amostra 1)</b>	0,21	2,40	0,92	1,48	1,61
<b>Antracitoso (amostra 2)</b>	0,21	2,40	0,99	1,43	1,44
<b>Betuminoso</b>	0,21	2,40	0,80	1,36	1,70
<b>Lavagem esclusivamente com água - contínua</b>					
<b>Antracitoso (amostra 1)</b>	0,21	2,40	0,94	1,48	1,57
<b>Lavagem independente com ar e água - contínua</b>					
<b>Antracitoso (amostra 1)</b>	0,21	2,40	0,94	1,48	1,57

Da mesma maneira, foram obtidos os valores da velocidade mínima de fluidificação, perda de carga para o meio granular fluidificado e porosidade média, para os meios granulares estratificados. Para o cálculo da superfície específica dos grãos e do coeficiente de esfericidade médio utilizou-se o diâmetro equivalente, calculado pela equação (4) em que foram eliminadas as frações de material correspondente a faixa granulométrica menor que 0,21 mm. Os dados obtidos para o cálculo do diâmetro equivalente para cada meio granular estratificado estão apresentados no ANEXO A.

Na Tabela 5.8 são mostrados os valores de  $V_{mf}$ ,  $\Delta H_f$ , diâmetro equivalente ( $D_{eq}$ ),  $\varepsilon_0$ , coeficiente de esfericidade médio ( $\psi_{med}$ ) referentes aos meios granulares estratificados no estado natural e após as simulações de lavagens.

**Tabela 5.8 - Velocidade mínima de fluidificação, perda de carga no meio granular fluidificado, diâmetro equivalente, porosidade, coeficiente de esfericidade médios correspondentes aos meios granulares estratificados**

Método de lavagem	$V_{mf} \times 10^3$ (m/s)	$\Delta H_f$ (m)	$D_{eq}$ (mm)	$\epsilon_0$	$\psi_{méd}$	$Sv$ ( $m^2/m^3$ )
<b>Carvão antracitoso (amostra 1)</b>						
Natural	4,50	0,124	1,354	0,41	0,74	6011
Água - intermitente	5,17	0,127	1,330	0,39	0,99	4570
Ar e água - intermitente	4,67	0,123	1,276	0,41	0,91	5154
Água - contínua	4,83	0,125	1,288	0,41	0,93	4983
Ar e água - contínua	5,00	0,117	1,287	0,43	0,81	5780
<b>Carvão Antracitoso (amostra 2)</b>						
Natural	1,94	0,179	1,341	0,43	0,67	6697
Água - intermitente	1,82	0,172	1,224	0,44	0,73	6728
Ar e água - intermitente	1,90	0,173	1,312	0,42	0,63	7281
<b>Carvão Betuminoso</b>						
Natural	1,94	0,148	1,341	0,47	0,52	8590
Água - intermitente	1,82	0,159	1,214	0,42	0,77	6379
Ar e água - intermitente	1,86	0,135	1,164	0,49	0,57	9062

Os dados experimentais referentes aos valores da Tabela 5.8 estão apresentados no ANEXO C.

Com o intuito de comparar o desgaste por abrasão decorrentes das simulações de lavagens, estão apresentadas nas Tabelas 5.9, 5.10 e 5.11 e representadas nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, as porcentagens de material retido correspondentes a cada faixa granulométrica, para o carvão antracitoso (amostra 1), carvão antracitoso (amostra 2) e carvão betuminoso respectivamente.

Tabela 5.9 - % Material Retido em Cada Faixa Granulométrica  
do Carvão Antracitoso (amostra 1) no Estado Natural e após as Simulações de Lavagens

Faixa Granulométrica (mm)	Natural	% Material Retido		
		Lavagem com Água Intermitente	Lavagem com Ar e Água Intermitente	Lavagem com Água Continua
fundo - 0,21	0,21	0,14	0,04	0,10
0,21 - 0,25	0,04	0,01	0,01	0,02
0,25 - 0,30	0,08	0,03	0,02	0,04
0,30 - 0,35	0,01	0,01	0,01	0,01
0,35 - 0,42	0,11	0,09	0,09	0,08
0,42 - 0,59	0,10	0,21	0,25	0,12
0,59 - 0,71	1,28	1,29	1,58	1,34
0,71 - 0,84	0,41	0,68	0,51	0,57
0,84 - 1,00	9,04	10,71	14,35	12,81
1,00 - 1,19	22,00	21,23	23,42	24,25
1,19 - 1,41	15,53	16,18	15,53	16,20
1,41 - 1,68	14,88	16,10	16,20	16,91
1,68 - 2,00	23,74	24,42	22,27	20,95
2,00 - 2,40	12,56	8,92	5,73	6,61
Total	100,00	100,00	100,00	100,00

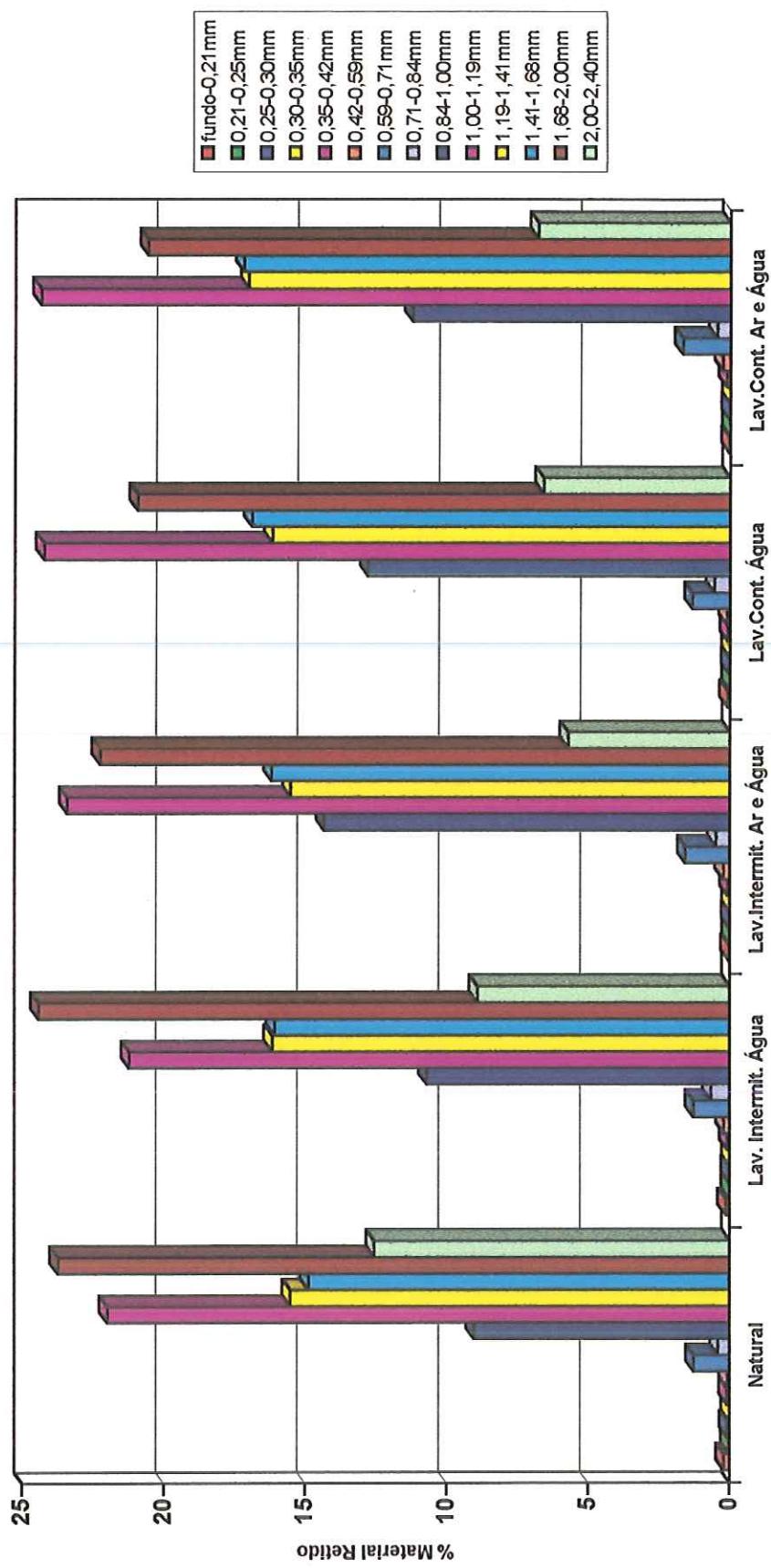


Figura 5.5 - Comparação da % de Material Retido em cada Faixa Granulométrica de Carvão Antracítoso (amostra 1) no Estado Natural e após Lavagens Intermittentes e Contínuas Exclusivamente com Água e Independente com Ar e Água

**Tabela 5.10 - % Material Retido em cada Faixa Granulométrica do Carvão Antracitoso (amostra 2) no Estado Natural e após as Simulações de Lavagens**

Faixa Granulométrica (mm)	% Material Retido		
	Natural	Lavagem com Água Intermitente	Lavagem com Ar e Água Intermitente
fundo - 0,21	0,00	0,016	0,0018
0,21 - 0,25	0,00	0,004	0,0010
0,25 - 0,30	0,00	0,017	0,0045
0,30 - 0,35	0,00	0,006	0,0007
0,35 - 0,42	0,00	0,054	0,0137
0,42 - 0,59	0,00	1,188	0,1395
0,59 - 0,71	2,00	4,165	2,6426
0,71 - 0,84	3,50	0,619	2,1553
0,84 - 1,00	4,50	5,338	5,2117
1,00 - 1,19	15,00	24,661	13,1265
1,19 - 1,41	21,00	29,078	35,3648
1,41 - 1,68	31,00	19,033	16,7156
1,68 - 2,00	16,00	13,089	20,9667
2,00 - 2,40	7,00	2,733	3,6555
Total	100,00	100,000	100,000

**Tabela 5.11 - % Material Retido em cada Faixa Granulométrica do Carvão Betuminoso no Estado Natural e após as Simulações de Lavagens**

Faixa Granulométrica (mm)	% Material Retido		
	Natural	Lavagem com Água Intermitente	Lavagem com Ar e Água Intermitente
fundo - 0,21	0,00	0,018	0,002
0,21 - 0,25	0,00	0,002	0,001
0,25 - 0,30	0,00	0,007	0,005
0,30 - 0,35	0,00	0,001	0,001
0,35 - 0,42	0,00	0,020	0,016
0,42 - 0,59	0,00	0,225	0,164
0,59 - 0,71	2,00	5,079	7,074
0,71 - 0,84	3,50	0,535	1,419
0,84 - 1,00	4,50	6,499	8,323
1,00 - 1,19	15,00	26,318	24,052
1,19 - 1,41	21,00	29,348	22,781
1,41 - 1,68	31,00	16,805	18,027
1,68 - 2,00	16,00	11,483	13,698
2,00 - 2,40	7,00	3,659	4,437
Total	100,00	100,000	100,000

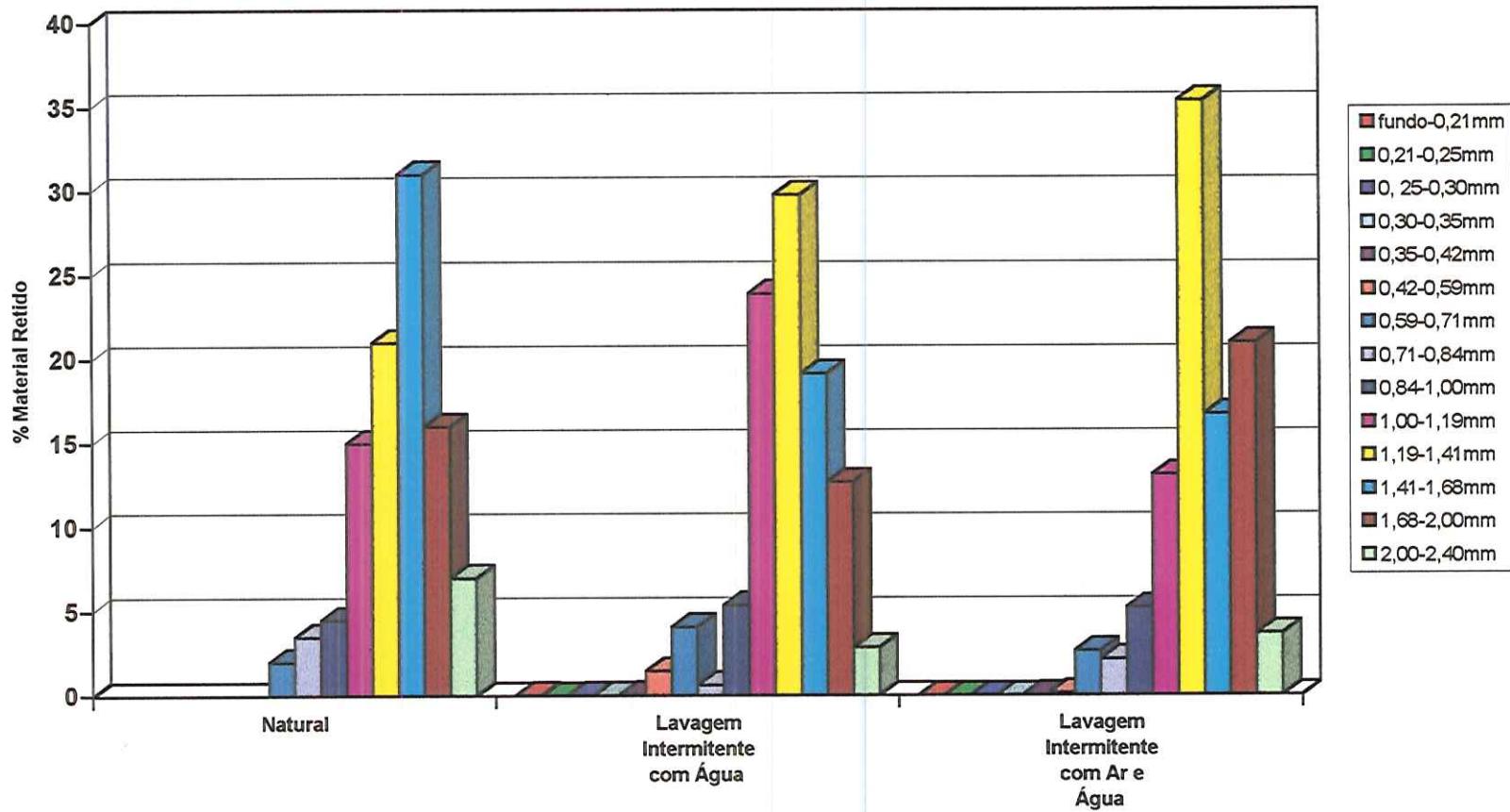


Figura 5.6 - Comparação da % de Material Retido em cada Faixa Granulométrica de Carvão Antracitoso (amostra 2) no Estado Natural e após Lavagens Intermitentes Exclusivamente com Água e Independente com Ar e Água

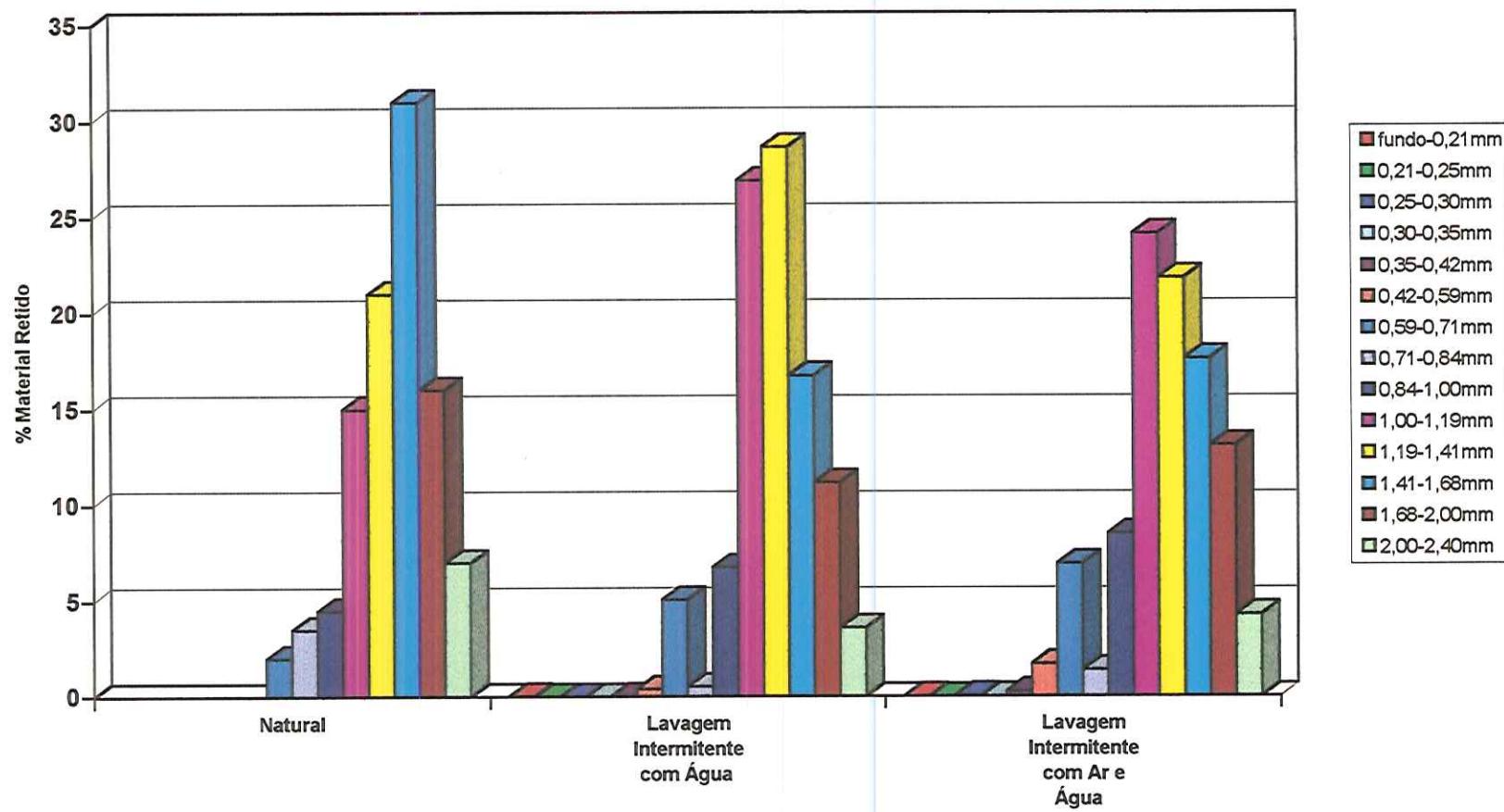


Figura 5.7 - Comparação da % de Material Retido em cada Faixa Granulométrica de Carvão Betuminoso no Estado Natural e após Lavagens Intermittentes Exclusivamente com Água e Independente com Ar e Água

Durante as lavagens contínuas com água e com ar e água, foram feitas leituras da temperatura da água e medidas as expansões do meio granular a cada 4 horas. As Figuras D1 e D2 do ANEXO D comprovam a importância da temperatura da água na expansão do meio granular.

Com a finalidade de comparar a forma e geometria dos grãos, foram fotografados através de microscópio eletrônico de varredura, alguns grãos das faixas granulométricas de 0,59 - 0,71 mm (com aumento de 20 vezes no tamanho dos grãos) e de 2,00 - 2,40 mm (com aumento de 12 vezes no tamanho dos grãos) de carvão antracitoso (amostra 2) e de carvão betuminoso, das amostras no estado natural em que foram fornecidas e das amostras resultantes das lavagens intermitentes com ar e água. As fotos estão apresentadas no ANEXO E.

## 6. DISCUSSÃO

### 6.1. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS FILTRANTES

#### 6.1.1. Características Químicas

Comparando-se os valores determinados do teor de umidade com os valores fornecidos (ver Tabelas 4.1 e 5.1), foi verificado que houve perda de umidade nas amostras de carvão, a qual provavelmente está relacionada com o transporte e o local de armazenagem das amostras.

De acordo com a Tabela 5.1, o valor de solubilidade em ácido clorídrico determinado para o carvão antracitoso (amostra 2) excedeu o valor de 1% especificado pela ABNT (1989).

Os carvões antracitoso (amostra 2) e betuminoso apresentaram baixo teor de óleos, pelo fato das amostras terem sido previamente lavadas pelo fornecedor.

Com os resultados obtidos da espectrofotometria de absorção atômica, concluiu-se que as amostras de água analisadas não apresentaram concentração de mercúrio durante o tempo de contato com o material.

A difração em raio X foi feita para obter-se uma análise química qualitativa dos carvões estudados. Apesar do carvão ser um material cristalino, esta técnica não foi suficiente para maiores conclusões sobre as estruturas moleculares dos compostos encontrados no carvão antracitoso (amostra 2) e no carvão betuminoso. Os dados obtidos confirmam a presença de uma grande quantidade de átomos de C e H, formando anéis aromáticos condensados, apresentando também heteroátomos como N, O e S. Para um melhor conhecimento da composição química qualitativa destes materiais seria necessária a utilização de outras técnicas como ressonância magnética nuclear, espectroscopia no vibracional de infra vermelho, entre outras, as quais não foram feitas nesta pesquisa pela indisponibilidade destes equipamentos.

### 6.1.2. Características Físicas

Os carvões antracitoso (amostra 2) e betuminoso apresentaram aproximadamente o mesmo valor de dureza (entre 2 e 3) e portanto, esta característica indica que os dois tipos de carvão possivelmente possuem mesma resistência à abrasão.

O carvão betuminoso apresentou valores de massa específica mais baixos comparados ao carvão antracitoso (amostra 2) e portanto, a velocidade para promover a fluidificação do meio granular de carvão betuminoso será mais baixa do que para o meio granular de carvão antracitoso (amostra 2); consequentemente, o consumo de água de lavagem será menor para o meio granular de carvão betuminoso, considerando a mesma expansão para os dois tipos de carvão.

Os valores dos diâmetros volumétricos médios obtidos para cada faixa granulométrica do carvão antracitoso (amostra 2) e do carvão betuminoso encontram-se dentro da faixa granulométrica correspondente, com exceção da faixa de 0,84 - 1,00 mm do carvão betuminoso que resultou 0,831 mm, devido a possível fragmentação dos grãos durante o transporte e manuseio do material. Os diâmetros equivalentes para os meios granulares estratificados diminuiram para as amostras de carvão após as simulações de lavagens comparados com as amostras no estado natural.

Com os valores de porosidade determinados para cada faixa granulométrica, observou-se que as duas faixas granulométricas mais finas de carvão antracitoso (amostra 2) apresentaram maior porosidade do que as demais faixas; no entanto a porosidade média do carvão antracitoso (amostra 2) resultou 0,49, menor que a do carvão betuminoso (0,54). Para o meio granular estratificado, a porosidade média manteve-se praticamente constante para as amostras de carvão antracitoso, variando de 0,39 a 0,43 para a amostra 1 e de 0,42 a 0,44 para a amostra 2; o carvão betuminoso apresentou maior variação (0,42 a 0,49).

Os valores do coeficiente de esfericidade referente a cada subcamada de carvão antracitoso (amostra 2) são muito variáveis de um tamanho para o outro, apresentando um valor médio de 0,56; para o carvão betuminoso houve menos variação, sendo o valor médio de 0,45. Quanto menor o

coeficiente de esfericidade, mais irregulares são os grãos e maior a porosidade do meio granular no estado fixo, confirmado o que foi mostrado na Tabela 3.1. Comparando-se os valores do coeficiente de esfericidade médio do meio granular estratificado no estado natural e após as lavagens, observou-se o arredondamento dos grãos, com exceção do meio granular de carvão antracitoso (amostra 2) após lavagens intermitentes com ar e água, todos os valores se apresentaram maiores que os resultantes das amostras no estado natural.

Com os resultados da velocidade mínima de fluidificação para cada subcamada de carvão antracitoso (amostra 2) e de carvão betuminoso, foi observado que houve um aumento crescente da menor faixa para a maior faixa granulométrica, entretanto os valores dos erros percentuais apresentaram-se altos. Para os meios granulares estratificados, a velocidade mínima de fluidificação permaneceu praticamente constante para os três tipos de carvão.

## 6.2. SIMULAÇÕES DE LAVAGEM DO MEIO GRANULAR

As alterações nas curvas de distribuição granulométrica são mais evidentes para a amostra 2 de carvão antracitoso e para o carvão betuminoso, em que o tamanho do menor grão para as amostras naturais era de 0,59 mm e após a simulações de lavagens (com água e com ar e água) apareceram grãos de menor tamanho, até 0,21 mm, havendo redução no tamanho efetivo e no  $d_{60}$ . A amostra de carvão betuminoso após simulação de lavagens intermitentes com ar e água apresentou maior alteração, com redução de 1,00 para 0,80 mm no tamanho efetivo e de 1,53 para 1,36 mm no  $d_{60}$ .

A qualidade e a origem do carvão são fatores que influenciam no desgaste por abrasão entre os grãos decorrentes de lavagens do meio granular; foi observado que o carvão antracitoso (amostra 1) apresentou menos alterações na distribuição granulométrica que os demais carvões, portanto a qualidade varia com a origem do carvão. Para os três tipos de

carvão, foi observado visualmente, que ocorre o arredondamento dos grãos após sucessivas lavagens, entretanto não foi feito um estudo comprovando esta tendência.

Comparando-se as Figuras 5.6 e 5.7 pode-se observar o aumento da fração correspondente aos menores grãos e a diminuição da fração dos maiores grãos, apresentando maiores diferenças quando o ar foi utilizado como auxiliar. Na faixa granulométrica de 1,41 - 1,68 mm houve maior diminuição da fração de material e na de 1,00 - 1,19 mm houve maior aumento, podendo-se afirmar que o maior efeito de abrasão entre os grãos ocorreu nestes limites.

Quanto às metodologias de simulação de lavagens, intermitente e contínua, utilizando-se lavagem exclusivamente com água, observou-se que a maior redução de material retido foi entre as peneiras de 2,00 e 2,40 mm, que resultou em 3,64% para o método intermitente e de 5,95% para o método contínuo; e o maior aumento de material retido foi entre as peneiras de 0,84 e 1,00 mm, 1,67% para o método intermitente e 3,77% para o método contínuo, comparado à amostra no estado natural. Para o método de lavagem independente com ar e água ocorreu maior redução de material retido entre as peneiras de 2,00 e 2,40 mm, 6,83% para o método intermitente e 5,75% para o método contínuo, e o maior aumento de material retido foi entre as peneiras de 0,84 e 1,00 mm, 5,31% para o método intermitente e 2,21% para o método contínuo, comparado à amostra natural (ver Tabela 5.9 e Figura 5.5). A mudança que ocorreu na distribuição granulométrica de um método para outro foi de aproximadamente 2% para os dois métodos de lavagem (com água e com ar e água), considerando as maiores diferenças de material retido entre peneiras. Portanto, pode-se afirmar que a lavagem contínua produz praticamente o mesmo efeito abrasivo entre os grãos comparado à lavagem intermitente, sendo possível a aplicação deste método em escala piloto, o qual apresenta a vantagem da obtenção de resultados a curto prazo.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base no trabalho realizado, conclui-se que:

- a) As metodologias utilizadas para as determinações do diâmetro volumétrico médio, porosidade e coeficiente de esfericidade apresentam resultados confiáveis, com base nos coeficientes de ajuste que indicam grande correlação das características dos parâmetros medidos com as equações que os modelam matematicamente;
- b) O carvão betuminoso utilizado nos ensaios apresentou resultados satisfatórios quanto ao efeito abrasivo decorrente dos métodos de lavagem estudados, podendo ser utilizado como material filtrante alternativo;
- c) A perda de material granular por abrasão não foi significativa, considerando que os ensaios foram realizados admitindo-se uma lavagem diária e um ano de uso dos materiais;
- d) As metodologias de lavagem empregadas, intermitentes contínuas produziram praticamente o mesmo efeito abrasivo entre os grãos, para ambos os casos (com e sem ar), de modo que o método de lavagem contínua pode ser empregado sem restrições, já que demanda menor tempo e fornece resultados semelhantes ao que se poderia esperar durante um ano nos filtros de uma estação de tratamento de água que empregasse meio filtrante contendo carvão antracitoso.

Com base neste trabalho, recomenda-se:

- a) É necessária a caracterização química e física do carvão, antes da utilização como material filtrante;

Com base neste trabalho, recomenda-se:

- a) Caracterizar química e fisicamente o carvão, antes da utilização como material filtrante;
- b) Comparar os custos dos carvões, levando-se em conta o desgaste e a reposição anual do material granular que podem ocorrer nas estações de tratamento de água;
- c) Estudar o efluente produzido por filtros constituídos de carvão, quanto à possível presença de metais, especialmente o mercúrio;
- d) Verificar o desgaste por abrasão com número menor de simulações de lavagens para observar a tendência de arredondamento dos grãos após sucessivas lavagens;
- e) Utilizar o método de lavagem simultânea com ar e água nas condições estudadas.

---

## **ANEXO A**

**QUADRO A1 - Determinação da Massa Específica dos Materiais Granulares**

Dados referentes a determinação da massa específica do Carvão Antracitoso (amostra 2)

Determinação	Faixa granulom.: 0,71 - 0,84 mm				Faixa granulom.: 1,68 - 2,00 mm			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Picnômetro n°	14	14	14	14	5	5	5	5
Picnômetro + Material Granular + Água : M <sub>1</sub>	686,50	686,01	685,51	684,87	706,53	706,00	705,25	704,65
Temperatura do ensaio: °C	15,0	19,0	24,0	27,5	14,0	19,0	26,0	28,0
Picnômetro + Água : M <sub>2</sub>	665,5	665,28	664,67	664,11	686,1	685,67	684,87	684,5
Material Granular: Mg	53,29	53,29	53,29	53,29	49,4	49,4	49,4	49,4
Massa específica da água: g/cm <sup>3</sup>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Massa específica do material granular: g/cm <sup>3</sup>	1,650	1,637	1,642	1,638	1,705	1,699	1,702	1,689
Massa específica média das faixas: g/cm <sup>3</sup>	1,642				1,699			
Massa específica média do material: g/cm <sup>3</sup>	1,670							

Dados referentes a determinação da massa específica do Carvão Betuminoso

Determinação	Faixa granulom.: 0,71 - 0,84 mm				Faixa granulom.: 1,68 - 2,00 mm			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Picnômetro n°	7	7	7	7	8	8	8	8
Picnômetro + Material Granular + Água : M <sub>1</sub>	687,44	686,82	686,10	685,52	692,97	692,24	691,68	691,01
Temperatura do ensaio: °C	18,0	22,5	26,0	28,0	14,5	19,0	24,0	29,0
Picnômetro + Água : M <sub>2</sub>	665,5	664,69	664,33	663,89	673,06	672,81	672,19	671,44
Material Granular: Mg	60,08	60,08	60,08	60,08	51,24	51,24	51,24	51,24
Massa específica da água: g/cm <sup>3</sup>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Massa específica do material granular: g/cm <sup>3</sup>	1,575	1,583	1,568	1,563	1,635	1,611	1,614	1,618
Massa específica média das faixas: g/cm <sup>3</sup>	1,572				1,620			
Massa específica média do material: g/cm <sup>3</sup>	1,596							

**QUADRO A2 - Determinação do diâmetro volumétrico médio**

Determinação do diâmetro volumétrico médio para cada faixa granulométrica de Carvão Antracitoso (amostra 2)

Faixa (mm)	Nº de grãos	Massa de grãos (g)	Massa unitária (g)	dvi (mm)
0,59 - 0,71	485	0,11826	0,00024	0,653
0,71 - 0,84	463	0,17958	0,00039	0,763
0,84 - 1,00	299	0,22575	0,00076	0,952
1,00 - 1,19	198	0,25891	0,00131	1,144
1,19 - 1,41	187	0,29951	0,00160	1,224
1,41 - 1,68	250	0,77328	0,00309	1,524
1,68 - 2,00	188	0,90037	0,00479	1,763
2,00 - 2,40	285	2,54779	0,00894	2,170

massa específica do carvão antracitoso (amostra 2) = 1,670 g/cm<sup>3</sup>

Determinação do diâmetro volumétrico médio para cada faixa granulométrica de Carvão Betuminoso

Faixa (mm)	Nº de grãos	Massa de grãos (g)	Massa unitária (g)	dvi (mm)
0,59 - 0,71	336	0,06915	0,00021	0,627
0,71 - 0,84	320	0,11856	0,00037	0,763
0,84 - 1,00	216	0,10347	0,00048	0,831
1,00 - 1,19	236	0,22772	0,00096	1,049
1,19 - 1,41	305	0,60560	0,00199	1,334
1,41 - 1,68	175	0,50551	0,00289	1,512
1,68 - 2,00	598	3,08685	0,00516	1,835
2,00 - 2,40	100	0,89269	0,00893	2,202

massa específica do carvão betuminoso = 1,596 g/cm<sup>3</sup>

**QUADRO A3 - Determinação do diâmetro equivalente do meio granular estratificado**

**Material: Carvão Antracitoso (amostra 1)**

**Antes das Simulações de Lavagem - Natural**

Peneira (mm)	Di (mm)	Xi	Xi/Di
0,21	0,229	0,0004	0,0016
0,25	0,274	0,0008	0,0030
0,30	0,324	0,0001	0,0004
0,35	0,383	0,0011	0,0029
0,42	0,498	0,0010	0,0020
0,59	0,647	0,0128	0,0197
0,71	0,772	0,0041	0,0053
0,84	0,917	0,0904	0,0986
1,00	1,091	0,2200	0,2017
1,19	1,295	0,1553	0,1199
1,41	1,539	0,1488	0,0967
1,68	1,833	0,2374	0,1295
2,00	2,191	0,1256	0,0573
2,40		0,9979	0,7387

$$Deq = 1,354 \text{ mm}$$

**Método de Lavagem: Água - Intermittente**

Peneira (mm)	Di (mm)	Xi	Xi/Di
0,21	0,229	0,0001	0,0005
0,25	0,274	0,0003	0,0011
0,30	0,324	0,0001	0,0003
0,35	0,383	0,0009	0,0024
0,42	0,498	0,0021	0,0042
0,59	0,647	0,0129	0,0199
0,71	0,772	0,0068	0,0088
0,84	0,917	0,1071	0,1168
1,00	1,091	0,2123	0,1946
1,19	1,295	0,1618	0,1249
1,41	1,539	0,1610	0,1046
1,68	1,833	0,2442	0,1332
2,00	2,191	0,0892	0,0407
2,40		0,9986	0,7518

$$Deq = 1,330 \text{ mm}$$

**QUADRO A4 - Determinação do diâmetro equivalente do meio granular estratificado**

**Material: Carvão Antracitoso (amostra 1)**

**Método de Lavagem: Ar e Água - Intermittente**

Peneira (mm)	Di (mm)	Xi	Xi/Di
0,21	0,229	0,00007	0,0003
0,25	0,274	0,00023	0,0009
0,30	0,324	0,00006	0,0002
0,35	0,383	0,00086	0,0023
0,42	0,498	0,00246	0,0049
0,59	0,647	0,01583	0,0245
0,71	0,772	0,00511	0,0066
0,84	0,917	0,14346	0,1565
1,00	1,091	0,23418	0,2147
1,19	1,295	0,15532	0,1199
1,41	1,539	0,16204	0,1053
1,68	1,833	0,22266	0,1215
2,00	2,191	0,05731	0,0262
2,40		0,99961	0,7837

$$Deq = 1,276 \text{ mm}$$

**Método de Lavagem: Água - Contínua**

Peneira (mm)	Di (mm)	Xi	Xi/Di
0,21	0,229	0,0002	0,0008
0,25	0,274	0,0004	0,0015
0,30	0,324	0,0001	0,0003
0,35	0,383	0,0008	0,0022
0,42	0,498	0,0012	0,0024
0,59	0,647	0,0134	0,0207
0,71	0,772	0,0057	0,0074
0,84	0,917	0,1281	0,1397
1,00	1,091	0,2425	0,2223
1,19	1,295	0,1620	0,1250
1,41	1,539	0,1691	0,1099
1,68	1,833	0,2095	0,1143
2,00	2,191	0,0661	0,0302
2,40		0,9990	0,7767

$$Deq = 1,288 \text{ mm}$$

**QUADRO A5 - Determinação do diâmetro equivalente do meio granular estratificado**

**Material: Carvão Antracitoso (amostra 1)**

**Método de Lavagem: Ar e Água - Contínua**

Peneira (mm)	Di (mm)	Xi	Xi/Di
0,21	0,229	0,0001	0,0006
0,25	0,274	0,0004	0,0014
0,30	0,324	0,0001	0,0004
0,35	0,383	0,0013	0,0035
0,42	0,498	0,0028	0,0057
0,59	0,647	0,0170	0,0262
0,71	0,772	0,0048	0,0063
0,84	0,917	0,1125	0,1227
1,00	1,091	0,2437	0,2234
1,19	1,295	0,1705	0,1316
1,41	1,539	0,1722	0,1119
1,68	1,833	0,2060	0,1124
2,00	2,191	0,0681	0,0311
2,40		0,9995	0,7771

**Deq = 1,287 mm**

**Material: Carvão Antracitoso (amostra 2)**

**Antes das Simulações de Lavagem - Natural**

Peneira (mm)	Di (mm)	Xi	Xi/Di
0,59	0,647	0,0200	0,0309
0,71	0,772	0,0350	0,0453
0,84	0,917	0,0450	0,0491
1,00	1,091	0,1500	0,1375
1,19	1,295	0,2100	0,1621
1,41	1,539	0,3100	0,2014
1,68	1,833	0,1600	0,0873
2,00	2,191	0,0700	0,0320
2,40		1,0000	0,7456

**Deq = 1,341 mm**

**QUADRO A6 - Determinação do diâmetro equivalente do meio granular estratificado**

Material: Carvão Antracitoso (amostra 2)

Método de Lavagem: Água - Intermitente

Peneira (mm)	Di (mm)	Xi	Xi/Di
0,21	0,229	0,00004	0,0002
0,25	0,274	0,00021	0,0008
0,30	0,324	0,00007	0,0002
0,35	0,383	0,00066	0,0017
0,42	0,498	0,01453	0,0292
0,59	0,647	0,04076	0,0630
0,71	0,772	0,00620	0,0080
0,84	0,917	0,05364	0,0585
1,00	1,091	0,23902	0,2191
1,19	1,295	0,29779	0,2299
1,41	1,539	0,19150	0,1244
1,68	1,833	0,12686	0,0692
2,00	2,191	0,02851	0,0130
2,40		0,99981	0,8173

$$D_{eq} = 1,224 \text{ mm}$$

Método de Lavagem: Ar e Água - Intermitente

Peneira (mm)	Di (mm)	Xi	Xi/Di
0,21	0,229	0,00001	0,00005
0,25	0,274	0,00004	0,00016
0,30	0,324	0,00001	0,00002
0,35	0,383	0,00014	0,00036
0,42	0,498	0,00140	0,00280
0,59	0,647	0,02643	0,04083
0,71	0,772	0,02155	0,02791
0,84	0,917	0,05212	0,05687
1,00	1,091	0,13127	0,12033
1,19	1,295	0,35365	0,27302
1,41	1,539	0,16716	0,10861
1,68	1,833	0,20967	0,11438
2,00	2,191	0,03656	0,01669
2,40		1,00000	0,76203

$$D_{eq} = 1,312 \text{ mm}$$

**QUADRO A7 - Determinação do diâmetro equivalente do meio granular estratificado**

**Material: Carvão Betuminoso**

**Antes das Simulações de Lavagem - Natural**

Peneira (mm)	Di (mm)	Xi	Xi/Di
0,59	0,647	0,0200	0,0309
0,71	0,772	0,0350	0,0453
0,84	0,917	0,0450	0,0491
1,00	1,091	0,1500	0,1375
1,19	1,295	0,2100	0,1621
1,41	1,539	0,3100	0,2014
1,68	1,833	0,1600	0,0873
2,00	2,191	0,0700	0,0320
2,40		1,0000	0,7456

$$Deq = 1,341 \text{ mm}$$

**Método de Lavagem: Água - Intermitente**

Peneira (mm)	Di (mm)	Xi	Xi/Di
0,21	0,229	0,00003	0,0002
0,25	0,274	0,00014	0,0005
0,30	0,324	0,00002	0,0001
0,35	0,383	0,00038	0,0010
0,42	0,498	0,00416	0,0084
0,59	0,647	0,05080	0,0785
0,71	0,772	0,00534	0,0069
0,84	0,917	0,06765	0,0738
1,00	1,091	0,26912	0,2467
1,19	1,295	0,28663	0,2213
1,41	1,539	0,16748	0,1088
1,68	1,833	0,11190	0,0610
2,00	2,191	0,03603	0,0164
2,40		0,99967	0,8236

$$Deq = 1,214 \text{ mm}$$

**QUADRO A8 - Determinação do diâmetro equivalente do meio granular estratificado**

**Material: Carvão Betuminoso**

**Método de Lavagem: Ar e Agua - Intermittente**

Peneira (mm)	Di (mm)	Xi	Xi/Di
0,21	0,229	0,0001	0,0006
0,25	0,274	0,0006	0,0020
0,30	0,324	0,0003	0,0009
0,35	0,383	0,0027	0,0072
0,42	0,498	0,0171	0,0344
0,59	0,647	0,0695	0,1073
0,71	0,772	0,0139	0,0180
0,84	0,917	0,0851	0,0928
1,00	1,091	0,2415	0,2214
1,19	1,295	0,2185	0,1687
1,41	1,539	0,1764	0,1146
1,68	1,833	0,1311	0,0715
2,00	2,191	0,0429	0,0196
2,40		0,9997	0,8590

$$Deq = 1,164 \text{ mm}$$

## **ANEXO B**

**Quadro B1 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material : Carvão Antracitoso (amostra 2)**

**Faixa Granulométrica: 0,59 - 0,71mm**

Diâmetro Volumétrico Médio (dv):	0,653 mm
Massa específica do material:	1670 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água:	25+/- 1 °C
Massa específica da água:	997,81 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade absoluta da água:	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 19,9 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda Carga (cm)
200	55	11,2
300	82	17,0
400	109	22,8
500	137	28,9
600	164	35,6
700	191	41,8
800	219	48,4
900	246	55,1
1000	273	61,7
1200	328	77,1

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda Carga (m)	Expansão (%)
0,00	0	19,9	0,000	0,0
0,07	27	19,9	0,048	0,0
0,08	33	20,7	0,055	4,0
0,14	56	22,5	0,060	13,1
0,21	83	24,6	0,058	23,6
0,27	106	26,2	0,059	31,7
0,37	147	29,5	0,061	48,2
0,48	187	32,4	0,062	62,8
0,66	260	34,5	0,063	73,4

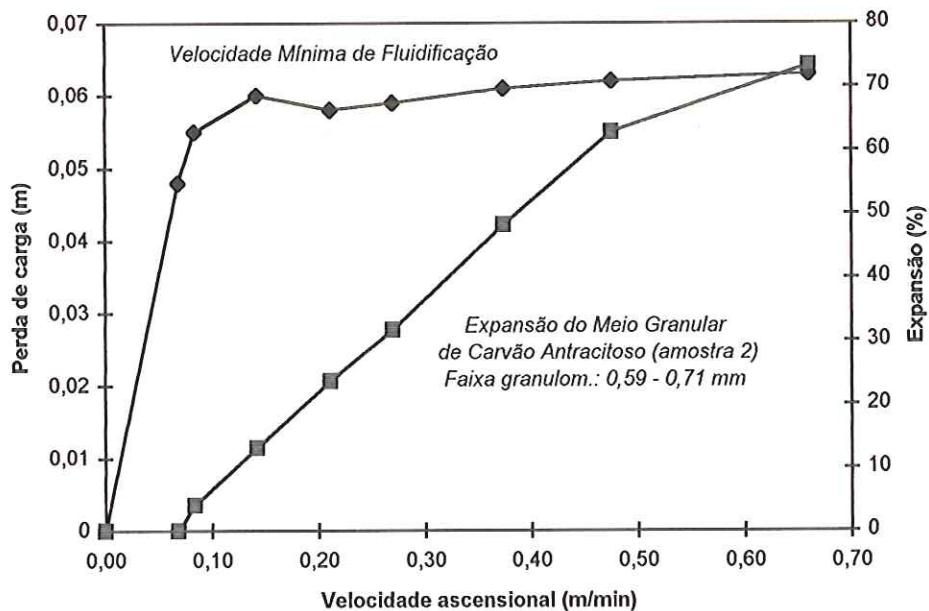


Figura B1 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura B1:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação ( $V_{mf}$ ) = 0,086 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,058 m

Cálculo da  $V_{mf}$  utilizando-se a equação (20):

Número de Galileu ( $G_a$ ) = 2292  
 $V_{mf} = 0,0019 \text{ m/s}$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\varepsilon_o = 0,57$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

Equação Linear:  $Y=a+bX$

$$\begin{aligned} b &= 2297125 \\ a &= 29588 \\ r^2 &= 0,98 \end{aligned}$$

Superfície específica dos grãos ( $S_v$ ) = 24332  $\text{m}^2/\text{m}^3$

Coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

$$\psi_{sub} = 0,38$$

**Quadro B2 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade superficial específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material: Carvão Antracitoso (amostra 2)**

**Faixa Granulométrica: 0,71 - 0,84mm**

<b>Diâmetro Volumétrico Médio (dv):</b>	0,763 mm
<b>Massa específica do material:</b>	1670 kg/m <sup>3</sup>
<b>Temperatura da água:</b>	25+/-1 °C
<b>Massa específica da água:</b>	997,81 kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidade absoluta da água:</b>	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 19,1 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda Carga (cm)
200	55	8,3
300	82	11,9
400	109	15,7
500	137	20,6
600	164	25,2
700	191	29,8
800	219	34,4
1000	273	44,1
1200	328	55,0
1400	383	67,1
1600	437	78,7

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda Carga (m)	E (%)
0,00	0	19,1	0,0	0,0
0,09	34	19,1	0,043	0,0
0,12	49	19,8	0,058	3,7
0,16	62	20,5	0,058	7,3
0,21	83	22,0	0,058	15,2
0,26	102	23,0	0,059	20,4
0,39	155	26,1	0,060	36,6
0,54	213	29,3	0,060	53,4
0,72	284	34,5	0,059	80,6
0,83	326	37,0	0,063	93,7

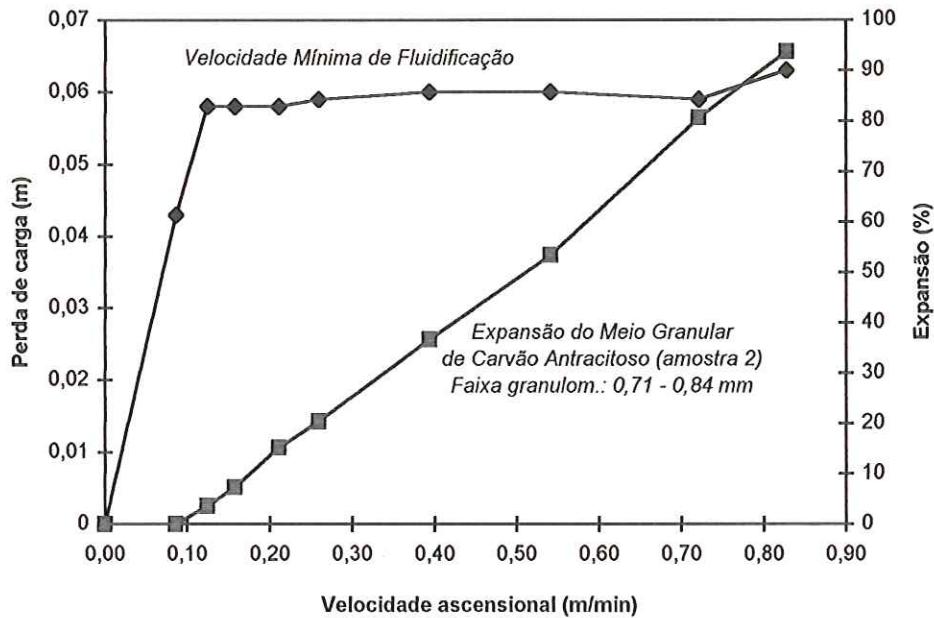


Figura B2 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura B2:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação (Vm<sub>f</sub>) = 0,12 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,058 m

Cálculo da V<sub>m</sub>f utilizando-se a equação (20):

Número de Galileu (G<sub>a</sub>) = 3657

V<sub>m</sub>f = 0,00252 m/s

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\mathcal{E}_o = 0,55$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

Equação Linear: Y=a+bX

b= 1680532

a= 25678

r<sup>2</sup>= 0,92

Superfície específica dos grãos (S<sub>v</sub>) = 19265 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

Coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

$\psi_{sub}$  = 0,41

**Quadro B3 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade superficial específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

Material: Carvão Antracítoso (amostra 2)

Faixa Granulométrica: 0,84 - 1,00mm

Diâmetro Volumétrico Médio (dv):	0,952 mm
Massa específica do material:	1670 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água:	25+/-1 °C
Massa específica da água:	997,81 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade absoluta da água:	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 20,4 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda Carga (cm)
200	55	5,5
300	82	8,5
400	109	11,6
500	137	14,8
600	164	18,3
700	191	22,4
800	219	26,0
900	246	29,3
1000	273	33,3
1200	328	41,4
1400	383	49,9
1600	437	59,5
1800	492	68,4

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda Carga (m)	E (%)
0,00	0	20,4	0,0	0,0
0,11	43	20,4	0,042	0,0
0,15	59	20,4	0,057	0,0
0,20	80	21,0	0,070	2,9
0,26	102	22,1	0,071	8,3
0,31	124	23,1	0,072	13,2
0,37	145	23,8	0,072	16,7
0,46	183	25,4	0,073	24,5
0,61	240	27,8	0,074	36,3
0,91	357	33,3	0,076	63,2
1,17	460	38,0	0,076	86,3

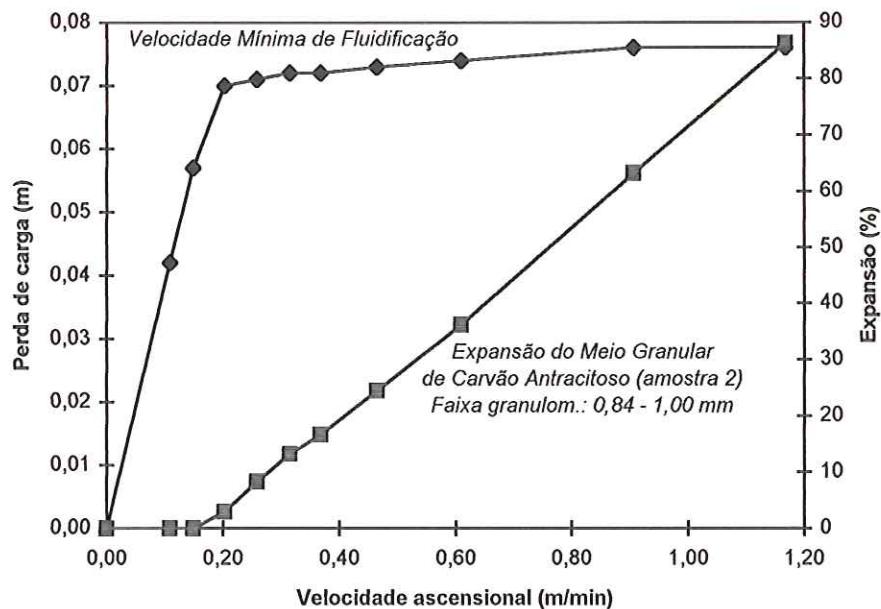


Figura B3 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura B3:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação ( $V_{mf}$ ) = 0,19 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,071 m

Cálculo da  $V_{mf}$  utilizando-se a equação (20):

Número de Galileu ( $G_a$ ) = 7103  
 $V_{mf} = 0,00382 \text{ m/s}$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,48$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

Equação Linear:  $Y=a+bX$   
 $b=1100716$   
 $a=23627$   
 $r^2=0,99$

Superfície específica dos grãos ( $S_v$ ) = 11248  $\text{m}^2/\text{m}^3$

Coeficiente de esfericidade da subcamada:

$$\psi_{sub} = 0,56$$

**Quadro B4 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material: Carvão Antracitoso (amostra 2)**

**Faixa Granulométrica: 1,00 - 1,19mm**

Diâmetro Volumétrico Médio (dv):	1,144 mm
Massa específica do material:	1670 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água:	25+-1 °C
Massa específica da água:	997,81 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade absoluta da água:	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 19,4 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda Carga (cm)
200	55	3,0
300	82	4,9
400	109	6,7
500	137	8,9
600	164	11,1
700	191	12,9
800	219	15,3
900	246	17,4
1000	273	20,0
1200	328	25,0
1400	383	30,4
1600	437	36,5
1800	492	42,7
2000	547	48,9

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda Carga (m)	E (%)
0,00	0	19,4	0,0	0,0
0,13	52	19,4	0,03	0,0
0,19	73	19,4	0,045	0,0
0,23	90	19,4	0,057	0,0
0,29	113	19,7	0,067	1,5
0,35	136	20,3	0,069	4,6
0,39	155	21,0	0,071	8,2
0,44	175	21,6	0,068	11,3
0,50	198	22,4	0,069	15,5
0,60	236	23,5	0,071	21,1
0,72	284	24,6	0,072	26,8
0,80	315	25,8	0,073	33,0
0,91	359	27,0	0,072	39,2
1,02	402	28,5	0,073	46,9
1,11	436	30,0	0,073	54,6
1,24	488	31,5	0,073	62,4
1,42	558	33,8	0,073	74,2
1,51	594	37,0	0,075	90,7

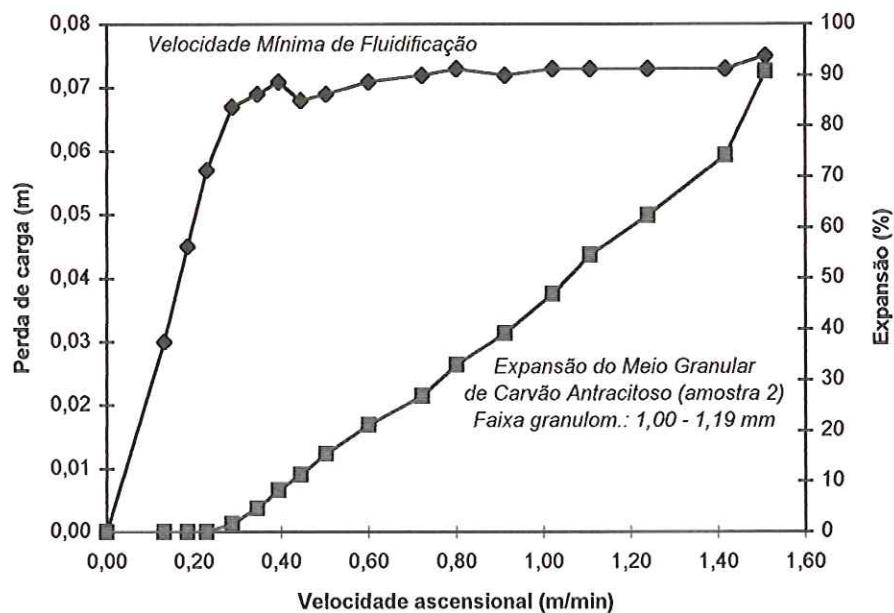


Figura B4 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura B4:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação (Vmf) = 0,29 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,069 m

Cálculo da Vmf utilizando-se a equação (20):

Número de Galileu (Ga) = 12326  
 $V_{mf} = 0,00531 \text{ m/s}$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,47$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

Equação Linear:  $Y=a+bX$

$$\begin{aligned} b &= 650335 \\ a &= 18500 \\ r^2 &= 0,98 \end{aligned}$$

Superfície específica dos grãos (Sv) = 8048  $\text{m}^2/\text{m}^3$

Coeficiente de esfericidade da subcamada:

$$\psi_{sub} = 0,65$$



**Quadro B5 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

Material: Carvão Antracitoso (amostra 2)

Faixa Granulométrica: 1,19 - 1,41mm

Diâmetro Volumétrico Médio (dv):	1,224 mm
Massa específica do material:	1670 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água:	25+/- 1 °C
Massa específica da água:	997,81 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade absoluta da água:	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 20,8 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda Carga (cm)
200	55	3,0
300	82	4,4
400	109	6,0
500	137	7,8
600	164	9,5
700	191	11,8
800	219	13,3
900	246	15,7
1000	273	17,8
1200	328	22,8
1400	383	27,7
1600	437	33,6
1800	492	39,3

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc. asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda Carga (m)	E (%)
0,00	0	20,8	0,0	0,0
0,09	37	20,8	0,018	0,0
0,15	61	20,8	0,03	0,0
0,22	88	20,8	0,047	0,0
0,29	115	20,9	0,062	0,5
0,32	127	21,0	0,069	1,0
0,35	139	21,1	0,073	1,4
0,38	150	21,4	0,075	2,9
0,44	172	22,0	0,075	5,8
0,50	196	22,7	0,076	9,1
0,52	204	23,1	0,076	11,1
0,59	232	23,8	0,075	14,4
0,63	248	24,3	0,074	16,8
0,74	290	25,6	0,075	23,1
0,81	320	26,5	0,076	27,4
0,87	344	27,2	0,074	30,8

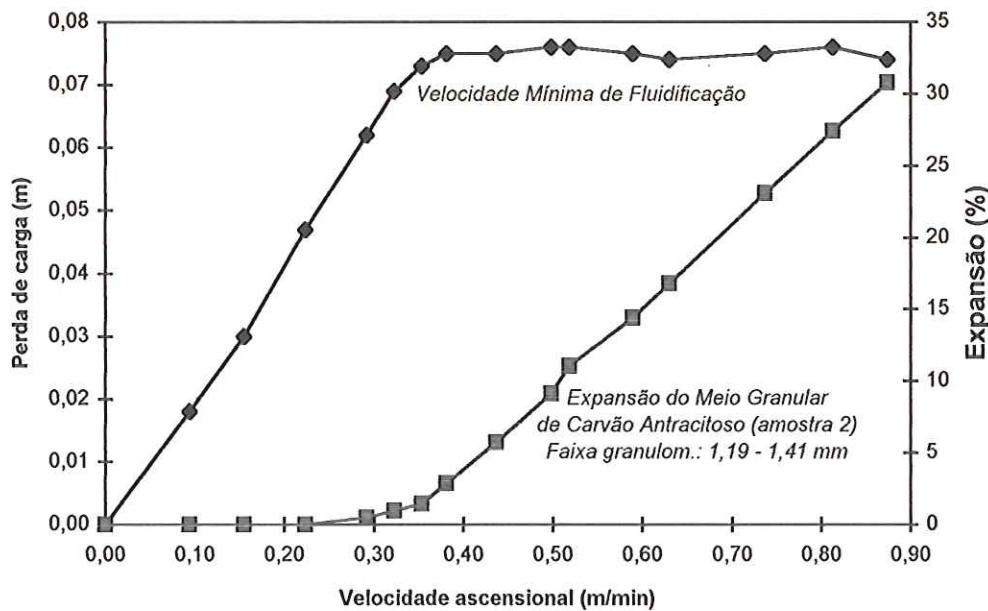


Figura B5 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura B5:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação ( $V_{mf}$ ) = 0,35 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,075 m

Cálculo da  $V_{mf}$  utilizando-se a equação (20):

$$\text{Número de Galileu (Ga)} = 15097$$

$$V_{mf} = 0,00597 \text{ m/s}$$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,47$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

$$\text{Equação Linear: } Y=a+bX$$

$$b= 542201$$

$$a= 16325$$

$$r^2= 0,98$$

Superfície específica dos grãos ( $S_v$ ) = 7207  $\text{m}^2/\text{m}^3$

Coeficiente de esfericidade da subcamada:

$$\psi_{sub} = 0,68$$

**Quadro B6 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

Material: Carvão Antracitoso (amostra 2)

Faixa Granulométrica: 1,41 - 1,68mm

Diâmetro Volumétrico Médio (dv):	1,524 mm
Massa específica do material:	1670 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água:	25+/-1 °C
Massa específica da água:	997,81 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade absoluta da água:	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

- i) Altura da camada: 19,8 cm  
ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda Carga (cm)
200	55	2,2
300	82	3,4
400	109	4,8
500	137	6,2
600	164	7,6
700	191	9,2
800	219	10,9
900	246	12,5
1000	273	14,7
1200	328	18,5
1400	383	22,6
1600	437	27,1
1800	492	31,0
2000	547	37,9

- iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc. asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda Carga (m)	E (%)
0,00	0	19,8	0,0	0,0
0,11	43	19,8	0,018	0,0
0,18	69	19,8	0,029	0,0
0,25	100	19,8	0,045	0,0
0,35	136	19,8	0,059	0,0
0,42	167	20,0	0,07	1,0
0,52	206	21,0	0,077	6,1
0,62	244	22,0	0,076	11,1
0,76	299	23,8	0,074	20,2
0,91	360	25,0	0,076	26,3
1,09	428	26,5	0,077	33,8
1,35	530	29,0	0,076	46,5
1,45	569	31,0	0,077	56,6
1,58	621	32,0	0,078	61,6

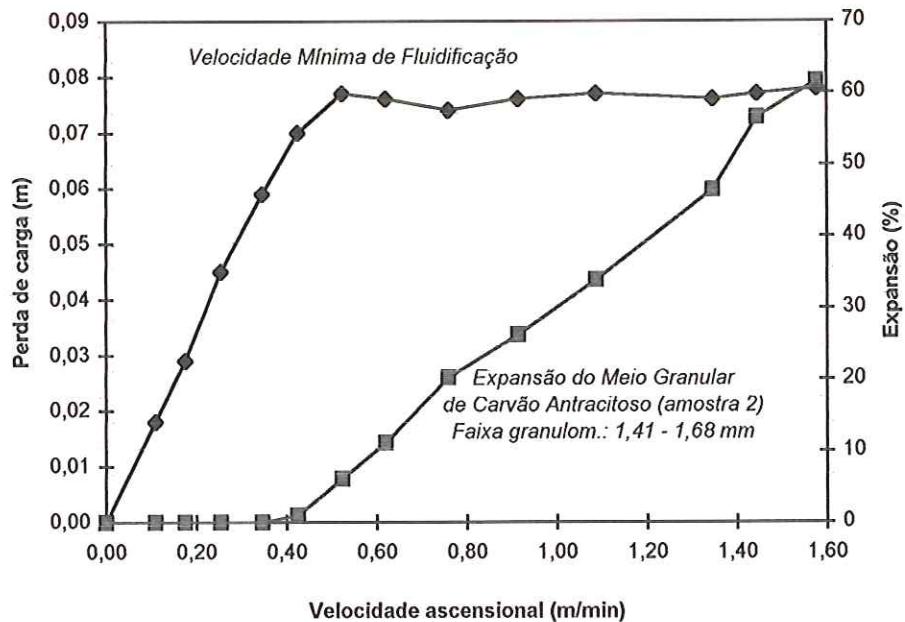


Figura B6 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura B6:

$$1) \text{Velocidade Mínima de Fluidificação (Vmf)} = 0,47 \text{ m/min}$$

$$2) \text{Perda de Carga no Meio Fluidificado} = 0,075 \text{ m}$$

Cálculo da Vmf utilizando-se a equação (20):

$$\begin{aligned} \text{Número de Galileu (Ga)} &= 29140 \\ Vmf &= 0,00853 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\mathcal{E}_o = 0,44$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

Equação Linear:  $Y=a+bX$

$$b= 542201$$

$$a= 16325$$

$$r^2= 0,98$$

$$\text{Superfície específica dos grãos (Sv)} = 6282 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

Coeficiente de esfericidade da subcamada:

$$\psi_{sub} = 0,63$$

**Quadro B7 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

Material: Carvão Antracitoso (amostra 2)

Faixa Granulométrica: 1,68 - 2,00mm

Diâmetro Volumétrico Médio (dv):	1,763 mm
Massa específica do material:	1670 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água:	25+/- 1 °C
Massa específica da água:	997,81 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade absoluta da água:	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 21,2 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda Carga (cm)
200	55	2,2
300	82	3,8
400	109	5,5
500	137	7,1
600	164	8,7
700	191	10,4
800	219	12,2
900	246	14,4
1000	273	16,2
1200	328	20,6
1400	383	24,6
1600	437	29,2
1800	492	33,2
2000	547	39,0

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc. asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda Carga (m)	E (%)
0,00	0	21,2	0,0	0,0
0,12	48	21,2	0,019	0,0
0,19	73	21,2	0,031	0,0
0,23	92	21,2	0,039	0,0
0,29	113	21,2	0,049	0,0
0,34	135	21,3	0,059	0,5
0,37	146	21,4	0,062	0,9
0,42	165	21,6	0,069	1,9
0,47	184	21,9	0,077	3,3
0,54	214	22,7	0,073	7,1
0,60	235	23,0	0,075	8,5
0,71	280	24,0	0,080	13,2
0,83	325	25,0	0,080	17,9
1,09	431	27,0	0,081	27,4
1,24	487	28,7	0,081	35,4
1,37	541	30,0	0,080	41,5
1,61	634	33,0	0,082	55,7

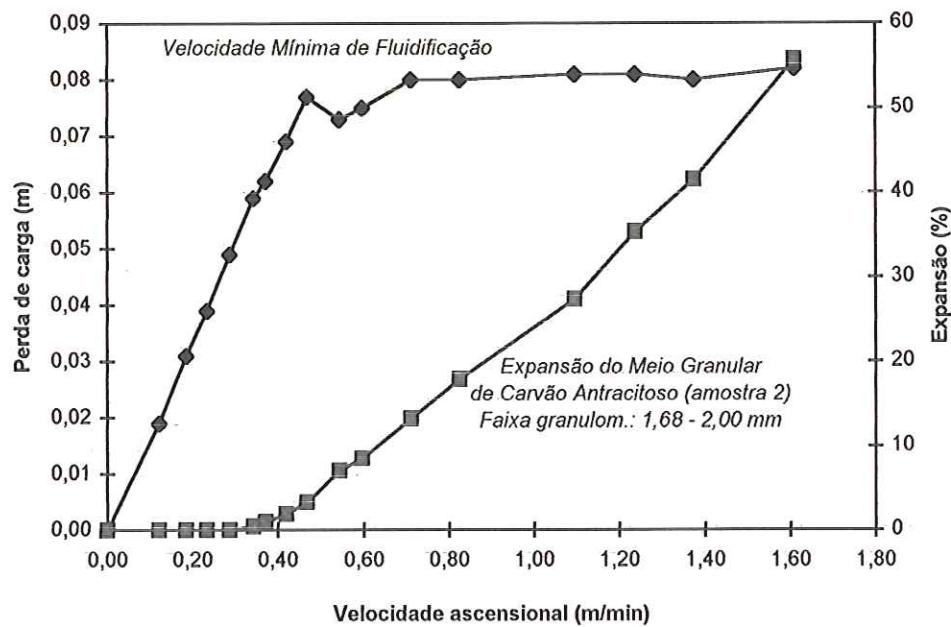


Figura B7 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura B7:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação ( $V_{mf}$ ) = 0,48 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,080 m

Cálculo da  $V_{mf}$  utilizando-se a equação (20):

Número de Galileu (Ga) = 45112  
 $V_{mf} = 0,01060 \text{ m/s}$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,44$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

Equação Linear:  $Y=a+bX$

$$\begin{aligned} b &= 469237 \\ a &= 14039 \\ r^2 &= 0,94 \end{aligned}$$

Superfície específica dos grãos ( $S_v$ ) = 5946  $\text{m}^2/\text{m}^3$

Coeficiente de esfericidade da subcamada:

$$\psi_{sub} = 0,57$$

**Quadro B8 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material: Carvão Antracitoso (amostra 2)**

**Faixa Granulométrica: 2,00 - 2,40mm**

<b>Diâmetro Volumétrico Médio (dv):</b>	2,170 mm
<b>Massa específica do material:</b>	1670 kg/m <sup>3</sup>
<b>Temperatura da água:</b>	25 +/- 1 °C
<b>Massa específica da água:</b>	997,81 kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidade absoluta da água:</b>	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 20,3 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda Carga (cm)
200	55	1,3
300	82	2,0
400	109	2,9
500	137	3,9
600	164	4,9
700	191	6,0
800	219	7,0
900	246	8,2
1000	273	9,6
1200	328	12,0
1400	383	15,2
1600	437	18,2
1800	492	21,7
2000	547	25,0

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda Carga (m)	E (%)
0,00	0	20,3	0,0	0,0
0,09	37	20,3	0,008	0,0
0,14	55	20,3	0,014	0,0
0,23	90	20,3	0,024	0,0
0,31	123	20,3	0,035	0,0
0,40	158	20,3	0,047	0,0
0,49	192	20,4	0,059	0,5
0,59	234	20,6	0,070	1,5
0,70	276	21,4	0,075	5,4
0,82	322	22,1	0,075	8,9
0,89	349	22,7	0,073	11,8
0,94	369	23,2	0,074	14,3
1,03	404	24,2	0,074	19,2
1,23	485	25,3	0,076	24,6
1,35	530	26,8	0,074	32,0

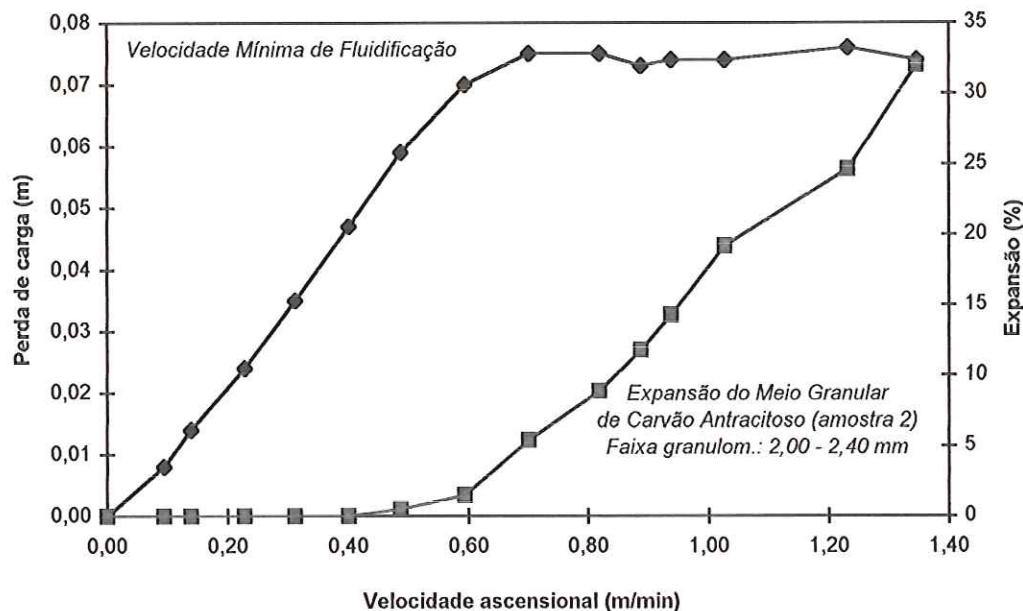


Figura B8 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura B8:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação ( $V_{mf}$ ) = 0,65 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,074 m

Cálculo da  $V_{mf}$  utilizando-se a equação (20):

Número de Galileu ( $G_a$ ) = 84123  
 $V_{mf} = 0,01399 \text{ m/s}$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,46$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

Equação Linear:  $Y=a+bX$

$$\begin{aligned} b &= 249551 \\ a &= 12172 \\ r^2 &= 0,99 \end{aligned}$$

Superfície específica dos grãos ( $S_v$ ) = 4743  $\text{m}^2/\text{m}^3$

Coeficiente de esfericidade da subcamada:

$$\psi_{sub} = 0,58$$

**Quadro B9 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material: Carvão Betuminoso**

**Faixa Granulométrica: 0,59 - 0,71mm**

Diâmetro Volumétrico Médio (dv):	0,627 mm
Massa específica do material:	1596 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água:	25+/- 1 °C
Massa específica da água:	997,81 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade absoluta da água:	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 21,2 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda Carga (cm)
200	55	12,3
300	82	18,7
400	109	26,4
500	137	33,7
600	164	39,4
700	191	47,9
800	219	52,4
1000	273	69,2
1200	328	84,4
1400	383	101,3

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda Carga (m)	E (%)
0,00	0	21,2	0,0	0,0
0,07	27	21,2	0,053	0,0
0,10	39	22,3	0,058	5,2
0,12	49	23,2	0,060	9,4
0,15	60	24,1	0,062	13,7
0,18	69	24,8	0,062	17,0
0,20	79	25,6	0,063	20,8
0,21	83	25,8	0,063	21,7
0,24	95	27,0	0,064	27,4
0,26	103	27,4	0,064	29,2
0,27	107	27,9	0,064	31,6
0,33	128	29,5	0,065	39,2

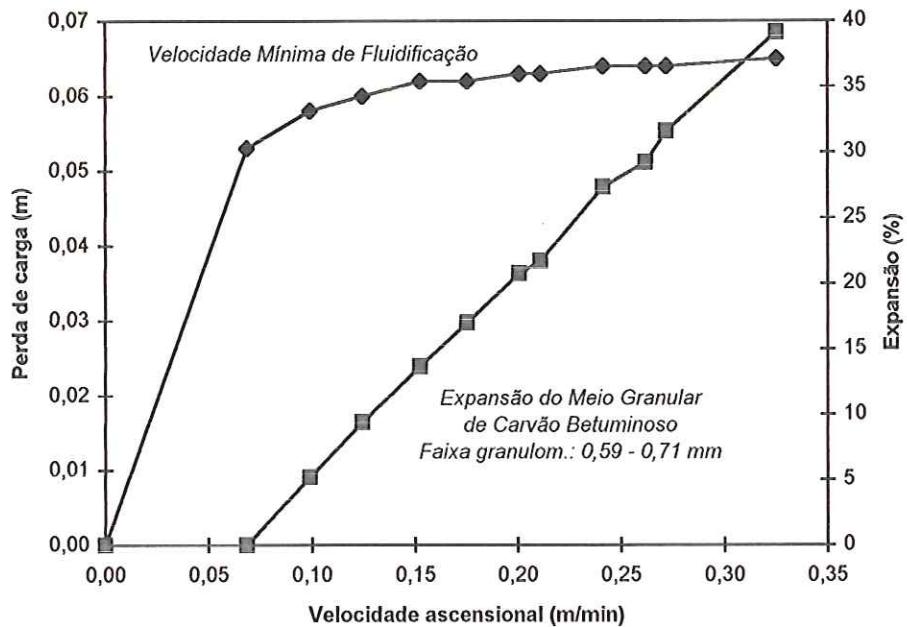


Figura B9 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura B9:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação (Vm<sub>f</sub>) = 0,093 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,060 m

Cálculo da V<sub>mf</sub> utilizando-se a equação (20):

Número de Galileu (G<sub>a</sub>) = 1806  
 $V_{mf} = \frac{1806}{0,00154 \text{ m/s}}$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,53$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

Equação Linear:  $Y=a+bX$

$$b= 2442755$$

$$a= 27103$$

$$r^2= 0,83$$

Superfície específica dos grãos (S<sub>v</sub>) = 20650 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

Coeficiente de esfericidade da subcamada:

$$\psi_{sub} = 0,46$$

**Quadro B10 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material: Carvão Betuminoso**

**Faixa Granulométrica: 0,71 - 0,84mm**

Diâmetro Volumétrico Médio (dv):	0,763 mm
Massa específica do material:	1596 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água:	25+/-1 °C
Massa específica da água:	997,81 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade absoluta da água:	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 19,0 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda Carga (cm)
200	55	8,8
300	82	13,1
400	109	17,5
500	137	22,4
600	164	27,4
700	191	31,8
800	219	37,6
1000	273	47,5
1200	328	57,5
1400	383	70,9
1600	437	82,3
1800	492	96,0

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda Carga (m)	E (%)
0,00	0	19,0	0,0	0,0
0,05	20	19,0	0,030	0,0
0,07	27	19,1	0,038	0,5
0,08	31	19,3	0,044	1,6
0,09	36	19,5	0,048	2,6
0,11	43	20,0	0,051	5,3
0,14	54	20,6	0,053	8,4
0,19	73	21,9	0,055	15,3
0,22	88	23,0	0,054	21,1
0,27	107	23,7	0,055	24,7
0,34	134	25,0	0,056	31,6
0,41	161	26,7	0,057	40,5
0,51	200	29,3	0,057	54,2
0,57	225	31,0	0,057	63,2

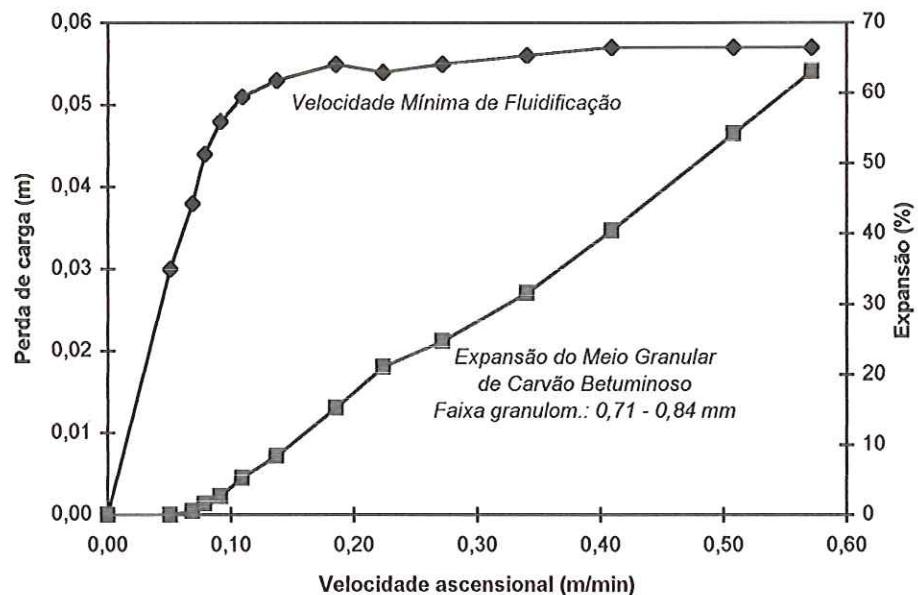


Figura B10 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura B10:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação (Vm<sub>f</sub>) = 0,096 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,053 m

Cálculo da V<sub>mf</sub> utilizando-se a equação (20):

Número de Galileu (G<sub>a</sub>) = 3254  
 $V_{mf} = \frac{3254}{0,00225} \text{ m/s}$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,54$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

Equação Linear: Y=a+bX

$$b = 1860132$$

$$a = 23160$$

$$r^2 = 0,97$$

Superfície específica dos grãos (S<sub>v</sub>) = 19057 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

Coeficiente de esfericidade da subcamada:

$$\psi_{sb} = 0,41$$

**Quadro B11 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material: Carvão Betuminoso**

**Faixa Granulométrica: 0,84 - 1,00mm**

<b>Diâmetro Volumétrico Médio (dv):</b>	0,831 mm
<b>Massa específica do material:</b>	1596 kg/m <sup>3</sup>
<b>Temperatura da água:</b>	25+/- 1 °C
<b>Massa específica da água:</b>	997,81 kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidade absoluta da água:</b>	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 20,0 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda Carga (cm)
200	55	6,6
300	82	9,6
400	109	13,4
500	137	16,9
600	164	20,9
700	191	24,9
800	219	28,7
1000	273	38,1
1200	328	46,3
1400	383	58,1
1600	437	69,0
1800	492	80,1
2000	547	91,3

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda Carga (m)	E (%)
0,00	0	20,0	0,0	0,0
0,11	44	20,0	0,045	0,0
0,12	49	20,7	0,051	3,5
0,13	53	20,9	0,051	4,5
0,17	68	21,5	0,055	7,5
0,23	90	22,8	0,057	14,0
0,28	109	24,0	0,059	20,0
0,36	142	26,8	0,059	34,0
0,44	175	29,5	0,059	47,5
0,54	213	32,5	0,059	62,5

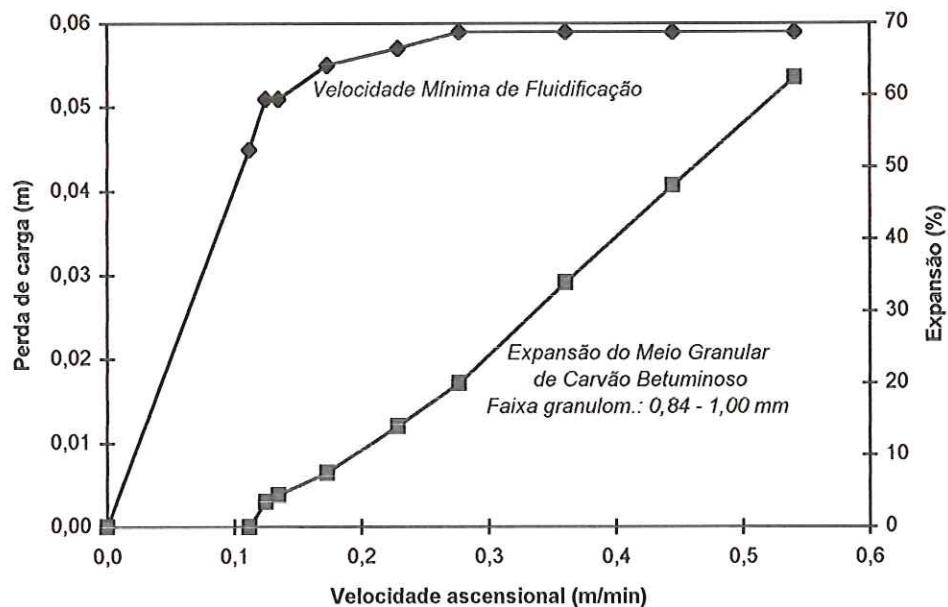


Figura B11 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura B11:

$$1) \text{Velocidade Mínima de Fluidificação (Vm)} = 0,14 \text{ m/min}$$

$$2) \text{Perda de Carga no Meio Fluidificado} = 0,056 \text{ m}$$

Cálculo da Vmf utilizando-se a equação (20):

$$\begin{aligned} \text{Número de Galileu (Ga)} &= 4204 \\ \text{Vm} &= 0,00265 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,53$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

Equação Linear:  $Y=a+bX$

$$b= 1276843$$

$$a= 28414$$

$$r^2= 0,99$$

$$\text{Superfície específica dos grãos (Sv)} = 15300 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

Coeficiente de esfericidade da subcamada:

$$\psi_{sb} = 0,47$$

**Quadro B12 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material: Carvão Betuminoso**

**Faixa Granulométrica: 1,00 - 1,19mm**

Diâmetro Volumétrico Médio (dv):	1,049 mm
Massa específica do material:	1596 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água:	25+/- 1 °C
Massa específica da água:	997,81 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade absoluta da água:	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

- i) Altura da camada: 19,4 cm
- ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda Carga (cm)
200	55	4,0
300	82	6,1
400	109	8,5
500	137	10,7
600	164	13,1
700	191	15,4
800	219	17,9
1000	273	23,7
1200	328	29,5
1400	383	35,6
1600	437	42,5
1800	492	49,3
2000	547	57,6

- iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda Carga (m)	E (%)
0,00	0	19,4	0,0	0,0
0,09	36	19,4	0,024	0,0
0,14	55	19,4	0,039	0,0
0,18	72	19,8	0,048	2,1
0,23	92	20,3	0,053	4,6
0,29	114	21,1	0,056	8,8
0,36	143	22,3	0,059	14,9
0,45	177	23,6	0,060	21,6
0,50	198	24,5	0,059	26,3
0,60	236	25,8	0,060	33,0
0,66	259	26,8	0,061	38,1
0,73	288	27,8	0,061	43,3
0,79	312	28,8	0,060	48,5
0,90	353	30,0	0,058	54,6
0,97	380	32,0	0,059	64,9
1,09	431	33,8	0,061	74,2

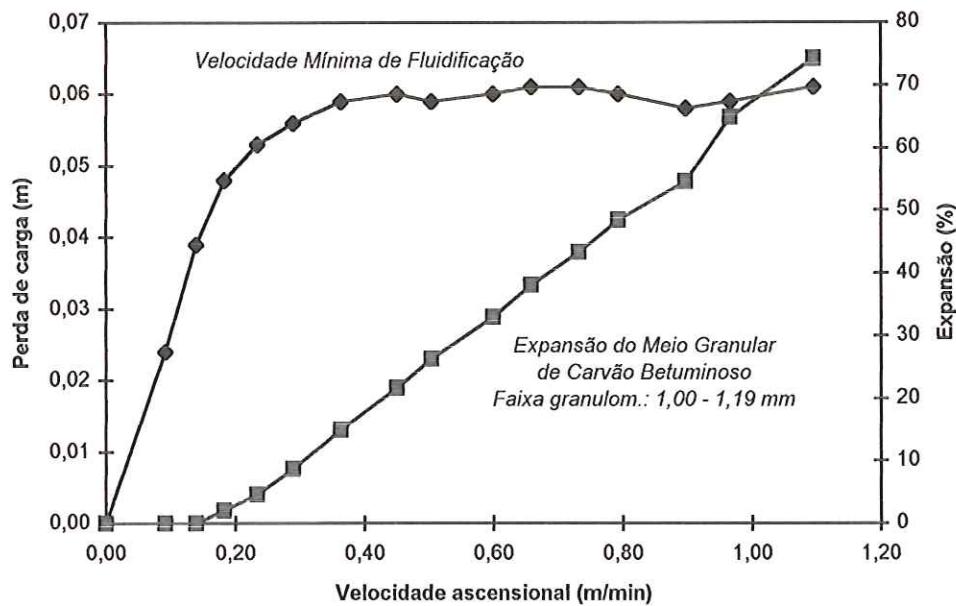


Figura B12 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura B12:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação (Vm<sub>f</sub>) = 0,21 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,057 m

Cálculo da V<sub>mf</sub> utilizando-se a equação (20):

Número de Galileu (G<sub>a</sub>) = 8457  
 V<sub>mf</sub> = 0,00408 m/s

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,51$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

Equação Linear: Y=a+bX

$$b= 825035$$

$$a= 17912$$

$$r^2= 0,99$$

Superfície específica dos grãos (S<sub>v</sub>) = 11167 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

Coeficiente de esfericidade da subcamada:

$$\psi_{sb} = 0,51$$

**Quadro B13 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material: Carvão Betuminoso**

**Faixa Granulométrica: 1,19 - 1,41mm**

Diâmetro Volumétrico Médio (dv):	1,334 mm
Massa específica do material:	1596 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água:	25+/-1 °C
Massa específica da água:	997,81 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade absoluta da água:	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 20,2 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda Carga (cm)
200	55	3,0
300	82	4,5
400	109	6,3
500	137	8,3
600	164	10,3
700	191	12,4
800	219	14,4
1000	273	19,2
1200	328	24,4
1400	383	29,4
1600	437	34,9
1800	492	41,2
2000	547	48,1

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda Carga (m)	E (%)
0,00	0	20,2	0,0	0,0
0,10	38	20,2	0,021	0,0
0,15	60	20,2	0,031	0,0
0,20	80	20,5	0,041	1,5
0,24	95	20,7	0,048	2,5
0,31	121	21,5	0,054	6,4
0,38	151	22,2	0,058	9,9
0,48	188	23,7	0,059	17,3
0,61	241	25,5	0,060	26,2
0,69	272	26,5	0,061	31,2
0,76	300	27,5	0,061	36,1
0,84	331	28,5	0,061	41,1
0,90	355	29,0	0,060	43,6
1,09	428	32,5	0,061	60,9

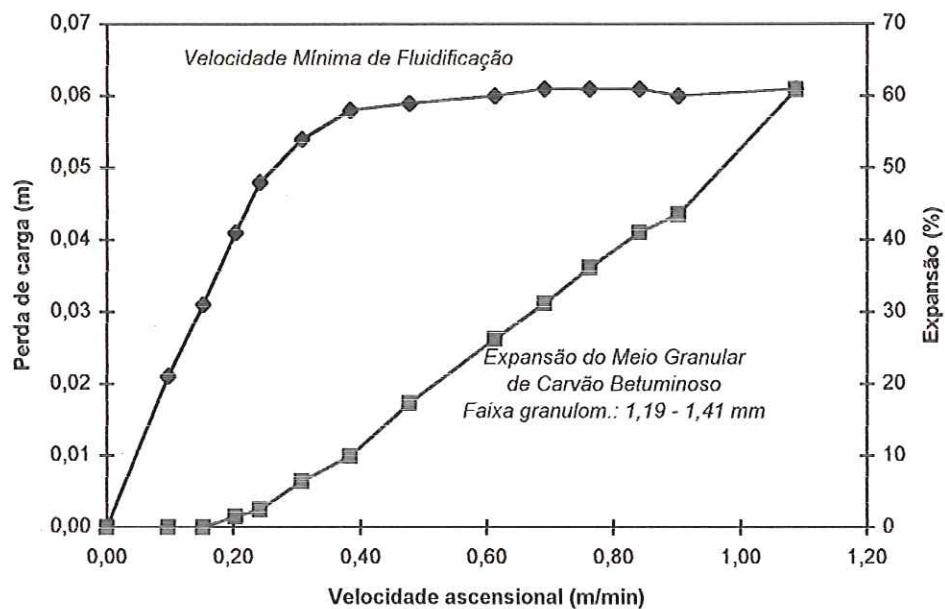


Figura B13 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura B13:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação (Vm<sub>f</sub>) = 0,31 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,059 m

Cálculo da V<sub>m</sub>f utilizando-se a equação (20):

Número de Galileu (G<sub>a</sub>) = 17392  
 V<sub>m</sub>f = 0,00622 m/s

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,52$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

Equação Linear: Y=a+bX

b= 583357

a= 18310

r<sup>2</sup>= 0,99

Superfície específica dos grãos (S<sub>v</sub>) = 9602 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

Coeficiente de esfericidade da subcamada:

$$\psi_{ab} = 0,47$$

**Quadro B14 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

Material: Carvão Betuminoso

Faixa Granulométrica: 1,41 - 1,68mm

Diâmetro Volumétrico Médio (dv):	1,512 mm
Massa específica do material:	1596 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água:	25+/- 1 °C
Massa específica da água:	997,81 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade absoluta da água:	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

- i) Altura da camada: 20,0 cm  
ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda Carga (cm)
200	55	2,3
300	82	3,3
400	109	4,6
500	137	6,1
600	164	7,3
700	191	9,0
800	219	10,6
1000	273	13,9
1200	328	17,8
1400	383	23,1
1600	437	26,7
1800	492	30,9
2000	547	35,9

- iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda Carga (m)	E (%)
0,00	0	20,0	0,0	0,0
0,15	58	20,0	0,022	0,0
0,23	91	20,0	0,035	0,0
0,27	108	20,0	0,043	0,0
0,31	121	20,3	0,047	1,5
0,36	142	20,7	0,051	3,5
0,38	151	20,9	0,053	4,5
0,47	185	21,9	0,056	9,5
0,54	212	22,7	0,057	13,5
0,60	238	23,4	0,057	17,0
0,68	266	24,2	0,055	21,0
0,74	291	25,0	0,059	25,0
0,83	328	26,0	0,059	30,0
0,92	361	26,9	0,058	34,5
1,07	420	29,0	0,060	45,0
1,20	474	30,5	0,060	52,5

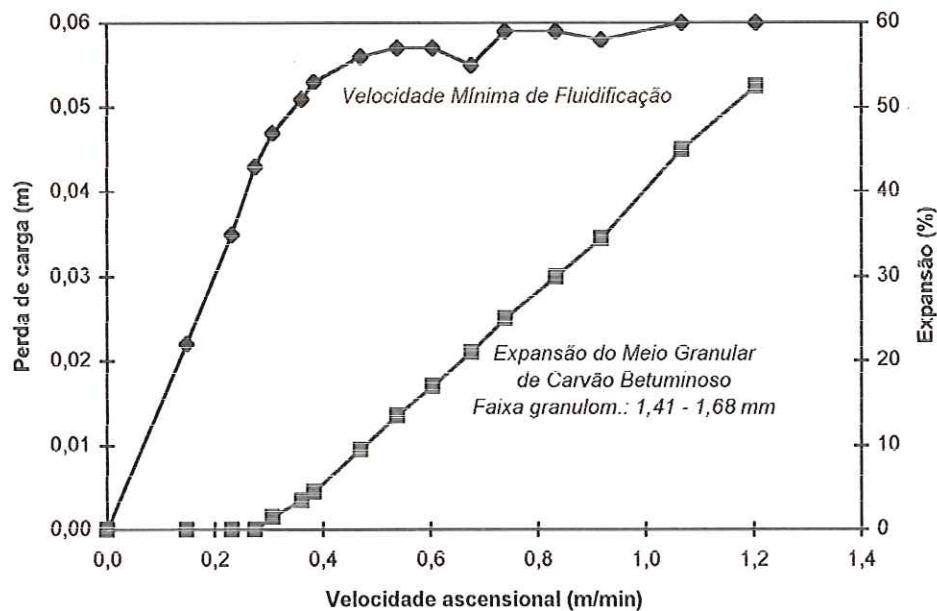


Figura B14 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura B14:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação (Vm<sub>f</sub>) = 0,38 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,056 m

Cálculo da Vmf utilizando-se a equação (20):

Número de Galileu (G<sub>a</sub>) = 25324  
 $V_{mf} = 0,00763 \text{ m/s}$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,54$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

Equação Linear:  $Y=a+bX$

$$b=426120$$

$$a=14741$$

$$r^2=0,98$$

Superfície específica dos grãos (S<sub>v</sub>) = 9066 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

Coeficiente de esfericidade da subcamada:

$$\psi_{ab} = 0,44$$

**Quadro B15 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

Material: Carvão Betuminoso

Faixa Granulométrica: 1,68 - 2,00mm

Diâmetro Volumétrico Médio (dv):	1,835 mm
Massa específica do material:	1596 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água:	25+/-1°C
Massa específica da água:	997,81 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade absoluta da água:	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

- i) Altura da camada: 19,2 cm  
ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda Carga (cm)
200	55	1,6
300	82	2,5
400	109	3,4
500	137	4,4
600	164	5,4
700	191	6,5
800	219	7,7
1000	273	10,4
1200	328	13,5
1400	383	16,4
1600	437	23,8
1800	492	24,6
2000	547	28,2

- iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda Carga (m)	E (%)
0,00	0	19,2	0,0	0,0
0,08	33	19,2	0,007	0,0
0,14	54	19,2	0,014	0,0
0,18	71	19,2	0,019	0,0
0,23	91	19,3	0,025	0,5
0,29	116	19,3	0,032	0,5
0,36	143	19,6	0,040	2,1
0,46	180	20,0	0,049	4,2
0,52	205	20,4	0,050	6,3
0,58	228	20,9	0,052	8,9
0,66	258	21,6	0,053	12,5
0,81	317	22,8	0,055	18,8
0,93	365	24,0	0,053	25,0
1,13	443	25,8	0,056	34,4
1,55	610	31,0	0,059	61,5

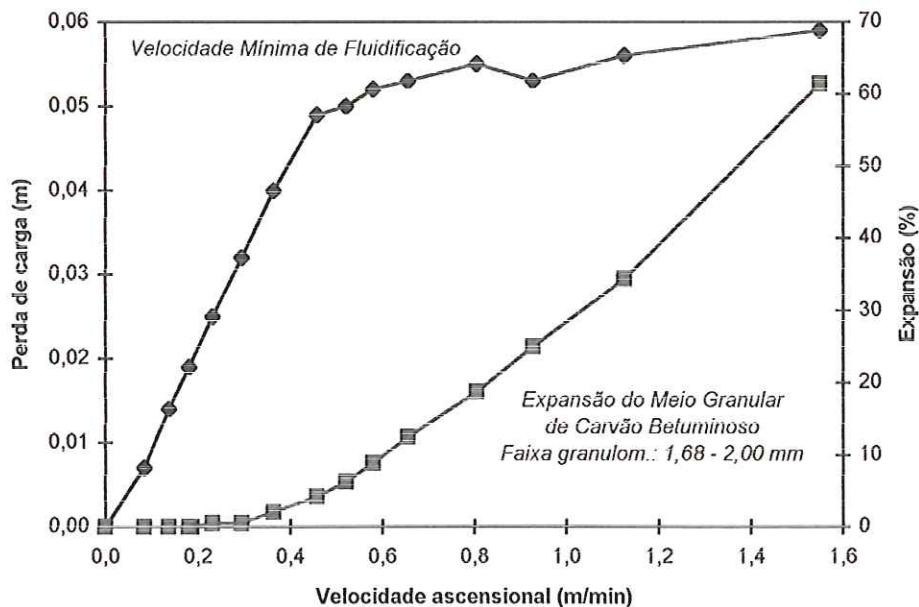


Figura B15 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura B15:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação ( $V_{mf}$ ) = 0,53 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,052 m

Cálculo da  $V_{mf}$  utilizando-se a equação (20):

$$\begin{aligned} \text{Número de Galileu (Ga)} &= 45268 \\ V_{mf} &= 0,01021 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,55$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

Equação Linear:  $Y=a+bX$

$$b = 303407$$

$$a = 14605$$

$$r^2 = 0,93$$

Superfície específica dos grãos ( $S_v$ ) = 8104  $\text{m}^2/\text{m}^3$

Coeficiente de esfericidade da subcamada:

$$\psi_{sb} = 0,40$$

**Quadro B16 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material: Carvão Betuminoso**

**Faixa Granulométrica: 2,00 - 2,40mm**

Diâmetro Volumétrico Médio (dv):	2,202 mm
Massa específica do material:	1596 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água:	25+/- 1 °C
Massa específica da água:	997,81 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade absoluta da água:	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 19,5 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda Carga (cm)
200	55	1,5
300	82	2,2
400	109	3,0
500	137	3,9
600	164	4,8
700	191	5,7
800	219	6,5
900	246	7,7
1000	273	8,8
1200	328	11,4
1400	383	13,8
1600	437	17,1
1800	492	20,1
2000	547	23,1

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda Carga (m)	E (%)
0,00	0	19,5	0,0	0,0
0,12	49	19,5	0,012	0,0
0,25	99	19,5	0,024	0,0
0,39	155	19,5	0,041	0,0
0,51	201	20,0	0,052	2,6
0,61	239	20,5	0,056	5,1
0,74	292	21,5	0,059	10,3
0,91	360	22,8	0,061	16,9
1,04	410	23,9	0,063	22,6
1,10	434	24,4	0,064	25,1
1,25	494	25,5	0,062	30,8
1,39	548	26,8	0,062	37,4

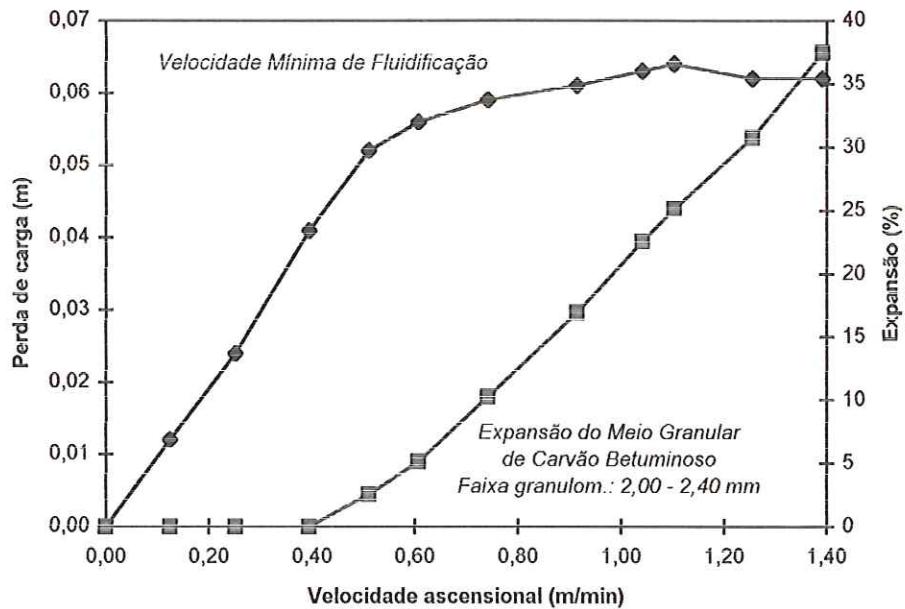


Figura B16 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura B16:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação (Vm<sub>f</sub>) = 0,56 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,058 m

Cálculo da Vmf utilizando-se a equação (20):

Número de Galileu (Ga) = 78223  
 $V_{mf} = 0,01305 \text{ m/s}$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\varepsilon_o = 0,51$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio da subcamada:

Equação Linear:  $Y=a+bX$

$$b= 282832$$

$$a= 9275$$

$$r^2= 0,98$$

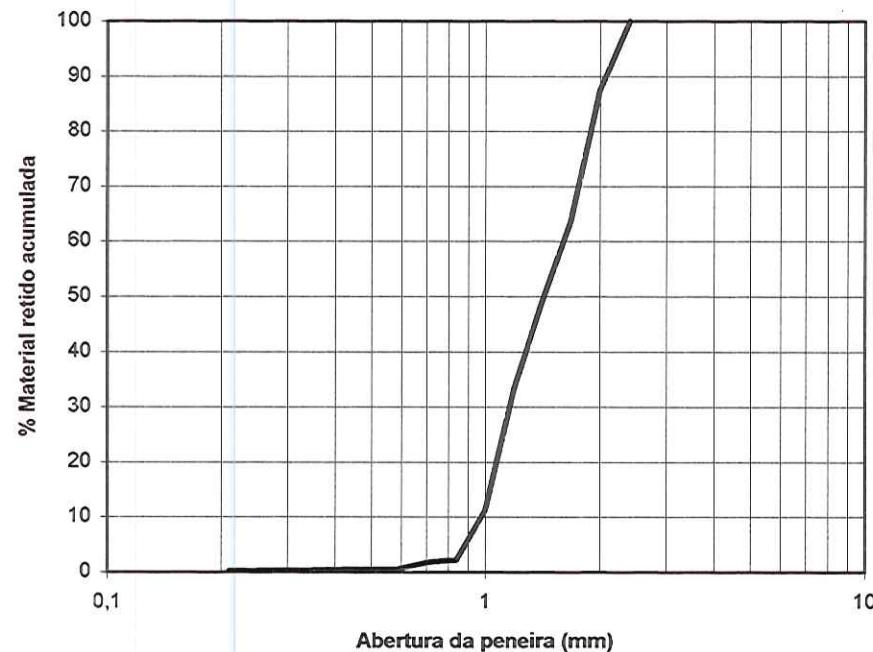
Superfície específica dos grãos (S<sub>v</sub>) = 6387 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

Coeficiente de esfericidade da subcamada:

$$\psi_{st} = 0,43$$

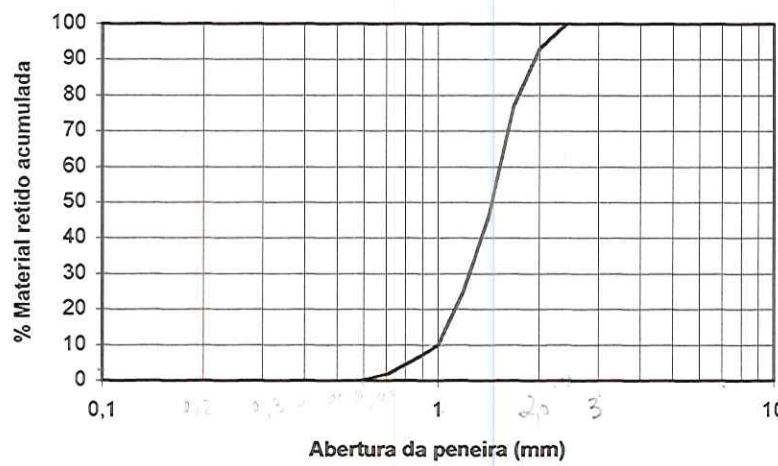
**QUADRO B17 - COMPOSIÇÃO E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CARVÃO ANTRACITOSO (AMOSTRA 1)  
NO ESTADO NATURAL**

Faixa Granulométrica (mm)	Massa (g)	% Material Retido	% Material Retido Acumulada
fundo - 0,21	2,14	0,21	0,21
0,21 - 0,25	0,38	0,04	0,25
0,25 - 0,30	0,83	0,08	0,33
0,30 - 0,35	0,12	0,01	0,35
0,35 - 0,42	1,11	0,11	0,46
0,42 - 0,59	1,02	0,10	0,56
0,59 - 0,71	12,75	1,28	1,84
0,71 - 0,84	4,10	0,41	2,25
0,84 - 1,00	90,39	9,04	11,28
1,00 - 1,19	220,00	22,00	33,28
1,19 - 1,41	155,33	15,53	48,82
1,41 - 1,68	148,82	14,88	63,70
1,68 - 2,00	237,37	23,74	87,44
2,00 - 2,40	125,64	12,56	100,00
Total	1000,00	100,00	



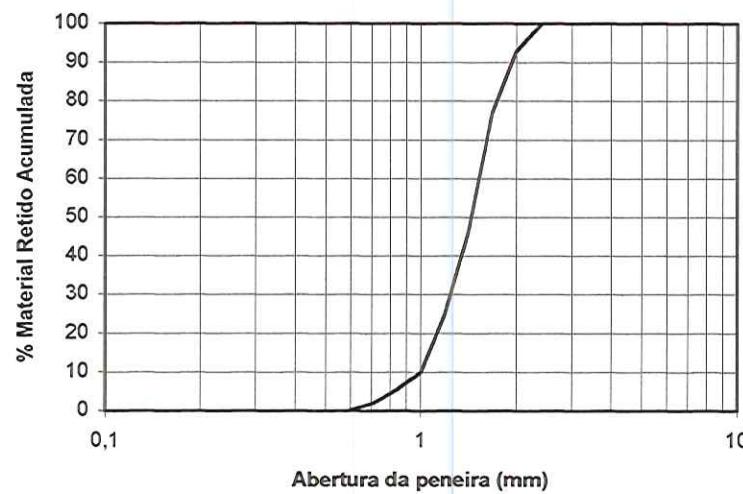
QUADRO B18 - COMPOSIÇÃO E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA  
DO CARVÃO ANTRACITOSO (AMOSTRA 2) NO ESTADO NATURAL

Faixa Granulométrica (mm)	% Material Retido	% Material Retido Acumulada	Altura subc. (cm)	Massa (g)
fundo-0,59	0	0	0	0
0,59-0,71	2,0	2,0	1,00	47,12
0,71-0,84	3,5	5,5	1,75	86,29
0,84-1,00	4,5	10,0	2,25	128,20
1,00-1,19	15,0	25,0	7,50	435,55
1,19-1,41	21,0	46,0	10,50	609,77
1,41-1,68	31,0	77,0	15,50	951,08
1,68-2,00	16,0	93,0	8,00	464,58
2,00-2,40	7,0	100,00	3,50	207,09
Total	100,0		50,00	2929,68



QUADRO B19 - COMPOSIÇÃO E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CARVÃO BETUMINOSO NO ESTADO NATURAL

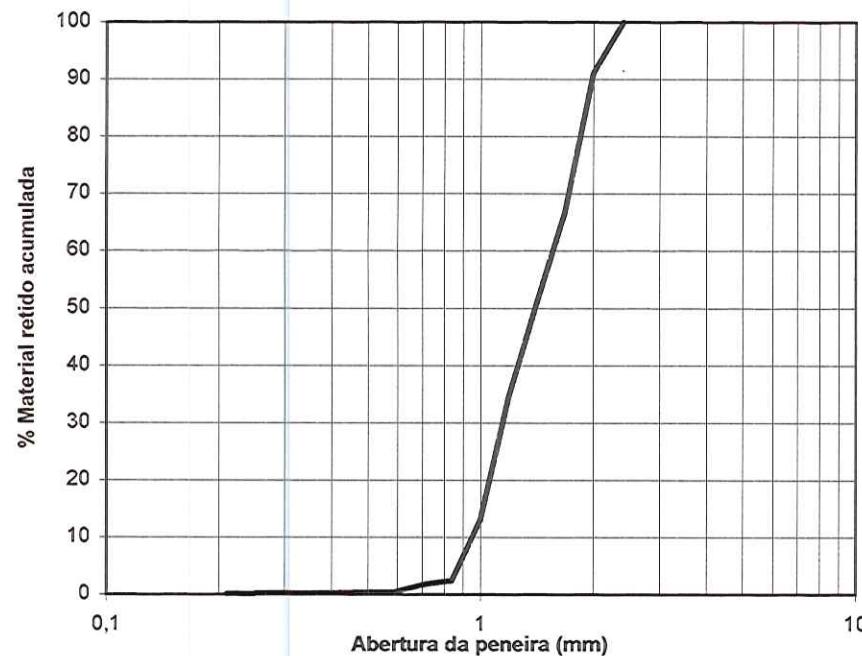
Faixa Granulométrica (mm)	% Material Retido	% Material Retido Acumulada	Altura subc. (cm)	Massa (g)
fundo-0,59	0	0	0	0
0,59-0,71	2,0	2,0	1,00	49,22
0,71-0,84	3,5	5,5	1,75	82,46
0,84-1,00	4,5	10,0	2,25	110,74
1,00-1,19	15,0	25,0	7,50	384,83
1,19-1,41	21,0	46,0	10,50	494,79
1,41-1,68	31,0	77,0	15,50	730,40
1,68-2,00	16,0	93,0	8,00	368,60
2,00-2,40	7,0	100,0	3,50	179,59
Total	100,0		50,00	2400,63



## **ANEXO C**

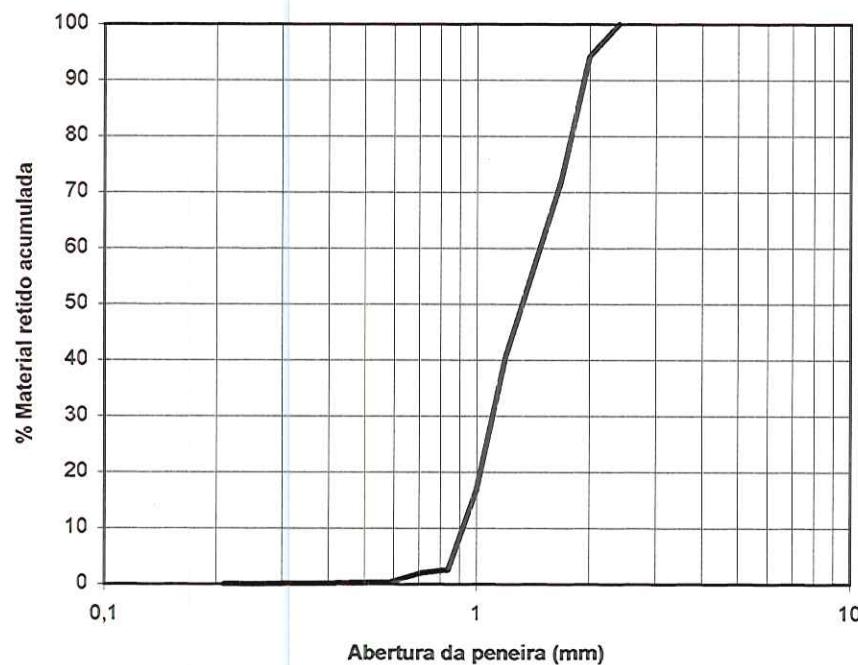
QUADRO C1 - COMPOSIÇÃO E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CARVÃO ANTRACITOSO (AMOSTRA 1)  
APÓS SIMULAÇÕES DE LAVAGEM EXCLUSIVAMENTE COM ÁGUA - INTERMITENTE

Faixa Granulométrica (mm)	Massa (g)	% Material Retido	% Material Retido Acumulada
fundo - 0,21	3,26	0,14	0,14
0,21 - 0,25	0,25	0,01	0,15
0,25 - 0,30	0,68	0,03	0,18
0,30 - 0,35	0,20	0,01	0,19
0,35 - 0,42	2,14	0,09	0,28
0,42 - 0,59	4,89	0,21	0,48
0,59 - 0,71	30,52	1,29	1,77
0,71 - 0,84	16,00	0,68	2,45
0,84 - 1,00	253,41	10,71	13,16
1,00 - 1,19	502,28	21,23	34,38
1,19 - 1,41	382,90	16,18	50,56
1,41 - 1,68	380,92	16,10	66,66
1,68 - 2,00	577,89	24,42	91,08
2,00 - 2,40	211,10	8,92	100,00
Total	2366,44	100,00	



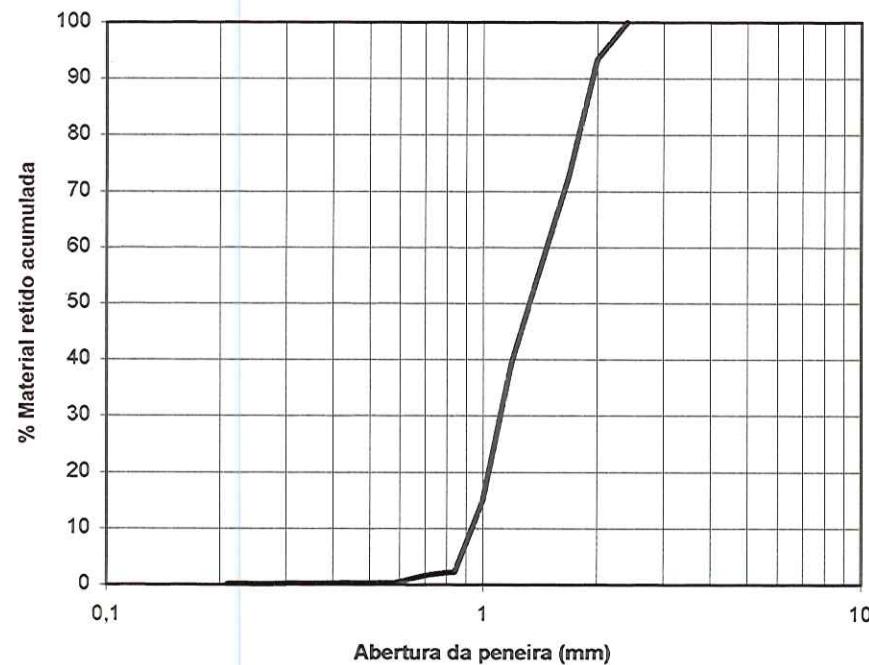
QUADRO C2 - COMPOSIÇÃO E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CARVÃO ANTRACITOSO (AMOSTRA 1)  
APÓS SIMULAÇÕES DE LAVAGEM INDEPENDENTE COM AR E ÁGUA - INTERMITENTE

Faixa Granulométrica (mm)	Massa (g)	% Material Retido	% Material Retido Acumulada
fundo-0,21	0,92	0,04	0,04
0,21-0,25	0,18	0,01	0,05
0,25-0,30	0,56	0,02	0,07
0,30-0,35	0,15	0,01	0,08
0,35-0,42	2,06	0,09	0,16
0,42-0,59	5,86	0,25	0,41
0,59-0,71	37,72	1,58	1,99
0,71-0,84	12,18	0,51	2,50
0,84-1,00	341,80	14,35	16,85
1,00-1,19	557,92	23,42	40,27
1,19-1,41	370,05	15,53	55,80
1,41-1,68	386,06	16,20	72,00
1,68-2,00	530,47	22,27	94,27
2,00-2,40	136,54	5,73	100,00
Total	2382,47	100,00	



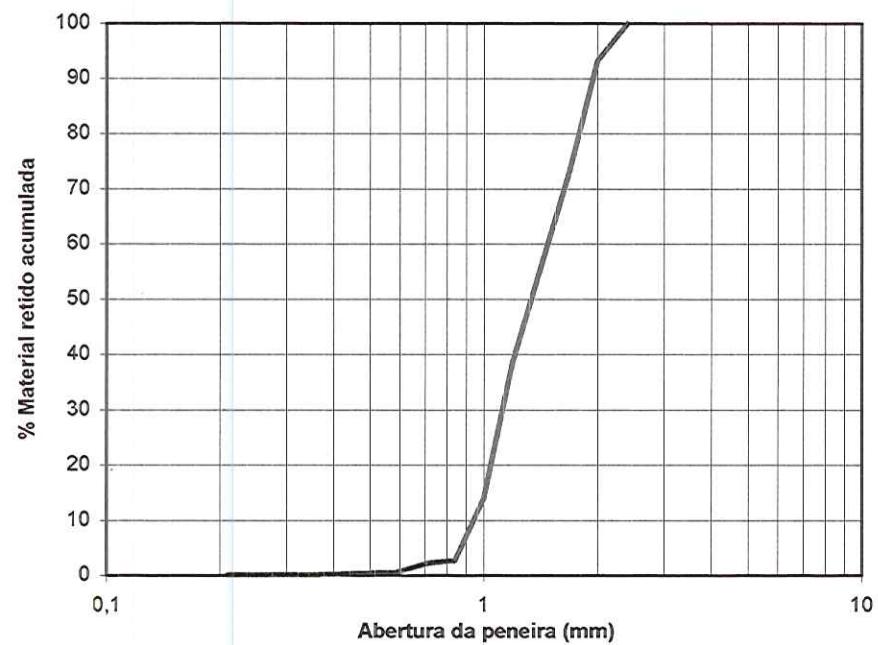
QUADRO C3 - COMPOSIÇÃO E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CARVÃO ANTRACITOSO (AMOSTRA 1)  
APÓS SIMULAÇÕES DE LAVAGEM EXCLUSIVAMENTE COM ÁGUA - CONTÍNUA

Faixa Granulométrica (mm)	Massa (g)	% Material Retido	% Material Retido Acumulada
fundo - 0,21	2,33	0,10	0,10
0,21 - 0,25	0,46	0,02	0,12
0,25 - 0,30	0,97	0,04	0,16
0,30 - 0,35	0,27	0,01	0,17
0,35 - 0,42	1,98	0,08	0,25
0,42 - 0,59	2,83	0,12	0,37
0,59 - 0,71	31,80	1,34	1,71
0,71 - 0,84	13,59	0,57	2,28
0,84 - 1,00	304,09	12,80	15,09
1,00 - 1,19	575,78	24,25	39,33
1,19 - 1,41	384,62	16,20	55,53
1,41 - 1,68	401,59	16,91	72,44
1,68 - 2,00	497,40	20,95	93,38
2,00 - 2,40	157,08	6,61	100,00
Total	2374,79	100,00	



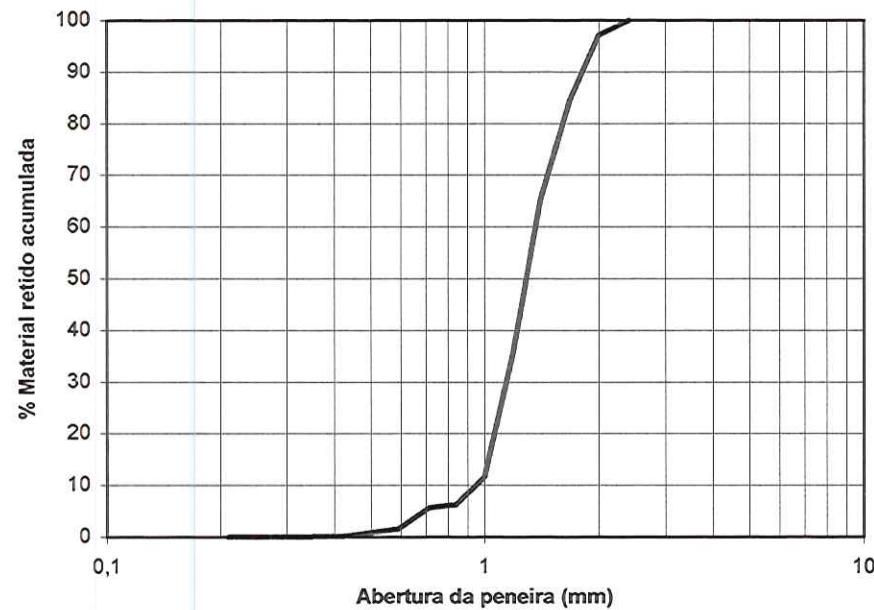
QUADRO C4 - COMPOSIÇÃO E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CARVÃO ANTRACITOSO (AMOSTRA 1)  
APÓS SIMULAÇÕES DE LAVAGEM INDEPENDENTE COM AR E ÁGUA - CONTÍNUA

Faixa Granulométrica (mm)	Massa (g)	% Material Retido	% Material Retido Acumulada
fundo-0,21	1,16	0,05	0,05
0,21-0,25	0,32	0,01	0,06
0,25-0,30	0,90	0,04	0,10
0,30-0,35	0,30	0,01	0,11
0,35-0,42	3,20	0,13	0,25
0,42-0,59	6,81	0,28	0,53
0,59-0,71	40,63	1,70	2,23
0,71-0,84	11,58	0,48	2,71
0,84-1,00	269,08	11,25	13,96
1,00-1,19	583,00	24,37	38,33
1,19-1,41	407,84	17,05	55,37
1,41-1,68	412,10	17,22	72,60
1,68-2,00	492,78	20,60	93,19
2,00-2,40	162,91	6,81	100,00
Total	2392,62	100,00	



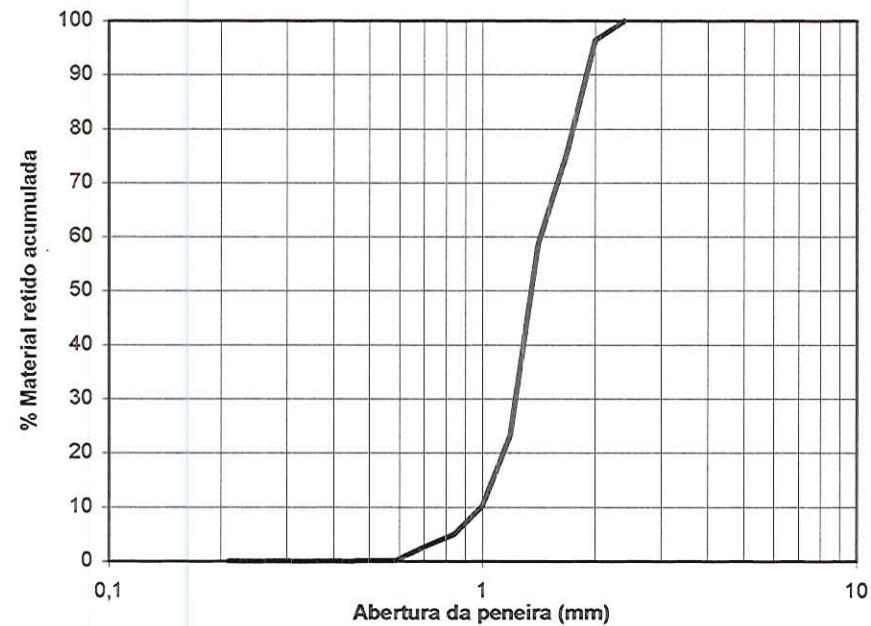
**QUADRO C5 - COMPOSIÇÃO E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CARVÃO ANTRACITOSO (AMOSTRA 2)  
APÓS SIMULAÇÕES DE LAVAGEM EXCLUSIVAMENTE COM ÁGUA - INTERMITENTE**

Faixa Granulométrica (mm)	Massa (g)	% Material Retido	% Material Retido Acumulada
fundo-0,21	0,57	0,019	0,02
0,21-0,25	0,13	0,004	0,02
0,25-0,30	0,61	0,021	0,04
0,30-0,35	0,22	0,007	0,05
0,35-0,42	1,93	0,066	0,12
0,42-0,59	42,60	1,453	1,57
0,59-0,71	119,50	4,076	5,65
0,71-0,84	18,19	0,620	6,27
0,84-1,00	157,25	5,364	11,63
1,00-1,19	700,78	23,902	35,53
1,19-1,41	873,08	29,779	65,31
1,41-1,68	561,45	19,150	84,46
1,68-2,00	371,94	12,686	97,15
2,00-2,40	83,59	2,851	100,00
Total	2931,84	100,00	



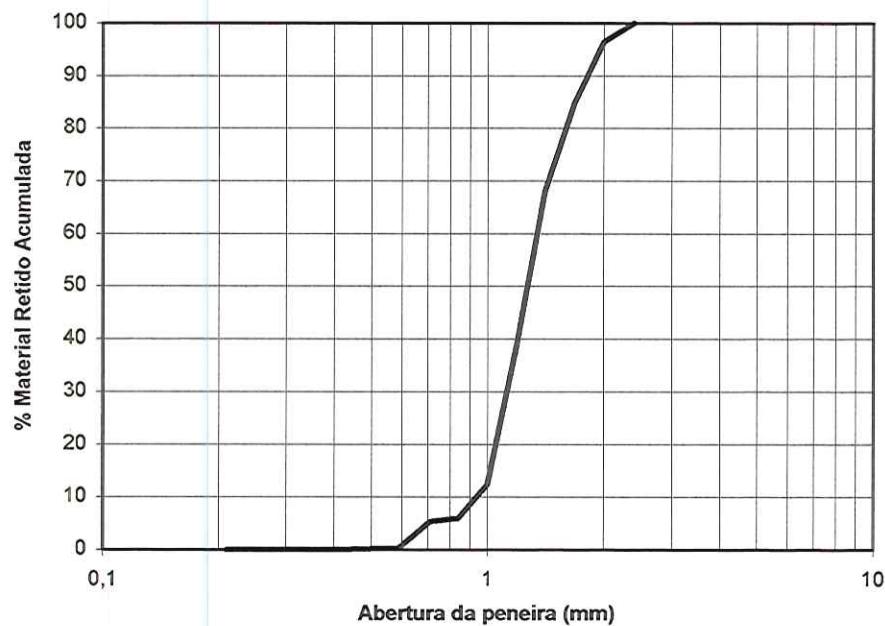
QUADRO C6 - COMPOSIÇÃO E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CARVÃO ANTRACITOSO (AMOSTRA 2)  
APÓS SIMULAÇÕES DE LAVAGEM INDEPENDENTE COM AR E ÁGUA - INTERMITENTE

Faixa Granulométrica (mm)	Massa (g)	% Material Retido	% Material Retido Acumulada
fundo-0,21	0,05	0,0018	0,002
0,21-0,25	0,03	0,0010	0,003
0,25-0,30	0,13	0,0045	0,007
0,30-0,35	0,02	0,0007	0,008
0,35-0,42	0,40	0,0137	0,022
0,42-0,59	4,06	0,1395	0,161
0,59-0,71	76,89	2,6426	2,804
0,71-0,84	62,71	2,1553	4,959
0,84-1,00	151,64	5,2117	10,171
1,00-1,19	381,93	13,1265	23,297
1,19-1,41	1028,98	35,3648	58,662
1,41-1,68	486,36	16,7156	75,378
1,68-2,00	610,05	20,9667	96,345
2,00-2,40	106,36	3,6555	100,000
Total	2909,61	100,0000	



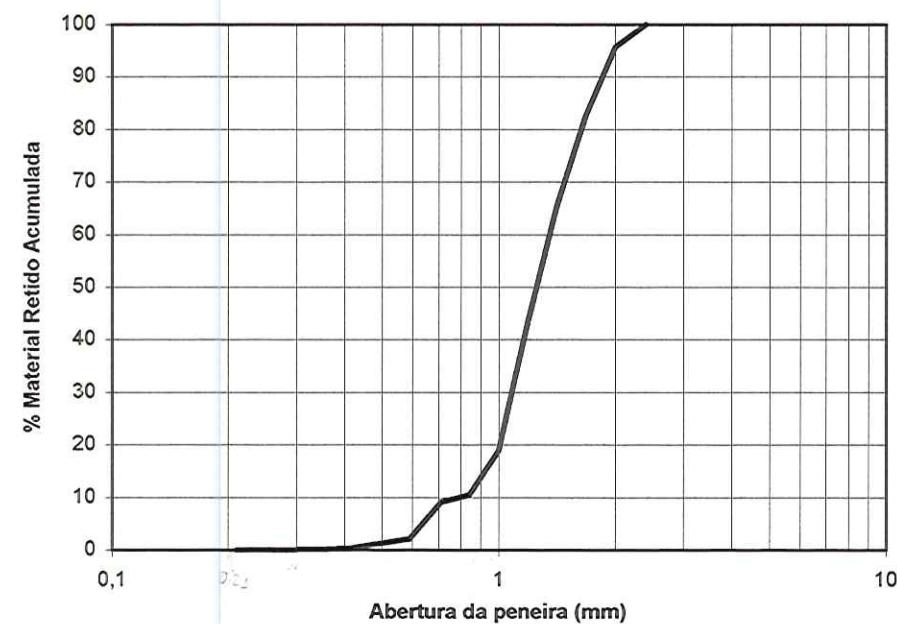
**QUADRO C7 - COMPOSIÇÃO E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CARVÃO BETUMINOSO  
APÓS SIMULAÇÕES DE LAVAGEM EXCLUSIVAMENTE COM ÁGUA - INTERMITENTE**

Faixa Granulométrica (mm)	Massa (g)	% Material Retido	% Material Retido Acumulada
fundo - 0,21	0,85	0,033	0,033
0,21 - 0,25	0,09	0,003	0,036
0,25 - 0,30	0,35	0,014	0,050
0,30 - 0,35	0,06	0,002	0,052
0,35 - 0,42	0,97	0,038	0,090
0,42 - 0,59	10,74	0,416	0,506
0,59 - 0,71	131,12	5,080	5,586
0,71 - 0,84	13,78	0,534	6,119
0,84 - 1,00	174,62	6,765	12,884
1,00 - 1,19	694,68	26,912	39,796
1,19 - 1,41	739,89	28,663	68,459
1,41 - 1,68	432,31	16,748	85,207
1,68 - 2,00	288,84	11,190	96,397
2,00 - 2,40	93,01	3,603	100,000
Total	2581,31	100,000	



**QUADRO C8 - COMPOSIÇÃO E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CARVÃO BETUMINOSO  
APÓS SIMULAÇÕES DE LAVAGEM INDEPENDENTE COM AR E ÁGUA - INTERMITENTE**

Faixa Granulométrica (mm)	Massa (g)	% Material Retido	% Material Retido Acumulada
fundo - 0,21	0,66	0,029	0,029
0,21 - 0,25	0,31	0,014	0,043
0,25 - 0,30	1,26	0,055	0,098
0,30 - 0,35	0,67	0,029	0,127
0,35 - 0,42	6,25	0,274	0,402
0,42 - 0,59	39,02	1,712	2,114
0,59 - 0,71	158,31	6,947	9,061
0,71 - 0,84	31,65	1,389	10,450
0,84 - 1,00	193,87	8,507	18,957
1,00 - 1,19	550,39	24,152	43,110
1,19 - 1,41	497,92	21,850	64,959
1,41 - 1,68	402,05	17,643	82,602
1,68 - 2,00	298,70	13,108	95,710
2,00 - 2,40	97,76	4,290	100,000
Total	2278,82	100,000	



**Quadro C9 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material : Carvão Antracitoso (amostra 1)**  
**Natural**

**Forma de exposição:** Estratificado

**Diâmetro equivalente do meio granular (Deq):** 1,354 mm

**Massa específica do material:** 1420 kg/m<sup>3</sup>

**Temperatura da água:** 25+/-1 °C

**Massa específica da água:** 997,81 kg/m<sup>3</sup>

**Viscosidade absoluta da água:** 8,94E-04 N s/m<sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 50,0 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda de carga (cm)
200	55	7,6
300	82	11,9
400	109	16,7
500	137	21,8
600	164	26,3
700	191	31,1
800	219	34,5
900	246	37,0
1000	273	42,0
1200	328	52,5
1400	383	64,8
1600	437	77,9

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda de carga (m)	E (%)
0,00	0	50,0	0,0	0,0
0,08	31	50,0	0,036	0,0
0,12	48	50,0	0,055	0,0
0,15	60	50,0	0,070	0,0
0,19	74	50,0	0,087	0,0
0,23	90	50,1	0,106	0,2
0,29	114	50,5	0,126	1,0
0,35	136	52,3	0,125	4,6
0,43	168	54,5	0,124	9,0
0,51	200	57,1	0,125	14,2
0,59	233	59,3	0,125	18,6
0,67	265	61,8	0,127	23,6
0,82	323	65,5	0,128	31,0
0,91	357	68,7	0,129	37,4
1,08	426	73,8	0,130	47,6

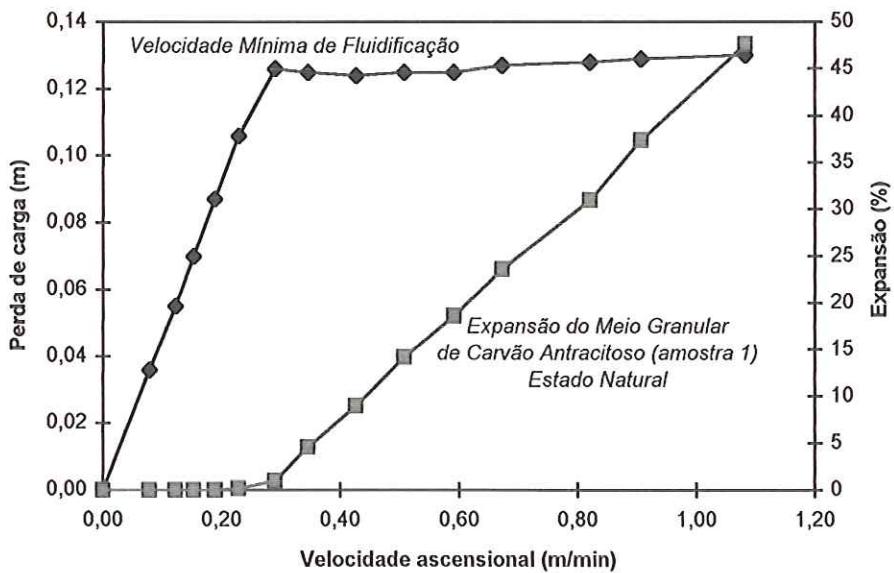


Figura C9 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura C9:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação ( $V_{mf}$ ) = 0,27 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,124 m

Cálculo da  $V_{mf}$  utilizando-se a equação (20):

$$\begin{array}{ll} \text{Número de Galileu (Ga)} = & 46531 \\ V_{mf} = & 0,00921 \text{ m/s} \end{array}$$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,41$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio do meio granular:

Equação Linear:  $Y = a + bX$

$$\begin{array}{ll} b = & 656080 \\ a = & 7667 \\ r^2 = & 0,65 \end{array}$$

Superfície específica média dos grãos = 6011  $\text{m}^2/\text{m}^3$

Coeficiente de esfericidade médio:

$$\psi_{med} = 0,74$$

**Quadro C10 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material : Carvão Antracitoso (amostra 1)**

**Método de Lavagem: Água - Intermittente**

**Forma de exposição: Estratificado**

**Diâmetro equivalente do meio granular (Deq):** 1,330 mm

**Massa específica do material:** 1420 kg/m<sup>3</sup>

**Temperatura da água:** 25+/-1 °C

**Massa específica da água:** 997,81 kg/m<sup>3</sup>

**Viscosidade absoluta da água:** 8,94E-04 N s/m<sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 49,4 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda de carga (cm)
200	55	5,9
300	82	8,9
400	109	12,5
500	137	16,4
600	164	20,3
700	191	24,4
800	219	28,6
900	246	32,9
1000	273	37,1
1200	328	46,6
1400	383	57,6
1600	437	69,7

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda de carga (m)	E (%)
0,00	0	49,4	0,000	0,0
0,06	25	49,4	0,025	0,0
0,09	34	49,4	0,035	0,0
0,11	42	49,4	0,044	0,0
0,12	48	49,5	0,052	0,2
0,18	69	49,6	0,072	0,4
0,24	96	49,9	0,101	1,0
0,29	116	50,5	0,117	2,2
0,35	137	51,4	0,128	4,0
0,41	161	53,4	0,128	8,1
0,48	190	55,5	0,126	12,3
0,58	229	58,8	0,125	19,0
0,71	279	61,7	0,126	24,9
0,82	324	65,4	0,127	32,4
1,02	401	70,9	0,128	43,5

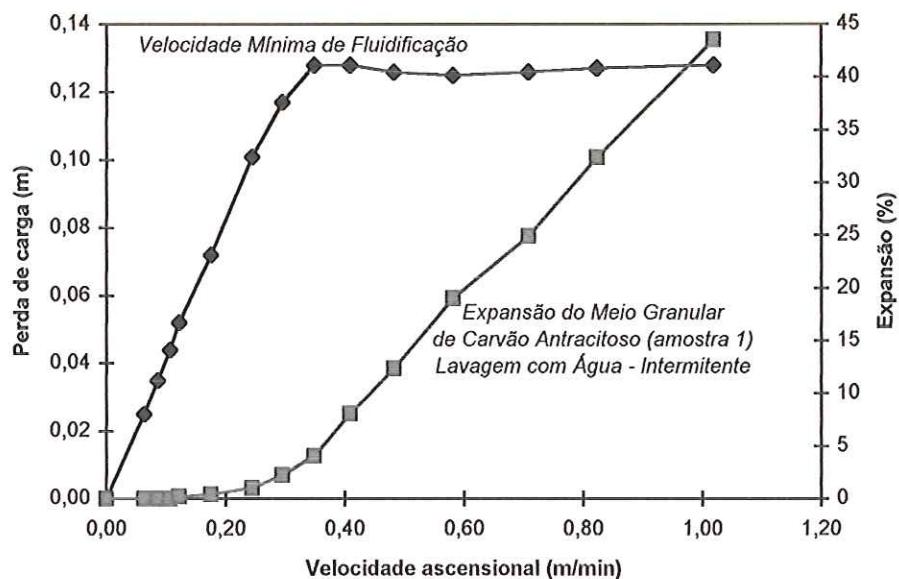


Figura C10 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura C10:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação (Vm<sub>f</sub>) = 0,31 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,127 m

Cálculo da Vmf utilizando-se a equação (20):

$$\begin{aligned} \text{Número de Galileu (Ga)} &= 40748 \\ V_{mf} &= 0,00864 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,39$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio do meio granular:

$$\text{Equação Linear: } Y = a + bX$$

$$\begin{aligned} b &= 471229 \\ a &= 14477 \\ r^2 &= 0,99 \end{aligned}$$

Superfície específica média dos grãos = 4570 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

Coeficiente de esfericidade médio:

$$\psi_{med} = 0,99$$

**Quadro C11 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material : Carvão Antracitoso (amostra 1)**  
**Método de Lavagem: Ar e Água - Intermittente**

**Forma de exposição: Estratificado**

Diâmetro equivalente do meio granular (Deq):	1,276 mm
Massa específica do material:	1420 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água:	25+/- 1 °C
Massa específica da água:	997,81 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade absoluta da água:	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 49,2 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda de carga (cm)
200	55	6,3
300	82	10,0
400	109	13,6
500	137	17,9
600	164	21,6
700	191	26,4
800	219	30,9
900	246	35,5
1000	273	40,1
1200	328	51,0
1400	383	62,5
1600	437	73,7

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda de carga (m)	E (%)
0,00	0	49,2	0,0	0,0
0,07	28	49,2	0,032	0,0
0,12	49	49,2	0,057	0,0
0,17	66	49,4	0,076	0,4
0,23	89	49,9	0,100	1,4
0,30	120	50,9	0,125	3,5
0,38	148	53,0	0,123	7,7
0,46	181	55,5	0,123	12,8
0,57	224	58,7	0,123	19,3
0,66	258	61,2	0,124	24,4
0,73	288	63,2	0,124	28,5
0,82	322	66,2	0,125	34,6
0,98	385	71,7	0,125	45,7

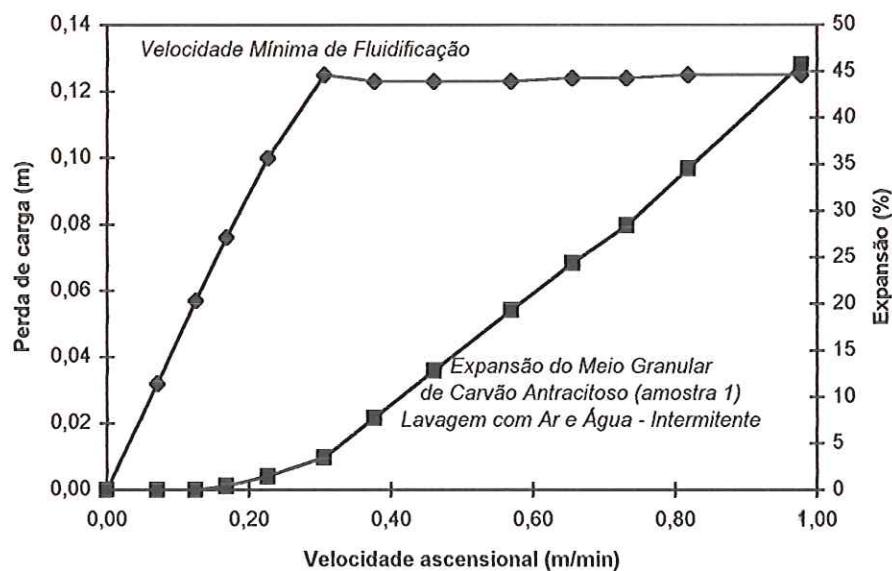


Figura C11 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura C11:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação ( $V_{mf}$ ) = 0,28 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,123 m

Cálculo da  $V_{mf}$  utilizando-se a equação (20):

$$\begin{aligned} \text{Número de Galileu (Ga)} &= 37753 \\ V_{mf} &= 0,00833 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,41$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio do meio granular:

Equação Linear:  $Y = a + bX$

$$b = 514391$$

$$a = 15641$$

$$r^2 = 0,99$$

$$\text{Superfície específica média dos grãos} = 5154 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

Coeficiente de esfericidade médio:

$$\psi_{m\acute{e}d} = 0,91$$

**Quadro C12 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material : Carvão Antracitoso (amostra 1)**  
**Método de Lavagem: Água - Contínua**

**Forma de exposição: Estratificado**

Diâmetro equivalente do meio granular (Deq):	1,288 mm
Massa específica do material:	1420 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água:	25+/- 1 °C
Massa específica da água:	997,81 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade absoluta da água:	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

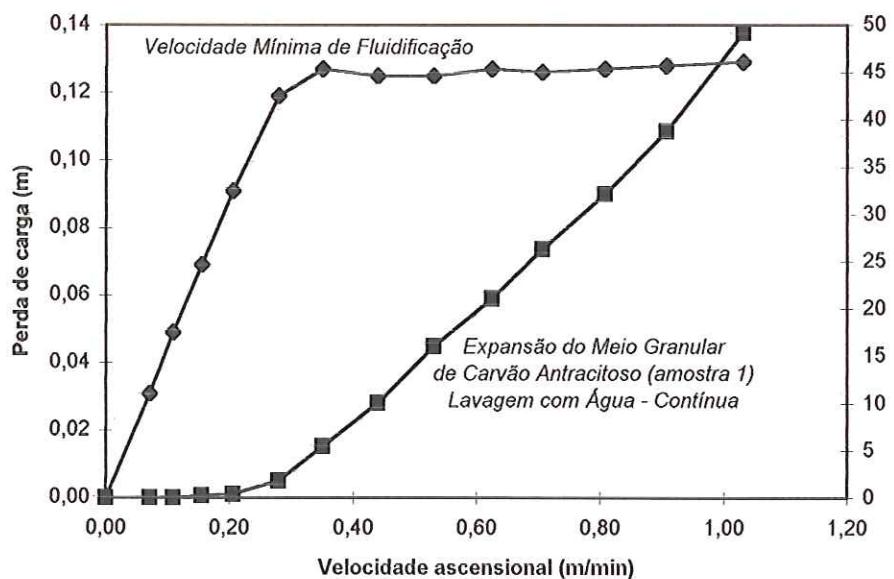
i) Altura da camada: 49,8 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda de carga (cm)
200	55	6,2
300	82	9,4
400	109	13,0
500	137	17,1
600	164	21,1
700	191	25,4
800	219	29,8
900	246	34,6
1000	273	39,6
1200	328	49,5
1400	383	60,7
1600	437	73,2

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda de carga (m)	E (%)
0,00	0	49,8	0,0	0,0
0,07	28	49,8	0,031	0,0
0,11	43	49,8	0,049	0,0
0,15	61	49,9	0,069	0,2
0,21	81	50,0	0,091	0,4
0,28	110	50,7	0,119	1,8
0,35	138	52,5	0,127	5,4
0,44	173	54,8	0,125	10,0
0,53	209	57,8	0,125	16,1
0,62	246	60,3	0,127	21,1
0,71	278	62,9	0,126	26,3
0,81	318	65,8	0,127	32,1
0,91	357	69,1	0,128	38,8
1,03	406	74,3	0,129	49,2



**Figura C12 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular**

De acordo com a Figura C12:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação ( $V_{mf}$ ) = 0,29 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,125 m

Cálculo da  $V_{mf}$  utilizando-se a equação (20):

$$\begin{aligned} \text{Número de Galileu (Ga)} &= 38340 \\ V_{mf} &= 0,0084 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,41$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio do meio granular:

Equação Linear:  $Y = a + bX$

$$\begin{aligned} b &= 485529 \\ a &= 15714 \\ r^2 &= 1,00 \end{aligned}$$

Superfície específica média dos grãos = 4983  $\text{m}^2/\text{m}^3$

Coeficiente de esfericidade médio:

$$\psi_{med} = 0,93$$

**Quadro C13 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

Material : Carvão Antracitoso (amostra 1)

Método de Lavagem: Ar e Água - Contínua

Forma de exposição: Estratificado

Diâmetro equivalente do meio granular (Deq):	1,287 mm
Massa específica do material:	1420 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água:	25+/-1 °C
Massa específica da água:	997,81 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade absoluta da água:	8,94E-04 N s/m <sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

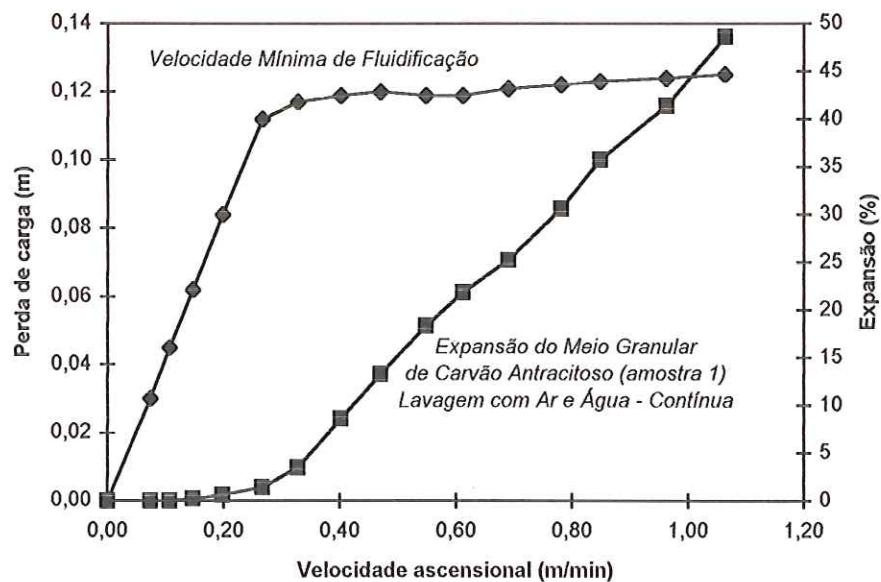
i) Altura da camada: 49,0 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda de carga (cm)
200	55	6,1
300	82	9,5
400	109	13,0
500	137	17,2
600	164	21,1
700	191	25,3
800	219	30,3
900	246	35,0
1000	273	39,9
1200	328	50,2
1400	383	61,5
1600	437	73,5

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda de carga (m)	E (%)
0,00	0	49,0	0,0	0,0
0,07	29	49,0	0,030	0,0
0,11	42	49,0	0,045	0,0
0,15	58	49,1	0,062	0,2
0,20	78	49,3	0,084	0,6
0,27	105	49,7	0,112	1,4
0,33	129	50,7	0,117	3,5
0,40	158	53,2	0,119	8,6
0,47	185	55,5	0,120	13,3
0,55	216	58,0	0,119	18,4
0,61	241	59,7	0,119	21,8
0,69	272	61,4	0,121	25,3
0,78	308	64,0	0,122	30,6
0,85	334	66,5	0,123	35,7
0,96	379	69,3	0,124	41,4
1,06	419	72,8	0,125	48,6



**Figura C13 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular**

De acordo com a Figura C13:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação ( $V_{mf}$ ) = 0,30 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,117 m

Cálculo da  $V_{mf}$  utilizando-se a equação (20):

$$\begin{aligned} \text{Número de Galileu (Ga)} &= 38340 \\ V_{mf} &= 0,00839 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,43$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio do meio granular:

Equação Linear:  $Y = a + bX$

$$b = 488917$$

$$a = 16962$$

$$r^2 = 1,00$$

$$\text{Superfície específica média dos grãos} = 5765,93 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

Coeficiente de esfericidade médio:

$$\psi_{med} = 0,81$$

**Quadro C14 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material : Carvão Antracítico (amostra 2)**  
**Natural**

**Forma de exposição: Estratificado**

**Diâmetro equivalente do meio granular (Deq):** 1,341 mm

**Massa específica do material:** 1670 kg/m<sup>3</sup>

**Temperatura da água:** 25+/-1 °C

**Massa específica da água:** 997,81 kg/m<sup>3</sup>

**Viscosidade absoluta da água:** 8,94E-04 N s/m<sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 46,9 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda de carga (cm)
200	55	7,2
300	82	12,6
400	109	15,9
500	137	20,9
600	164	25,1
700	191	30,6
800	219	36,2
900	246	41,2
1000	273	47,6
1200	328	58,5
1400	383	71,2

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda de carga (m)	E (%)
0,00	0	46,9	0,0	0,0
0,08	33	46,9	0,044	0,0
0,12	47	46,9	0,064	0,0
0,17	68	47,0	0,091	0,2
0,22	88	47,2	0,117	0,6
0,32	125	48,1	0,157	2,6
0,40	156	49,1	0,178	4,7
0,48	188	51,2	0,182	9,2
0,55	216	53,5	0,178	14,1
0,65	257	56,0	0,179	19,4
0,74	291	58,6	0,180	24,9
0,81	318	60,4	0,180	28,8
0,91	358	62,9	0,182	34,1
1,08	427	67,6	0,182	44,1
1,29	507	74,9	0,184	59,7

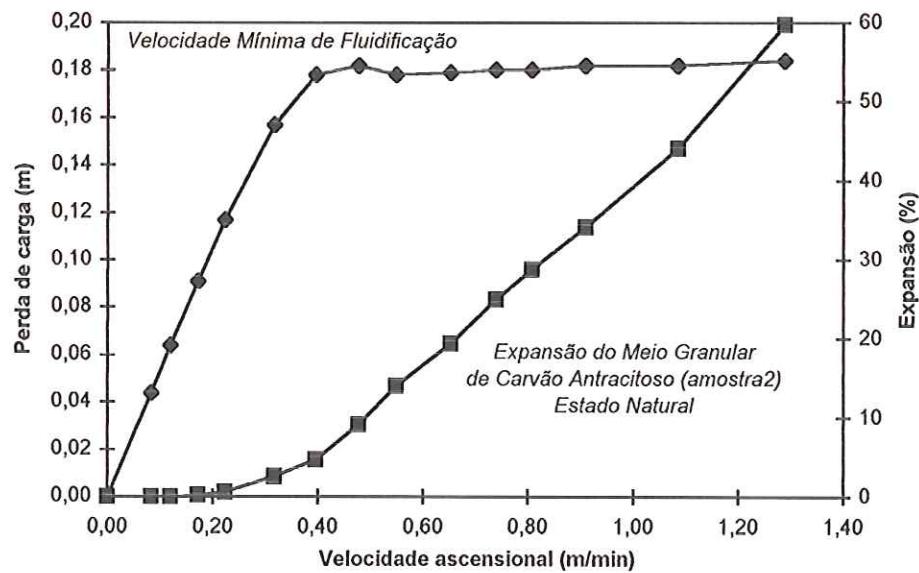


Figura C14 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura C14:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação (Vm<sub>f</sub>) = 0,35 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,179 m

Cálculo da V<sub>mf</sub> utilizando-se a equação (20):

$$\begin{aligned} \text{Número de Galileu (Ga)} &= 60109 \\ V_{mf} &= 0,01210 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,43$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio do meio granular:

Equação Linear:  $Y = a + bX$

$$\begin{aligned} b &= 648842 \\ a &= 16989 \\ r^2 &= 0,92 \end{aligned}$$

Superfície específica média dos grãos = 6697 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

Coeficiente de esfericidade médio:

$$\psi_{med} = 0,67$$

**Quadro C15 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

Material : Carvão Antracitoso (amostra 2)

Método de Lavagem: Água - Intermittente

Forma de exposição: Estratificado

Diâmetro equivalente do meio granular (Deq): 1,224 mm

Massa específica do material: 1670 kg/m<sup>3</sup>

Temperatura da água: 25+/-1 °C

Massa específica da água: 997,81 kg/m<sup>3</sup>

Viscosidade absoluta da água: 8,94E-04 N s/m<sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 45,6 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda de carga (cm)
200	55	6,9
300	82	11,1
400	109	15,1
500	137	19,6
600	164	24,0
700	191	29,0
800	219	34,1
900	246	38,9
1000	273	44,5
1200	328	55,9
1400	383	67,9

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda de carga (m)	E (%)
0,00	0	45,6	0,0	0,0
0,08	33	45,6	0,047	0,0
0,11	43	45,6	0,060	0,0
0,15	60	45,7	0,082	0,2
0,20	77	45,8	0,102	0,4
0,26	101	46,4	0,129	1,8
0,32	127	47,0	0,152	3,1
0,41	161	48,5	0,170	6,4
0,52	204	51,1	0,174	12,1
0,61	239	53,2	0,174	16,7
0,71	280	55,9	0,172	22,6
0,82	323	58,6	0,175	28,5
1,01	397	63,2	0,177	38,6
1,11	437	68,4	0,178	50,0
1,22	480	69,1	0,178	51,5

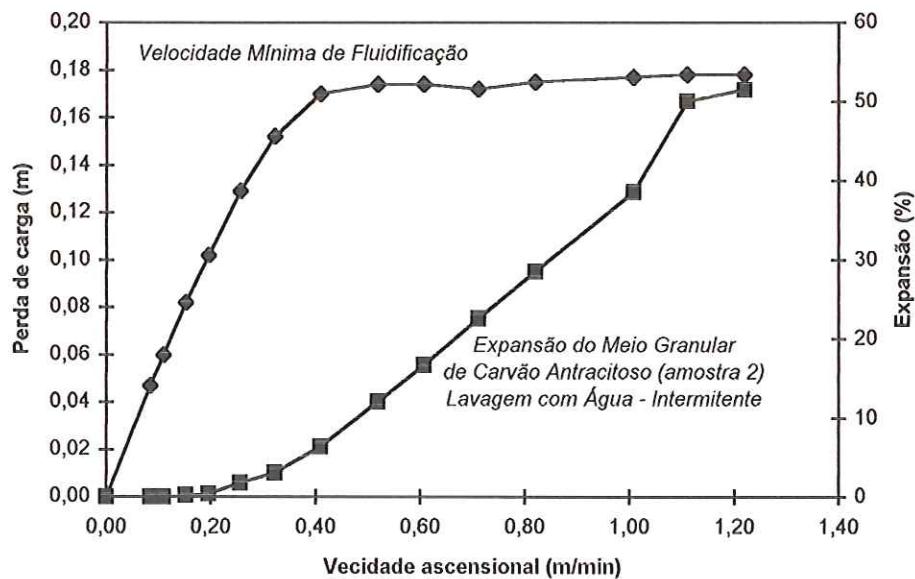


Figura C15 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura C15:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação ( $V_{mf}$ ) = 0,38 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,172 m

Cálculo da  $V_{mf}$  utilizando-se a equação (20):

Número de Galileu ( $G_a$ ) = 49630  
 $V_{mf} = 0,01109 \text{ m/s}$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,44$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio do meio granular:

Equação Linear:  $Y = a + bX$

$$\begin{aligned} b &= 616531 \\ a &= 17903 \\ r^2 &= 0,99 \end{aligned}$$

Superfície específica média dos grãos = 6728  $\text{m}^2/\text{m}^3$

Coeficiente de esfericidade médio:

$$\psi_{med} = 0,73$$

**Quadro C16 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material : Carvão Antracitoso (amostra 2)**

**Método de Lavagem: Ar e Água - Intermittente**

**Forma de exposição: Estratificado**

**Diâmetro equivalente do meio granular (Deq): 1,312 mm**

**Massa específica do material: 1670 kg/m<sup>3</sup>**

**Temperatura da água: 25+/-1 °C**

**Massa específica da água: 997,81 kg/m<sup>3</sup>**

**Viscosidade absoluta da água: 8,94E-04 N s/m<sup>2</sup>**

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 44,7 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda de carga (cm)
200	55	9,4
300	82	14,5
400	109	19,6
500	137	24,7
600	164	30,5
700	191	36,2
800	219	41,0
900	246	46,9
1000	273	53,7
1200	328	66,6
1400	383	81,3

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda de carga (m)	E (%)
0,00	0	44,7	0,0	0,0
0,10	41	44,7	0,064	0,0
0,15	60	44,7	0,097	0,0
0,25	97	45,2	0,147	1,1
0,31	124	46,4	0,169	3,8
0,38	151	47,6	0,181	6,5
0,54	212	51,3	0,174	14,8
0,61	242	53,0	0,175	18,6
0,69	272	54,7	0,176	22,4
0,77	303	56,5	0,177	26,4
0,87	343	58,5	0,178	30,9
1,03	406	62,9	0,179	40,7
1,16	457	66,7	0,180	49,2
1,31	515	70,0	0,179	56,6

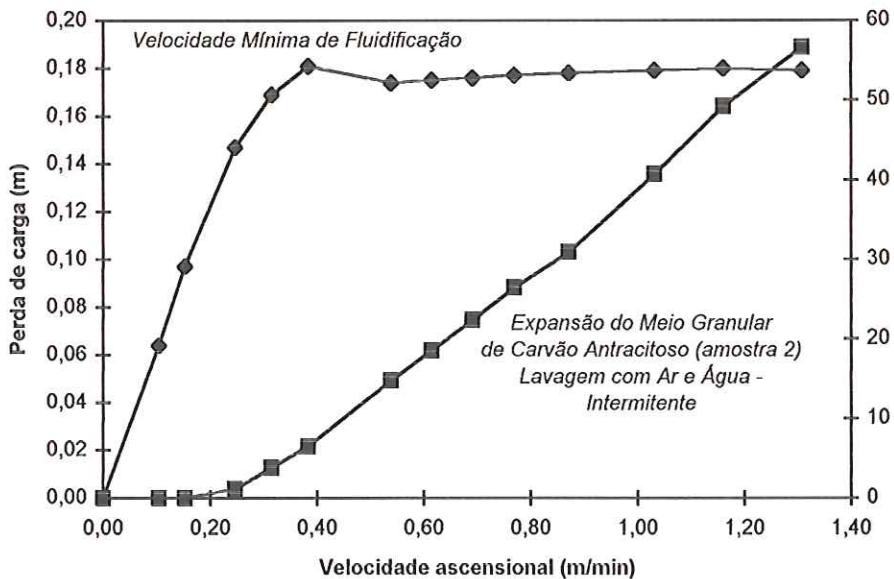


Figura C16 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura C16:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação ( $V_{mf}$ ) = 0,33 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,173 m

Cálculo da  $V_{mf}$  utilizando-se a equação (20):

Número de Galileu ( $G_a$ ) = 56467  
 $V_{mf} = 0,01176 \text{ m/s}$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,42$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio do meio granular:

Equação Linear:  $Y=a+bX$

$$\begin{aligned} b &= 857127 \\ a &= 13927 \\ r^2 &= 0,97 \end{aligned}$$

Superfície específica média dos grãos = 7281  $\text{m}^2/\text{m}^3$

Coeficiente de esfericidade médio:

$$\psi_{med} = 0,63$$

**Quadro C17 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material : Carvão Betuminoso Natural**

**Forma de exposição:** Estratificado

**Diâmetro equivalente do meio granular (Deq):** 1,341 mm

**Massa específica do material:** 1596 kg/m<sup>3</sup>

**Temperatura da água:** 25+/-1 °C

**Massa específica da água:** 997,81 kg/m<sup>3</sup>

**Viscosidade absoluta da água:** 8,94E-04 N s/m<sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 46,7 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda de carga (cm)
200	55	8,8
300	82	13,7
400	109	18,5
500	137	23,5
600	164	29,7
700	191	36,0
800	219	41,3
900	246	47,8
1000	273	54,6
1200	328	68,1
1400	383	84,2

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda de carga (m)	E (%)
0,00	0	46,7	0,0	0,0
0,08	33	46,7	0,047	0,0
0,12	49	46,7	0,072	0,0
0,17	67	47,0	0,098	0,6
0,23	90	47,7	0,127	2,1
0,31	123	50,1	0,136	7,3
0,41	163	53,0	0,146	13,5
0,48	189	55,1	0,149	18,0
0,59	233	58,7	0,150	25,7
0,70	276	62,5	0,152	33,8
0,83	325	65,7	0,151	40,7
0,91	358	70,1	0,153	50,1
1,04	409	75,7	0,153	62,1

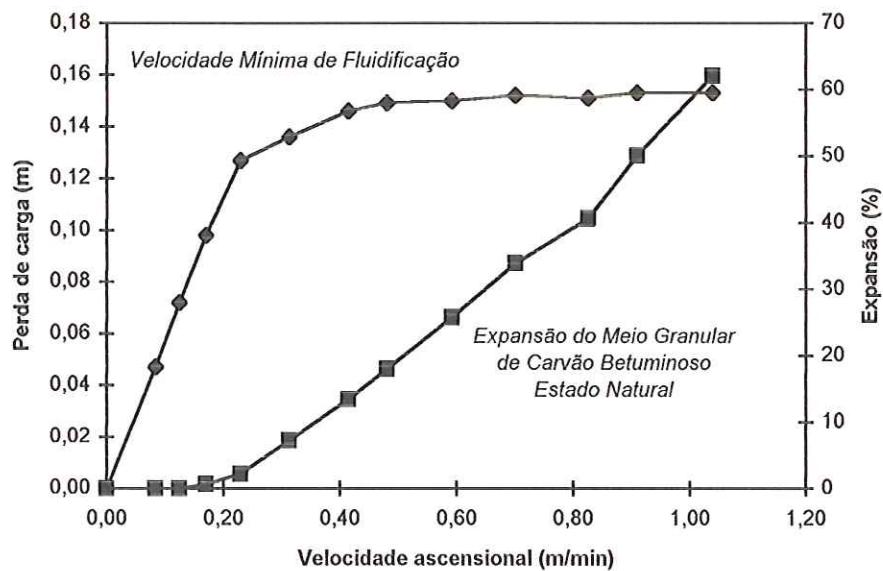


Figura C17 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura C17:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação ( $V_{mf}$ ) = 0,36 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,148 m

Cálculo da  $V_{mf}$  utilizando-se a equação (20):

Número de Galileu ( $G_a$ ) = 53492  
 $V_{mf} = 0,01104 \text{ m/s}$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,47$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio do meio granular:

Equação Linear:  $Y = a + bX$

$$\begin{aligned} b &= 746484 \\ a &= 20794 \\ r^2 &= 0,99 \end{aligned}$$

Superfície específica média dos grãos = 8590  $\text{m}^2/\text{m}^3$

Coeficiente de esfericidade médio:

$$\psi_{med} = 0,52$$

**Quadro C18 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material : Carvão Betuminoso**  
**Método de Lavagem: Água - Intermittente**

**Forma de exposição: Estratificado**

**Diâmetro equivalente do meio granular (Deq):** 1,214 mm

**Massa específica do material:** 1596 kg/m<sup>3</sup>

**Temperatura da água:** 25+/-1 °C

**Massa específica da água:** 997,81 kg/m<sup>3</sup>

**Viscosidade absoluta da água:** 8,94E-04 N s/m<sup>2</sup>

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 45,7 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda de carga (cm)
200	55	7,7
300	82	12,3
400	109	16,9
500	137	22,2
600	164	27,8
700	191	34,5
800	219	39,9
900	246	45,5
1000	273	51,9
1200	328	64,0
1400	383	78,2

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda de carga (m)	E (%)
0,00	0	45,7	0,0	0,0
0,08	30	45,7	0,042	0,0
0,11	43	45,7	0,061	0,0
0,13	53	45,7	0,076	0,0
0,19	76	46,0	0,109	0,7
0,24	96	46,4	0,133	1,5
0,30	118	47,2	0,143	3,3
0,38	150	48,7	0,170	6,6
0,46	182	50,5	0,169	10,5
0,53	209	51,7	0,170	13,1
0,61	239	53,5	0,170	17,1
0,69	273	55,5	0,171	21,4
0,75	294	57,2	0,170	25,2
0,86	338	60,4	0,173	32,2
0,98	385	63,8	0,176	39,6
1,16	456	71,3	0,176	56,0

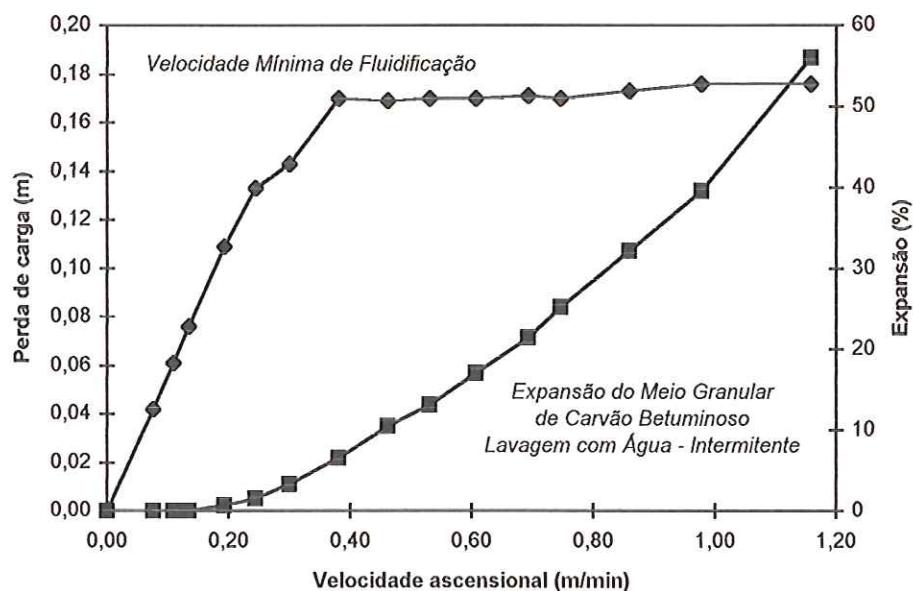


Figura C18 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura C18:

a) Velocidade Mínima de Fluidificação ( $V_{mf}$ ) = 0,33 m/min

b) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,159 m

Cálculo da  $V_{mf}$  utilizando-se a equação (20):

$$\begin{aligned} \text{Número de Galileu (Ga)} &= 44167 \\ V_{mf} &= 0,01009 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\epsilon_o = 0,42$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio do meio granular:

Equação Linear:  $Y = a + bX$

$$\begin{aligned} b &= 687266 \\ a &= 22884 \\ r^2 &= 0,96 \end{aligned}$$

Superfície específica média dos grãos = 6379  $\text{m}^2/\text{m}^3$

Coeficiente de esfericidade médio:

$$\psi_{med} = 0,77$$

**Quadro C19 - Determinação do coeficiente de esfericidade, porosidade, superfície específica dos grãos e velocidade mínima de fluidificação**

**Material : Carvão Betuminoso**

**Método de Lavagem: Ar e Água - Intermittente**

**Forma de exposição: Estratificado**

**Diâmetro equivalente do meio granular (Deq): 1,164 mm**

**Massa específica do material: 1596 kg/m<sup>3</sup>**

**Temperatura da água: 25+/-1 °C**

**Massa específica da água: 997,81 kg/m<sup>3</sup>**

**Viscosidade absoluta da água: 8,94E-04 N s/m<sup>2</sup>**

**DADOS EXPERIMENTAIS:**

i) Altura da camada: 43,8 cm

ii) Perdas de carga no meio granular fixo:

Taxa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> dia)	Vazão (L/H)	Perda de carga (cm)
200	55	7,9
300	82	11,9
400	109	16,6
500	137	21,5
600	164	26,1
700	191	31,3
800	219	36,6
900	246	41,8
1000	273	47,9
1200	328	60,3
1400	383	74,9

iii) Perdas de carga no meio granular fluidificado:

Veloc.asc. (m/min)	Vazão (L/H)	Altura Cam. (cm)	Perda de carga (m)	E (%)
0,00	0	43,8	0,0	0,0
0,07	29	43,8	0,039	0,0
0,08	32	43,9	0,046	0,2
0,14	55	44,3	0,071	1,1
0,20	77	45,0	0,092	2,7
0,26	102	46,0	0,110	5,0
0,35	139	48,1	0,129	9,8
0,42	165	49,9	0,135	13,9
0,52	205	52,6	0,137	20,1
0,60	237	55,4	0,135	26,5
0,71	281	58,5	0,135	33,6
0,81	320	61,5	0,135	40,4
0,92	363	65,2	0,136	48,9
1,07	423	69,2	0,137	58,0

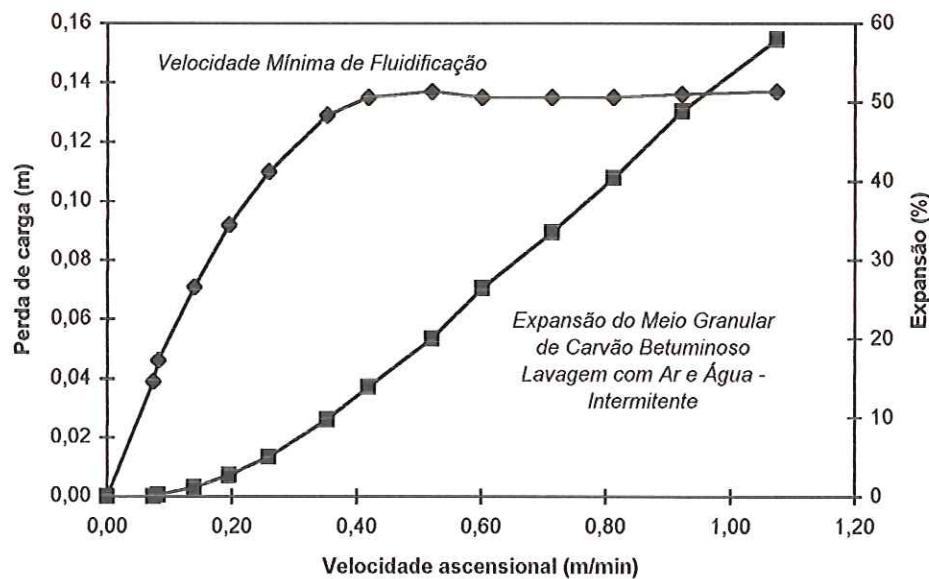


Figura C19 - Velocidade Mínima de Fluidificação e Expansão do Meio Granular

De acordo com a Figura C19:

1) Velocidade Mínima de Fluidificação ( $V_{mf}$ ) = 0,34 m/min

2) Perda de Carga no Meio Fluidificado = 0,135 m

Cálculo da  $V_{mf}$  utilizando-se a equação (20):

Número de Galileu ( $G_a$ ) = 47143  
 $V_{mf}$  = 0,01041 m/s

Cálculo da porosidade utilizando-se a equação (16):

$$\varepsilon_o = 0,49$$

Cálculo da superfície específica dos grãos e coeficiente de esfericidade médio do meio granular:

Equação Linear:  $Y = a + bX$

b=	708731
a=	19116
$r^2$ =	0,99

Superfície específica média dos grãos = 9062 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

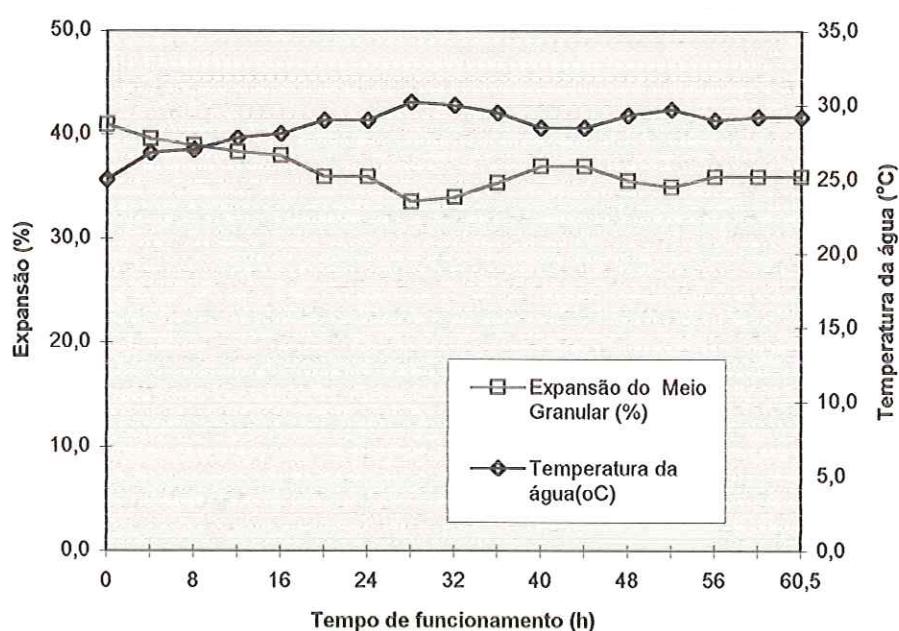
Coeficiente de esfericidade médio:

$$\psi_{med} = 0,57$$

## **ANEXO D**

**Tabela D1 -Leituras de Temperatura da Água e Expansão do Meio Granular correspondentes à Lavagem Contínua com Água**

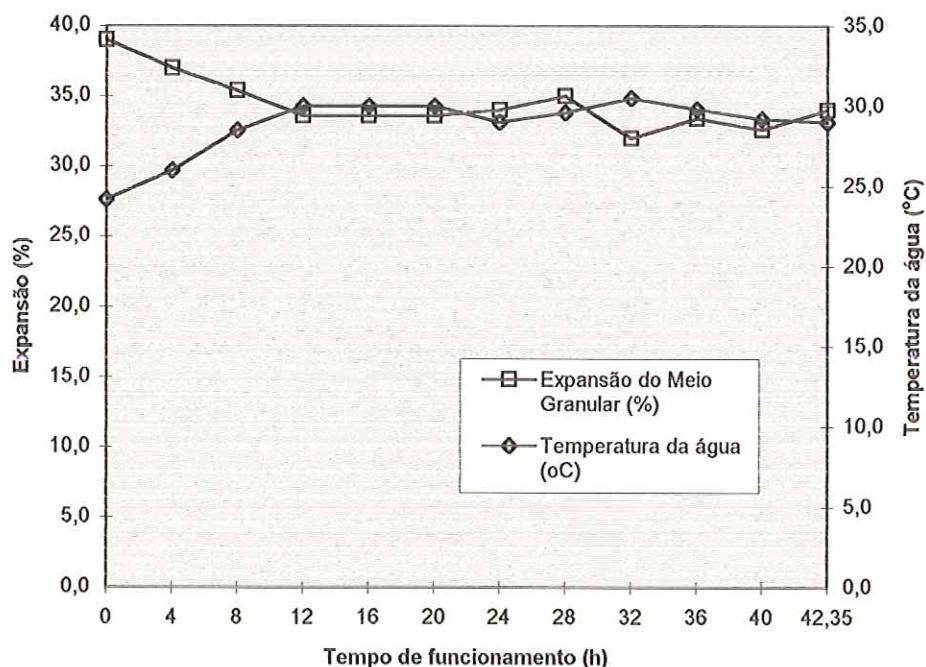
Dia	Tempo de funcionamento (h)	Temperatura da água(°C)	Altura da Camada (cm)	Expansão do Meio Granular (%)
09/04/96	0	25,0	70,5	41,0
09/04/96	4	26,8	69,8	39,6
09/04/96	8	27,0	69,5	39,0
10/04/96	12	27,8	69,2	38,4
10/04/96	16	28,1	69,0	38,0
10/04/96	20	29,0	68,0	36,0
10/04/96	24	29,0	68,0	36,0
10/04/96	28	30,2	66,8	33,6
10/04/96	32	30,0	67,0	34,0
11/04/96	36	29,5	67,7	35,4
11/04/96	40	28,5	68,5	37,0
11/04/96	44	28,5	68,5	37,0
11/04/96	48	29,3	67,8	35,6
11/04/96	52	29,7	67,5	35,0
11/04/96	56	29,0	68,0	36,0
12/04/96	60	29,2	68,0	36,0
12/04/96	60,5	29,2	68,0	36,0



**Figura D1 - Variação da Temperatura da Água e Expansão do Meio Granular Durante Lavagem Contínua com Água**

**Tabela D2 - Leituras de Temperatura da Água e Expansão do Meio Granular correspondentes à Lavagem Contínua com Ar e Água**

Dia	Tempo de funcionamento (h)	Temperatura da água (°C)	Altura da Camada (cm)	Expansão do Meio Granular (%)
13/04/96	0	24,2	69,5	39,0
13/04/96	4	26,0	68,5	37,0
13/04/96	8	28,5	67,7	35,4
13/04/96	12	30,0	66,8	33,6
13/04/96	16	30,0	66,8	33,6
14/04/96	20	30,0	66,8	33,6
14/04/96	24	29,0	67,0	34,0
14/04/96	28	29,6	67,5	35,0
14/04/96	32	30,5	66,0	32,0
14/04/96	36	29,8	66,7	33,4
14/04/96	40	29,2	66,3	32,6
15/04/96	42,35	29,0	67,0	34,0



**Figura D2 - Variação da Temperatura da Água e Expansão do Meio Granular Durante Lavagem Contínua com Ar e Água**

## **ANEXO E**

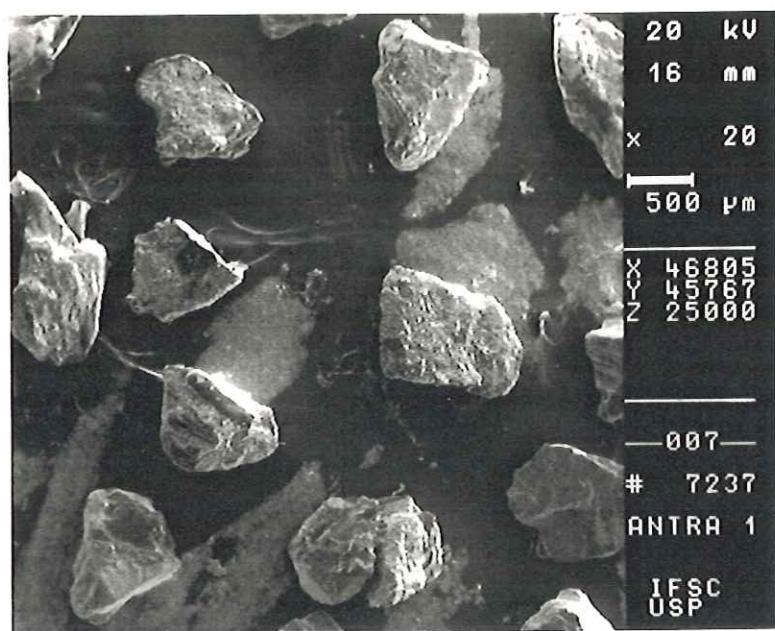


Figura E1 - Fotografia dos grãos correspondentes a faixa granulométrica de 0,59 - 0,71 mm de carvão antracitoso (amostra 2) no estado natural

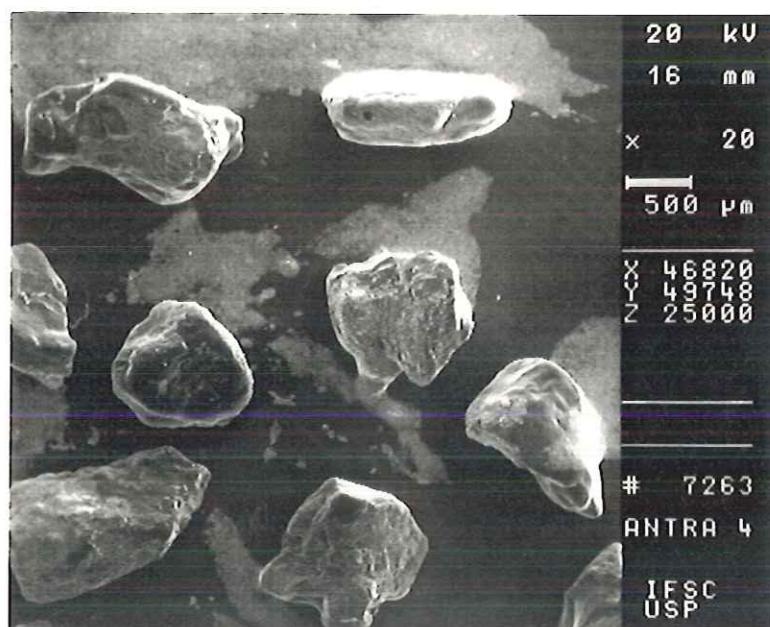


Figura E2 - Fotografia dos grãos correspondentes a faixa granulométrica de 0,59 - 0,71 mm de carvão antracitoso (amostra 2) após lavagens independentes com ar e água

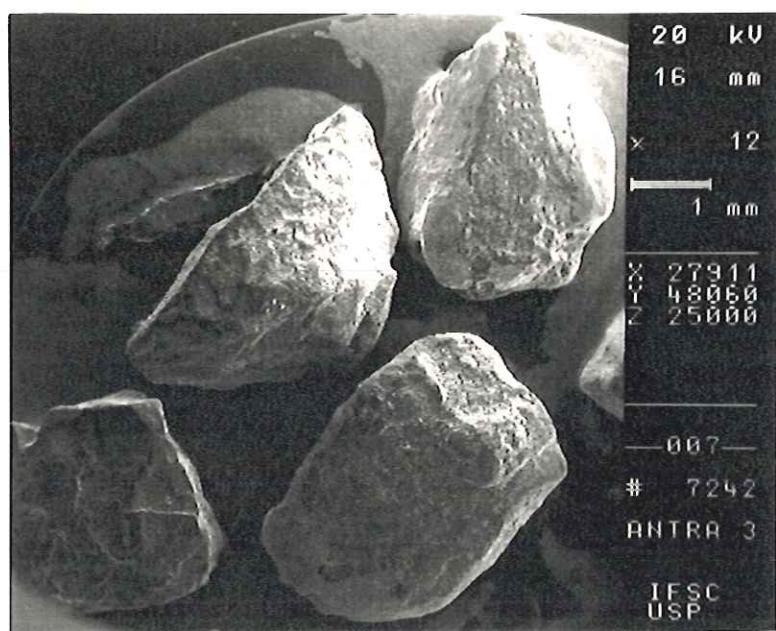


Figura E3 - Fotografia dos grãos correspondentes a faixa granulométrica de 2,00 - 2,40 mm de carvão antracitoso (**amostra 2**) no estado natural

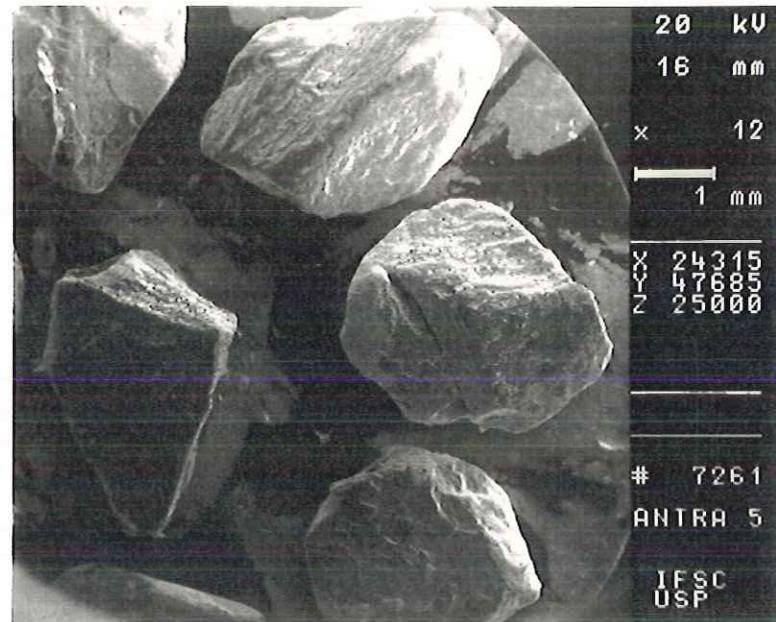


Figura E4 - Fotografia dos grãos correspondentes a faixa granulométrica de 2,00 - 2,40 mm de carvão antracitoso (**amostra 2**) após lavagens intermitentes com ar e água

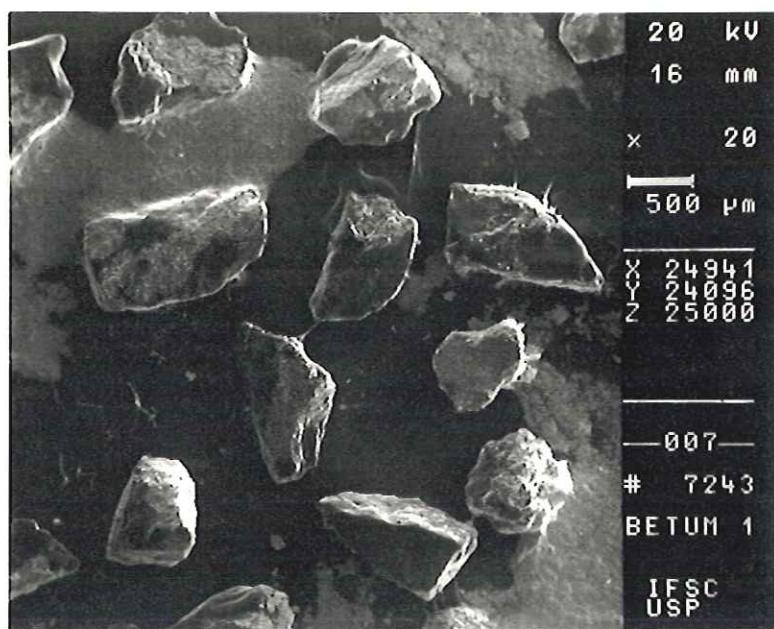


Figura E5 - Fotografia dos grãos correspondentes a faixa granulométrica de 0,59 - 0,71 mm de **carvão betuminoso** no estado natural

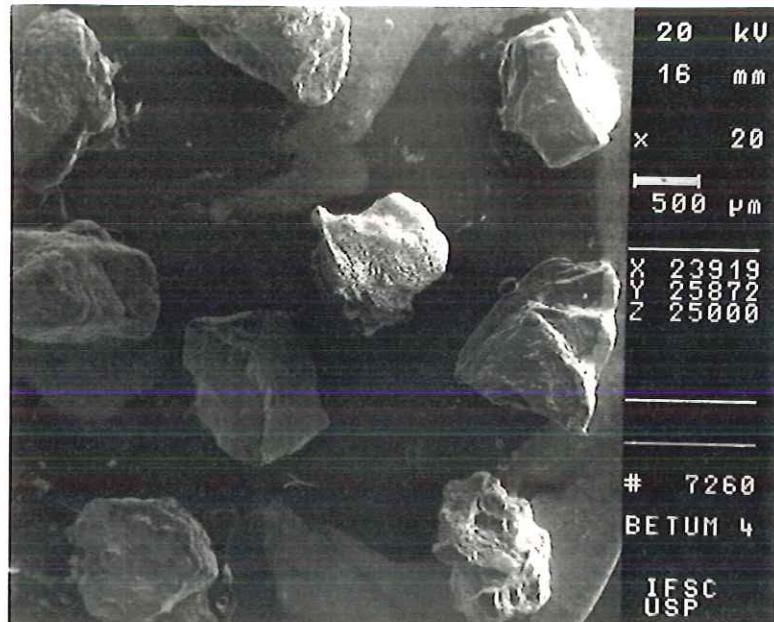


Figura E6 - Fotografia dos grãos correspondentes a faixa granulométrica de 0,59 - 0,71 mm de **carvão betuminoso** após lavagens independentes com ar e água

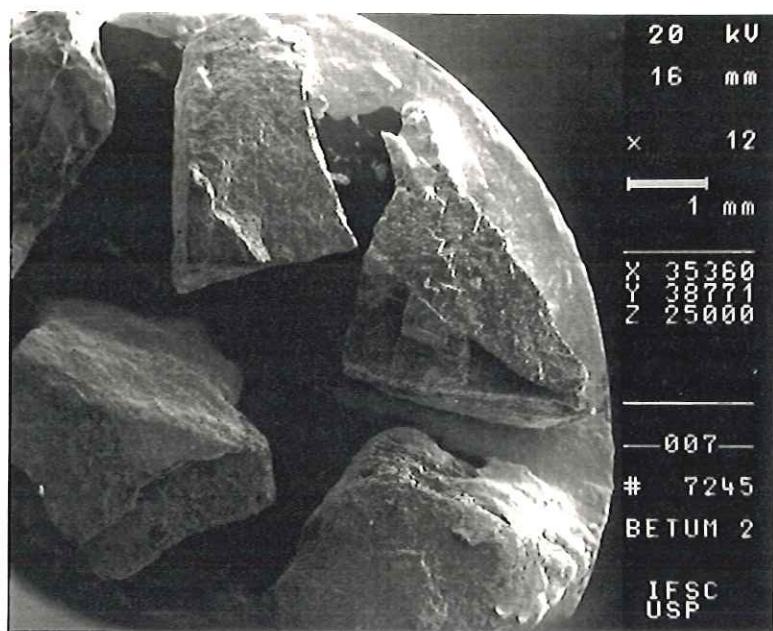


Figura E7 - Fotografia dos grãos correspondentes a faixa granulométrica de 2,00 - 2,40 mm de **carvão betuminoso** no estado natural

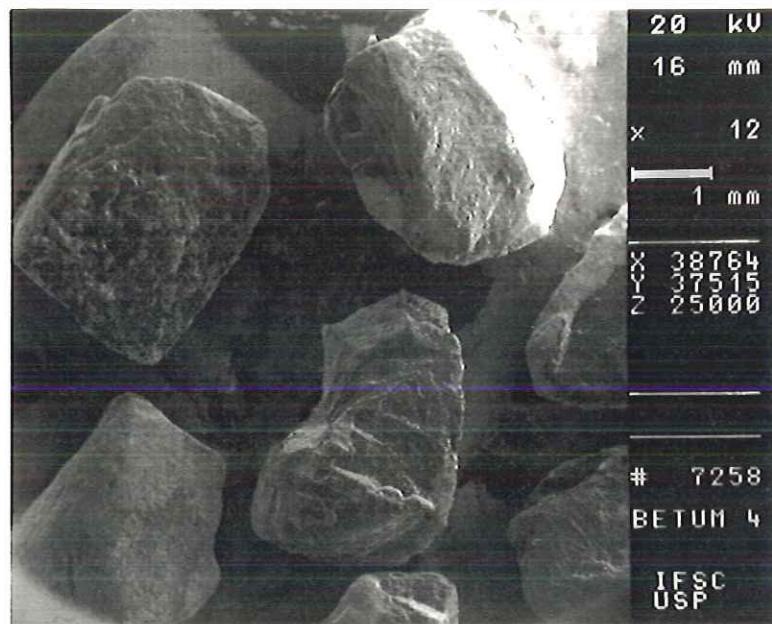


Figura E8 - Fotografia dos grãos correspondentes a faixa granulométrica de 2,00 - 2,40 mm de **carvão betuminoso** após lavagens intermitentes com ar e água

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - MATERIAL FILTRANTE - AREIA, ANTRACITO, PEDREGULHO.  
Projeto 2:09.67-001. Associação Brasileira de Normas Técnicas.  
Dezembro, 1989.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Water Quality and Treatment. 4<sup>th</sup> Edition. New York, Mc Graw Hill, 1991.
- AMIRTHARAJAH, A. & CLEASBY, J.L. Predicting Expansion of Filters During Backwash. Journal American Water Works Association. p 52 - 59. January, 1972.
- AMIRTHARAJAH, A. Optimum Backwashing of Sand Filters. Journal of the Sanitary Engineering Division. p 917 - 932. October, 1978.
- AMIRTHARAJAH, A. Fundamentals and Theory of Air Scour. Journal American Water Works Association. p 573 - 590. June, 1984.
- AMIRTHARAJAH, A. Optimum Backwashing of Filters With Air Scour: A Review. Water Science Technology. p 195 - 211. 1993.
- AWWA Standard for Filtering Material. June, 1989.
- CLEASBY, J.L., ARBOLEDA,J., BURNS, D.E., PRENDIVILLE, P.W. & SAVAGE, E.S. Backwashing of Granular Filters. Journal American Water Works Association. p 115 - 126. February, 1977.
- CLEASBY, J.L. & FAN, K. Predicting Fluidization and Expansion of Filter Media. Journal of the Environmental Engineering Division, Vol.107, June, 1981.
- DI BERNARDO, L. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. Rio de Janeiro, ABES, Vol.2, 1993.
- DIAPER, E.W.J. & IVES, K.J. Filtration Through Size-Graded Media. Journal of the Sanitary Engineering Division. p 89 - 114. June, 1965.
- DHARMARAJAH, A.H. & CLEASBY, J.L. Predicting the Expansion Behavior of Filter Media. Journal American Water Works Association. p 66 - 76. December, 1986.

- FAIR, G.M., GEYER, J.C. & OKUN, D.A. **Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales.** Editorial Limusa, México, Vol. 2, 1971.
- FERREIRA FILHO, S.S. **Estudo Comparativo do Comportamento Hidráulico de Meios Filtrantes de Areia-Antracito e Areia-Carvão Ativado Granular no Tratamento da Água.** Dissertação (Mestrado), 407 p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- HEWITT, S.R. & AMIRTHARAJAH, A. **Air Dynamics Through Filter Media During Air Scour.** Journal American Water Works Association. p 591 - 606. June, 1984.
- HUMBY, M.S. & FITZPATRICK, C.S.B. **Attrition of Granular Filter Media During Backwashing With Combined Air and Water.** Water Research. p 291 - 294. 1996.
- LEINZ, V. & AMARAL, S.E. **Geologia Geral.** 4<sup>a</sup> edição. Companhia Editora Nacional, São Paulo, 1969.
- METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse.** 3<sup>th</sup>ed. New York, Mc Graw Hill, 1985.
- MOHANKA,S.S. **Theory of Multilayer Filtration.** Journal of the Sanitary Engineering Division. p 1079 - 1095. December, 1969.
- ORDÓÑEZ MOLINA, F.R. **Comparação do Desempenho do Carvão Antracitoso e Carvão Betuminoso como Materiais Filtrantes em Filtros de Dupla Camada.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, EESC - USP, São Paulo, 1996.
- PEREIRA, D.M. **Efeitos Térmicos e Radiolíticos em Asfaltenos Estraídos de Carvão Mineral.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, EESC - USP, São Paulo, 1987.
- PEREIRA, D.M. **Extração de Matéria Orgânica de Carvão Mineral com Alcóois no Estado Supercrítico.** Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, EESC - USP, São Paulo, 1993.
- SILVA, Z.C.C. **The rank evaluation of South Brazilian Gondwana coals on the basis of different chemical and physical parameters.** International Journal of Coal Geology. p 21 - 39. 1989.

SUGUIO, K. **Introdução à Sedimentadologia.** Edgard Blucher, São Paulo, 1973.

## **APÊNDICE 1**

## CALIBRAÇÃO DO ROTÂMETRO DE AR

O rotâmetro de ar utilizado nas lavagens com aplicação de ar, foi um rotâmetro de água com capacidade de 200 L/H, o qual foi adaptado e calibrado para medir vazões de ar. A taxa de ar utilizada nos ensaios foi de 15 L/sm<sup>2</sup>, que corresponde a uma vazão de 354 L/H.

O rotâmetro é constituído de duas peças fundamentais, um tubo cônico vertical com o maior diâmetro para cima, onde passa o fluido, e um flutuador de diâmetro levemente inferior ao menor diâmetro do tubo cônico. O fluido passa no tubo cônico de baixo para cima, na área anular entre o flutuador e a parede do tubo; esta área anular aumenta em razão da subida do flutuador. O flutuador que se movimenta verticalmente dentro do tubo, é solicitado por um conjunto de forças que o posicionam a uma certa altura. A posição de equilíbrio dinâmico é atingida quando a soma das forças atuando para cima, efeito do empuxo de Arquimedes e força de arraste do fluido sobre o flutuador, se iguala à força atuando para baixo, força da gravidade sobre o flutuador. Qualquer variação de vazão, como o aumento da vazão, a tendência será aumentar a força de arraste, tendo como consequência a subida do flutuador, com isto, a área anular aumenta fazendo voltar a força de arraste ao valor anterior e o flutuador estaria novamente em equilíbrio dinâmico. A forma e o peso do flutuador, a faixa e a função das variações da área anular em relação à altura determinam as características do medidor para certo conjunto de aplicações. A forma e o material de fabricação do flutuador são muito importantes no tocante aos efeitos da viscosidade sobre a medição.

Os materiais de fabricação do flutuador e suas respectivas massas específicas estão apresentados na Tabela i.

Tabela i - Massa específica dos materiais utilizados na fabricação do flutuador

Material	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
Aço inox 316	8020
Alumínio	2700
Bronze	8470
Hastelloy C	8940
Monel	8840
Níquel	8910
Titânio	4500

Fonte: DELMÉE (1982)

O flutuador do rotâmetro de água, utilizado nos ensaios, é de aço inox; para atingir a vazão de ar necessária foi preciso adaptar um flutuador de material com massa específica mais baixa, utilizando-se alumínio.

Para a calibração do rotâmetro de ar, foi necessário, primeiramente, calibrar uma placa de orifício concêntrico com diâmetro de 1,76 mm. O princípio de funcionamento de uma placa de orifício consiste em introduzir uma restrição localizada na tubulação onde a medição será feita. Esta restrição é provocada pelo orifício, o qual obriga o escoamento a mudar de velocidade e, em consequência, provocar um diferencial de pressões que, devidamente medido e interpretado, é representativo da vazão<sup>(1)</sup>.

---

<sup>(1)</sup> DELMÉE, G.J. Manual de Medição de Vazão. 2<sup>a</sup> edição. São Paulo. Edgard Blücher, 1982.

A calibração da placa de orifício foi feita no Laboratório de Metrologia da EESC, USP, onde já havia um sistema de calibração constituído basicamente pelos seguintes componentes:

- a) tubulação com diâmetro interno de 2" (50,8 mm), na qual foi colocada a placa de orifício;
- b) reservatório de água;
- c) bomba para o recalque da água do reservatório para a tubulação;
- d) válvulas tipo esfera;
- e) tomadas para medição da pressão diferencial localizadas nas flanges que fixavam a placa de orifício na tubulação;
- f) piezômetro.

A água passava pela placa de orifício e escoava livremente em um balde com capacidade de 20 litros; eram feitas medições volumétricas, utilizando-se cronômetro, termômetro e balança com precisão de 0,0001 g. O balde era pesado antes de cada medição, tomando-se o cuidado em eliminar gotas de água que poderiam causar alterações significativas no seu peso inicial. Para cada medição volumétrica era anotada a pressão diferencial indicada no piezômetro.

O coeficiente de escoamento ( $K$ ), que depende do número de Reynolds e da relação do diâmetro do orifício pelo diâmetro da tubulação, está relacionado diretamente com a localização das tomadas de pressão, portanto foi preciso coletar dados para a construção da curva (ver Figura i) que relaciona estes elementos. O coeficiente de escoamento é determinado pela seguinte equação:

$$K = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (i)$$

em que:

$K$  = coeficiente de escoamento

$C$  = coeficiente de descarga

$$\beta = \frac{d_o}{D_t} \quad (\text{ii})$$

em que:

$d_o$  = diâmetro do orifício (L)

$D_t$  = diâmetro do tubo (L)

O coeficiente de descarga relaciona a descarga real determinada volumetricamente, com a descarga teórica:

$$C = \frac{D_{real}}{D_{th}} \quad (\text{iii})$$

em que:

$D_{real}$  = descarga real do fluido ( $MT^{-1}$ )

$D_{th}$  = descarga teórica do fluido ( $MT^{-1}$ )

Com a massa de água e o tempo obtidos através das medições volumétricas, foi calculada a descarga real do fluido pela seguinte equação:

$$D_{real} = \frac{M_{água}}{T} \quad (\text{iv})$$

em que :

$M_{água}$  = massa de água (M)

T = tempo (T)

A descarga teórica do fluido é calculada pela equação:

$$D_{th} = A_o \rho_a V_{th} \quad (\text{v})$$

em que:

$A_o$  = área do orifício ( $L^2$ )

$\rho_a$  = massa específica da água ( $ML^{-3}$ )

$V_{th}$  = velocidade teórica de escoamento ( $LT^{-1}$ )

$$V_{th} = \sqrt{2gh} \quad (vi)$$

em que:

$g$  = aceleração da gravidade ( $L T^{-2}$ )

$h$  = pressão diferencial ( $L$ )

Com os valores de descarga real e descarga teórica foi determinado o número de Reynolds:

$$Re = \frac{4D_{real}}{D_t \pi V_{água}} \quad (vii)$$

em que:

$Re$  = número de Reynolds

$\nu_{água}$  = viscosidade absoluta da água ( $L^2 T^{-1}$ )

A descarga real é a vazão mássica de água, portanto dividindo-se a vazão mássica pela massa específica da água, tem-se a vazão de água na placa de orifício:

$$Q_{água} = \frac{D_{real}}{\rho_{água}} \quad (viii)$$

em que:

$Q_{água}$  = vazão de água ( $L^3 T^{-1}$ )

$\rho_{água}$  = massa específica da água ( $ML^{-3}$ )

Para obter os valores de vazão de ar na placa de orifício, foi considerado desprezível o efeito de compressibilidade do ar, devido a vazão de ar ser muito baixa; sendo assim, o coeficiente de escoamento permanece o mesmo para água e para o ar. Portanto, igualando-se o número de Reynolds para o escoamento de água com o número de Reynolds para o escoamento de ar, foi determinada a vazão de ar correspondente a vazão de água na placa de orifício, utilizando-se a seguinte equação:

$$Q_{ar} = \frac{Q_{água} v_{ar}}{\nu_{água}} \quad (ix)$$

em que:

$Q_{ar}$  = vazão de ar ( $L^3 T^{-1}$ )

$\nu_{ar}$  = viscosidade absoluta do ar ( $L^2 T^{-1}$ )

Após a calibração da placa de orifício com água, foi instalado o rotâmetro em série com a placa e um compressor de ar de  $\frac{1}{2}$  HP do tipo rotativo, sem reservatório. Foram feitas medidas de pressão diferencial no piezômetro para vazões de ar utilizando-se como indicação a mesma escala do rotâmetro de água, que foram relacionadas com as medidas de pressão diferencial feitas na placa de orifício.

Os dados experimentais da calibração da placa de orifício (com água) estão apresentados na Tabela ii. Na Tabela iii estão mostrados os resultados de  $D_{real}$ ,  $V_{th}$ ,  $D_{th}$ ,  $C$ ,  $K$  e  $Re$ , em seguida está a curva que relaciona o número de Reynolds com os valores dos coeficientes de escoamento para as vazões determinadas. Na Tabela iv estão mostradas as vazões de água e as respectivas vazões de ar na placa de orifício. Para cada vazão está indicada a descarga real obtida nos ensaios experimentais, bem como o número de medições feitas.

Na Tabela v estão apresentados os dados obtidos na calibração do rotâmetro, utilizando-se como fluido o ar.

**Tabela ii - Dados experimentais da calibração da placa de orifício (com água)**

Número	h(cm de H <sub>2</sub> O)	Mbalde+ág.(g)	Mbalde (g)	Mágua (g)	Tempo (s)	Tágua (°C)
1	154,0	11066,76	744,54	10322,22	1200,5	22,0
2	136,4	10482,40	745,09	9737,31	1200,65	22,0
3	111,8	9574,62	745,1	8829,52	1200,64	22,0
4	104,6	9297,47	745,68	8551,79	1200,76	22,1
5	86,2	8535,01	745,24	7789,77	1200,77	22,2
6	70,0	7831,67	744,78	7086,89	1200,69	22,0
7	62,4	9108,81	745,63	8363,18	1500,68	22,1
8	50,5	8280,33	745,56	7534,77	1500,61	22,1
9	44,1	7803,24	745,28	7057,96	1500,82	22,1
10	40,4	8814,85	744,95	8069,90	1801,38	22,2
11	28,0	7578,35	744,08	6834,27	1800,66	22,3
12	15,4	6688,04	745,35	5942,69	2100,51	22,5
13	10,2	7061,38	745,32	6316,06	2700,53	22,5
14	5,8	7185,88	744,11	6441,77	3600,47	23,0

**Dados:**

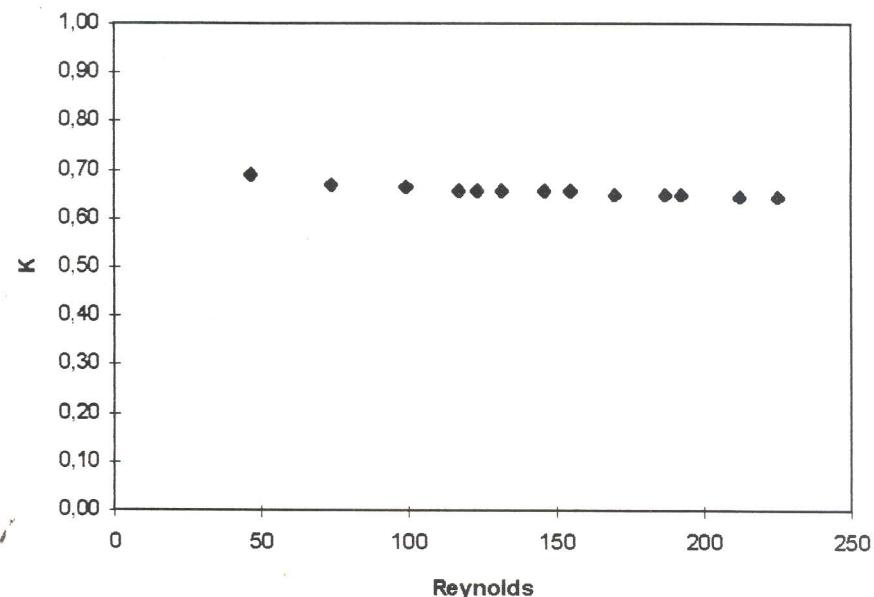
$$\begin{aligned} \text{Diâmetro do orifício (d<sub>o</sub>)} &= 0,00176 \text{ m} & \text{Beta} &= 0,0346 \\ \text{Diâmetro do tubo (D<sub>t</sub>)} &= 0,0508 \text{ m} \\ \text{Massa específica da água (T=22,2°C)} &= 997,716 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Viscosidade absoluta da água (T= 22,2°C)} &= 0,95616 \cdot 10^{-3} \text{ Ns/m}^2 \\ \text{Área do tubo (A<sub>t</sub>)} &= 0,00202683 \text{ m}^2 \\ \text{Área do orifício (A<sub>o</sub>)} &= 2,43285E-06 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

**Cálculos:**

**Tabela iii - Cálculos referentes aos dados da Tabela ii**

Número	Dreal (kg/s)	Vth (m/s)	Dth (kg/s)	C	K	Rey
1	0,00860	5,4968	0,01334	0,6444	0,6444	225,39
2	0,00811	5,1732	0,01256	0,6459	0,6459	212,59
3	0,00735	4,6835	0,01137	0,6469	0,6469	192,77
4	0,00712	4,5302	0,01100	0,6477	0,6477	186,69
5	0,00649	4,1125	0,00998	0,6499	0,6499	170,05
6	0,00590	3,7059	0,00900	0,6562	0,6562	154,72
7	0,00557	3,4990	0,00849	0,6562	0,6562	146,08
8	0,00502	3,1477	0,00764	0,6572	0,6572	131,62
9	0,00470	2,9415	0,00714	0,6587	0,6587	123,27
10	0,00448	2,8154	0,00683	0,6555	0,6555	117,43
11	0,00380	2,3438	0,00569	0,6671	0,6671	99,49
12	0,00283	1,7382	0,00422	0,6705	0,6705	74,16
13	0,00234	1,4147	0,00343	0,6811	0,6811	61,31
14	0,00179	1,0668	0,00259	0,6910	0,6910	46,90

**Gráfico i - Número de Reynolds x Coeficiente de Escoamento**



**Tabela iv - Vazões de água e de ar correspondentes às descargas reais:**

Número	Dreal (kg/s)	Qágua (m <sup>3</sup> /s)	Qar (m <sup>3</sup> /s)	Qar (L/h)
1	0,00860	8,618E-06	0,0001370	493,3
2	0,00811	8,1286E-06	0,0001292	465,3
3	0,00735	7,3708E-06	0,0001172	421,9
4	0,00712	7,1383E-06	0,0001135	408,6
5	0,00649	6,5022E-06	0,0001034	372,2
6	0,00590	5,9159E-06	9,4059E-05	338,6
7	0,00557	5,5857E-06	8,881E-05	319,7
8	0,00502	5,0326E-06	8,0016E-05	288,1
9	0,00470	4,7135E-06	7,4942E-05	269,8
10	0,00448	4,4901E-06	7,139E-05	257,0
11	0,00380	3,8041E-06	6,0484E-05	217,7
12	0,00283	2,8356E-06	4,5085E-05	162,3
13	0,00234	2,3442E-06	3,7271E-05	134,2
14	0,00179	1,7932E-06	2,8512E-05	102,6

**Tabela v - Dados experimentais obtidos na calibração do rotâmetro (com ar)**

Número	Posição do flutuador(L/h)	h placa(cm)
1	120	155,1
2	110	141,6
3	100	117,2
4	90	95,3
5	80	76,9
6	70	58,1
7	61	43,9
8	50	30,7
9	40	19,3
10	30	10,5
11	20	4,6

**Dados:**

Pressão atmosférica = 692,8 mmHg

Temperatura ambiente = 23,0°C

Massa específica do ar = 1,192 kg/m<sup>3</sup>

Viscosidade absoluta do ar= 1,83\*10<sup>-5</sup> Ns/m<sup>2</sup>

Calor específico do ar (cp/cv) = 1,40

Aceleração da gravidade = 9,81 m/s<sup>2</sup>

Para a vazão de ar de 354 L/H, a pressão diferencial é 76,0 cm, portanto para esta pressão diferencial, a posição do flutuador corresponde a 80 L/H na escala do rotâmetro.