

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

**PERDA DE CARGA PROVOCADA POR
ESCOAMENTO HETEROGÊNEO EM CONDUTOS
HORIZONTAIS**

PAULO EDUARDO DOS SANTOS SOLDERA

**CAMPINAS, S.P.
2001**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**PERDA DE CARGA PROVOCADA POR ESCOAMENTO
HETEROGÊNEO EM CONDUTOS HORIZONTAIS**

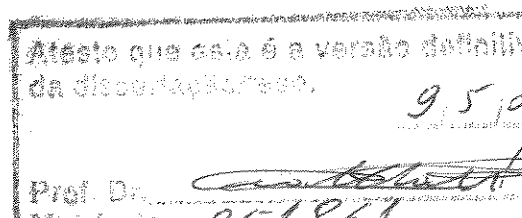
PAULO EDUARDO DOS SANTOS SOLDERA

Orientador:

Evaldo Miranda Coidado

Dissertação de mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos.

**CAMPINAS, S.P.
2001**



78291102

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

So42p

Soldera, Paulo Eduardo dos Santos

Perda de carga provocada por escoamento heterogêneo em condutos horizontais / Paulo Eduardo dos Santos Soldera. --Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientador: Evaldo Miranda Coiado.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Tubulações. 2. Escoamento bifásico. 3. Transporte de sedimento. 4. Tubulação - hidrodinâmica. I. Coiado, Evaldo Miranda. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Evaldo Miranda Coiado pela orientação, profissionalismo, paciência nos momentos difíceis e pelo estímulo à investigação científica.

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pela presteza, agilidade e apoio financeiro, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Paulo Soldera e Aurora Giantomassi dos Santos Soldera e às minhas irmãs Silvana Soldera e Sílvia Soldera, pelo incentivo e apoio necessário.

Aos funcionários da Pós-graduação Paula, Carlos, Sandra e Ivaldo pelos serviços prestados.

Aos amigos Obadias, Alexandre Pansani, Marcelo Balbino, Acácio Galvão, Renata Martins, Érika, Prof. Edson, Fábio Mateus, Laura, Vivien, Ana Paula, Antonio Carlos Bettarello, Oswaldo Buzollin e Evandro Machado pela amizade e pela solidariedade nos momentos mais difíceis.

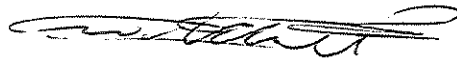
Aos funcionários Carlos Alcaide, Marcelo Barros e aos estagiários Ronei, Arae e Rafael pelo total apoio durante o processo de montagem da Bancada de Ensaios, coleta de dados e manutenção do equipamento do laboratório e pela amizade.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**PERDA DE CARGA PROVOCADA POR ESCOAMENTO
HETEROGÊNIO EM CONDUTOS HORIZONTAIS**

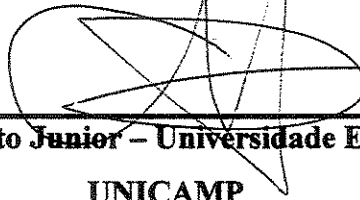
Paulo Eduardo dos Santos Soldera

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. Evaldo Miranda Coiado

Presidente e Orientador/ Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP



**Prof. Dr. Edevar Luvizotto Junior – Universidade Estadual de Campinas –
UNICAMP**



**Prof. Dr. Antonio Augusto dos Santos Nogueira – Universidade de São Paulo –
EPUSP - USP**

Campinas, 29 de março de 2001

SUMÁRIO

	página
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xix
RESUMO.....	xxi
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 OBJETIVOS.....	03
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	05
3.1 Velocidades de distinção entre os Regimes de Escoamentos.....	07
3.1.1 Velocidade Crítica (V_c) e Velocidade de Sedimentação (V_{cs})	11
3.2 Perda de Carga Provocada por Misturas Sólido-Líquidas no Regime Heterogêneo.....	19
4 MATERIAIS.....	25
4.1 Reservatório Principal.....	26
4.2 Sistema De Medidas Gravimétricas.....	27
4.3 Tanque De Descarga.....	27
4.4 Bomba Principal.....	27
4.5 Bomba Misturadora 1.....	28
4.6 Bomba Misturadora 2.....	28
4.7 Canalização De Sucção.....	28
4.8 Canalização De Recalque.....	29
4.9 Desviador Rotacional De Fluxo.....	29
4.10 Medidas.....	29

4.10.1	Medições da Vazão e da Concentração Média do Sólido da Mistura.....	29
4.10.2	Volume da Mistura ou Água no Tanque Volumétrico.....	30
4.10.3	Perdas De Carga.....	30
5	METODOLOGIA.....	33
5.1	Cálculo de Vazão.....	33
5.1.1	Cálculo da Concentração Média do Sólido Na Mistura.....	33
5.1.2	Preparo das Misturas Sólido-Líquidas.....	34
5.1.2.1	Preparação das Areia.....	34
5.1.2.2	Preparo do Calcário.....	35
5.1.2.3	Caracterização dos sólidos.....	35
5.1.2.4	Análise Granulométrica Conjunta.....	36
5.1.2.5	Análises Granulométricas dos Sólidos	36
5.1.2.6	Determinação do Peso Específico Real pelo Método do Picnômetro	39
5.1.2.7	Preparo das Misturas de Água e Sólidos.....	41
5.2	Mistura Sólido-Líquido no Reservatório Principal	42
5.3	Velocidade de Escoamento do Sistema.....	42
5.4	Perdas de Carga.....	43
5.5	Concentrações das Misturas	45
5.5.1	Perfis de Concentração do Tubo	47
5.6	Velocidade Crítica de Sedimentação.....	49
5.7	Análise de dados.....	50
5.8	Dificuldades de Operação do Sistema	50
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
6.1	Ensaio com água limpa.....	53
6.2	Ensaio com a Mistura Água-Areia.....	54
6.2.1	Análise de Dados – Curvas de Perda de Carga em função da Velocidade Média do escoamento	54
6.2.2	Relação entre as Curvas.....	54
6.2.3	Velocidade Crítica de Sedimentação.....	56
6.2.4	Parâmetro K_D	60
6.3	Ensaio com a mistura água-Calcário.....	65

6.3.1	Análise de Dados – Curvas de Perda de Carga em Função da Velocidade Média do escoamento.....	65
6.3.2	Relação entre as Curvas.....	66
6.3.3	Velocidade Crítica de Sedimentação.....	67
6.3.4	Perfil de Concentração na Tubulação.....	69
6.3.5	Parâmetro K_D	71
6.3.6	Viabilidade do Hidrotransporte da Mistura água-Calcário.....	81
7	CONCLUSÕES.....	83
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
	ABSTRACT.....	89
	ANEXOS.....	91
	Anexo A – Tabelas com planilhas de cálculos dos ensaios com mistura água-areia.....	93
	Anexo B – Curvas de Perda de Carga em função da velocidade média do escoamento – Mistura água-areia.....	99
	Anexo C – Tabelas com planilhas de cálculos de J_l , J_m , Φ e K_D para a mistura água-areia.....	105
	Anexo D - Tabelas com planilhas de cálculos dos ensaios com mistura água-calcário.....	109
	Anexo E – Curvas de Perda de Carga em função da velocidade média do escoamento. Mistura água-calcário.....	113

LISTA DE FIGURAS

	página
FIGURA 3.1 – Perda de Carga (J) em função da velocidade média – Regime de Escoamentos.....	07
FIGURA 3.2 – Corte transversal da tubulação – Escoamento heterogêneo com leito estacionário.....	08
FIGURA 3.3 – Corte transversal da tubulação – Velocidade crítica de sedimentação (V_{CS}) – Iminência de todos os grãos de sedimento do leito estacionário entrarem em movimento.....	08
FIGURA 3.4 – Corte transversal da tubulação –Distribuição da concentração ao longo vertical do tubo.....	09
FIGURA 3.5 – Corte transversal da tubulação – Escoamento homogêneo – Distribuição uniforme de sólidos ao longo do tubo	10
FIGURA 3.6 – Corte transversal da tubulação – C e C_A – Distribuição de concentrações.....	11
FIGURA 3.7 –Valor de F_L da correlação de Durand para grãos uniformes	14
FIGURA 3.8 – Velocidade limite de sedimentação para material não uniforme de DURAND & CODOLIOS apud VANONI (1977)	14
FIGURA 3.9 – Relação entre $V_{CS}/V_{CS\ Max}$ em função da concentração volumétrica do sólido – Obtidos dos experimento de SINCLAIR (1962).....	16
FIGURA 3.10 – Correlação de velocidade crítica de CONDOLIOS & CHAPUS (1963).....	17
FIGURA 4.1 – Bancada de Ensaios.....	26
FIGURA 4.2 – Curva de calibração do tanque volumétrico.....	30
FIGURA 4.3 – Posição da tomadas de pressão	31

FIGURA 4.4 – Tubulação de recalque com as tomadas de pressão instaladas.....	31
FIGURA 4.5 – Esquema das tomadas de pressão no tubo.....	32
FIGURA 4.6 – Esquema de instalação da tomada de pressão na tubulação.....	32
FIGURA 5.1 –Areia armazenada no reservatório	34
FIGURA 5.2 – Calcário armazenado no reservatório	35
FIGURA 5.3 – Curva granulométrica da areia	38
FIGURA 5.4 – Curva granulométrica do calcário.....	39
FIGURA 5.5 – Ensaio de densidade real do calcário – Bomba de vácuo e balão volumétrico com a mistura água-calcário.....	41
FIGURA 5.6 – Mistura de sólido no reservatório principal	42
FIGURA 5.7 – Transdutores diferenciados de pressão	43
FIGURA 5.8 – Tela de apresentação do aplicativo Elipse Windows – Início de Batelada	44
FIGURA 5.9 – Planilha de dados de vazão, perda de carga do aplicativo Elipse Windows.....	44
FIGURA 5.10 – Medidor de nível instalado no tanque volumétrico	46
FIGURA 5.11 – Balança de precisão	46
FIGURA 5.12 – Esquema do Tubo de Pitot	47
FIGURA 5.13 –Tubo de Pitot instalado na tubulação de recalque.....	48
FIGURA 5.14 – Tubo de Pitot ligado à mangueira “cristal” para levar a mistura ao béquer.....	48
FIGURA 5.15 – Tubo de acrílico com leito estacionário de areia	49
FIGURA 5.16 – Curva da tubulação obstruída pela areia.....	51
FIGURA 6.1 – Perda de carga em função da velocidade – Água limpa.....	53
FIGURA 6.2 – Curvas das perdas de carga em função das velocidades médias – Fase sólida da mistura:Areia com várias concentrações em volume – Variação crescente de velocidades.....	55
FIGURA 6.3 - Curvas das perdas de carga em função das velocidades médias – Fase sólida da mistura:Areia com várias concentrações em volume – Variação decrescente de velocidades.....	55
FIGURA 6.4 - Curvas ajustadas das perdas de carga em função das velocidades médias – Fase sólida da mistura:Areia com várias concentrações em volume – Variação crescente de velocidades.....	56

FIGURA 6.5 - Curvas ajustadas das perdas de carga em função das velocidades médias – Fase sólida da mistura: Areia com várias concentrações em volume – Variação decrescente de velocidades.....	56
FIGURA 6.6 - Curvas ajustadas de perda de carga em função de velocidade média - Curvas comparativas entre variações crescente e decrescente de velocidades – Concentrações de 6,61% e 7,15%.....	57
FIGURA 6.7 - Curvas ajustadas de perda de carga em função de velocidade média - Curvas comparativas entre variações crescente e decrescente de velocidades – Concentrações de 10,69% e 9,89%	57
FIGURA 6.8 - Curvas ajustadas de perda de carga em função de velocidade média - Curvas comparativas entre variações crescente e decrescente de velocidades – Concentrações de 13,12% e 13,24%.....	58
FIGURA 6.9 - Curvas ajustadas de perda de carga em função de velocidade média - Curvas comparativas entre variações crescente e decrescente de velocidades – Concentrações de 15,36% e 16,09%.....	58
FIGURA 6.10 - Curvas ajustadas de perda de carga em função de velocidade média - Curvas comparativas entre variações crescente e decrescente de velocidades – Concentrações de 18,86% e 18,33%.....	58
FIGURA 6.11 - Curvas ajustadas de perda de carga em função de velocidade média - Curvas comparativas entre variações crescente e decrescente de velocidades – Concentrações de 21,29% e 21,10%	59
FIGURA 6.12 – Curva K_D em função da velocidade média – Fase sólida: areia com várias concentrações em volume – Variação crescente de velocidade	61
FIGURA 6.13 - Curva K_D em função da velocidade média – Fase sólida: areia com várias concentrações em volume – Variação decrescente de velocidade	62
FIGURA 6.14 - Curva K_D em função do número de Reynolds – Fase sólida: areia com várias concentrações em volume – Variação crescente de velocidade	63
FIGURA 6.15 - Curva K_D em função do número de Reynolds – Fase sólida: areia com várias concentrações em volume – Variação decrescente de velocidade	63

FIGURA 6.16 - Curva K_D em função Froude – Fase sólida: areia com várias concentrações em volume – Variação crescente de velocidade	64
FIGURA 6.17 - - Curva K_D em função Froude – Fase sólida: areia com várias concentrações em volume – Variação decrescente de velocidade	64
FIGURA 6.18 - Perda de carga em função da velocidade – Água limpa – Referência para os ensaios com calcário.....	65
FIGURA 6.19 – Curvas de Perda de Carga em função da velocidade média – Concentração de calcário e água limpa	66
FIGURA 6.20 - Curvas ajustadas de Perda de Carga em função da velocidade média – Concentração de calcário e água limpa	66
FIGURA 6.21 - Curvas de Perda de Carga em função da velocidade média – Água limpa e várias concentrações – Velocidades críticas de sedimentação calculadas através da Equação (3.17): BAIN & BONNINGTON (1970).....	67
FIGURA 6.22 - Curvas de Perda de Carga em função da velocidade média – Água limpa e várias concentrações – Velocidades críticas de sedimentação calculadas através da Equação CAIRNS et alli CHIEN, SZE-FOO.....	68
FIGURA 6.23 - Curvas de Perda de Carga em função da velocidade média – Água limpa e várias concentrações – Velocidades críticas de sedimentação calculadas através da Equação SHOOK et alli.....	68
FIGURA 6.24 - Curvas de Perda de Carga em função da velocidade média – Água limpa e várias concentrações – Velocidades críticas de sedimentação calculadas através da Equação ZANDI & GOVATOS (1967).....	68
FIGURA 6.25 – Perfis de concentração do calcário obtidos através do Tubo de Pitot para velocidade média de 6,12 m/s	70
FIGURA 6.26 - Perfis de concentração do calcário obtidos através do Tubo de Pitot para velocidade média de 6,47 m/s	71
FIGURA 6.27 - Perfis de concentração do calcário obtidos através do Tubo de Pitot para velocidade média de 6,81 m/s	71
FIGURA 6.28 – Curva de fator de atrito em função do número de Reynolds – Fase sólida da mistura: Calcário com 9,29% de concentração em volume.....	75

FIGURA 6.29 - Curva de fator de atrito em função do número de Reynolds – Fase sólida da mistura: Calcário com 14,68% de concentração em volume.....	75
FIGURA 6.30 - Curva de fator de atrito em função do número de Reynolds – Fase sólida da mistura: Calcário com 17,48% de concentração em volume.....	75
FIGURA 6.31 – Curva de fator de atrito em função do número de Reynolds – Fase sólida da mistura: Calcário com 18,29% de concentração em volume.....	76
FIGURA 6.32 - Curva de fator de atrito em função do número de Reynolds – Fase sólida da mistura: Calcário com 22,02% de concentração em volume.....	76
FIGURA 6.33 - Curva de fator de atrito em função do número de Reynolds – Fase sólida da mistura: Calcário com 26,29% de concentração em volume.....	76
FIGURA 6.34 – Curva de fator de atrito (f) em função do número de Reynolds – Fase sólida da mistura: calcário com 9,29% de concentração em volume.....	79
FIGURA 6.35 - Curva de fator de atrito (f) em função do número de Reynolds – Fase sólida da mistura: calcário com 14,68% de concentração em volume.....	79
FIGURA 6.36 - Curva de fator de atrito (f) em função do número de Reynolds – Fase sólida da mistura: calcário com 17,48% de concentração em volume.....	79
FIGURA 6.37 - Curva de fator de atrito (f) em função do número de Reynolds – Fase sólida da mistura: calcário com 18,29% de concentração em volume.....	80
FIGURA 6.38 - Curva de fator de atrito (f) em função do número de Reynolds – Fase sólida da mistura: calcário com 22,02% de concentração em volume.....	80
FIGURA 6.39 - Curva de fator de atrito (f) em função do número de Reynolds – Fase sólida da mistura: calcário com 26,29% de concentração em volume.....	80
FIGURA 6.40 – Amostra da mistura água-calcário coletada.....	81
FIGURA 6.41 – Amostra da mistura água-calcário sendo armazenada no cadinho para sofrer processo de secagem.....	82
FIGURA 6.42 – Amostra de calcário seca e com as características originais.....	82
FIGURA B.1 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 6,61% de concentração em volume – Variação crescente de velocidade.....	100
FIGURA B.2 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 10,69% de concentração em volume – Variação crescente de velocidade.....	100

FIGURA B.3 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 13,12% de concentração em volume – Variação crescente de velocidade....	100
FIGURA B.4 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 15,36% de concentração em volume – Variação crescente de velocidade....	101
FIGURA B.5 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 18,86% de concentração em volume – Variação crescente de velocidade....	101
FIGURA B.6 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 21,29% de concentração em volume – Variação crescente de velocidade....	101
FIGURA B.7 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 7,15% de concentração em volume – Variação decrescente de velocidade..	102
FIGURA B.8 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 9,89% de concentração em volume – Variação decrescente de velocidade..	102
FIGURA B.9 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 13,24% de concentração em volume – Variação decrescente de velocidade.....	102
FIGURA B.10 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 16,09% de concentração em volume – Variação decrescente de velocidade.....	103
FIGURA B.11 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 18,33% de concentração em volume – Variação decrescente de velocidade.....	103
FIGURA B.12 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 21,10% de concentração em volume – Variação decrescente de velocidade.....	103
FIGURA E.1 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 9,29% de concentração em volume	114
FIGURA E.2 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 14,68% de concentração em volume	114
FIGURA E.3 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 17,48% de concentração em volume	114

FIGURA E.4 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 18,29% de concentração em volume	115
FIGURA E.5 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 22,02% de concentração em volume	115
FIGURA E.6 – Curva da perda de carga em função da velocidade média – Fase sólida: areia com 26,29% de concentração em volume	115

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 – Análise granulométrica por peneiramento da areia	36
TABELA 5.2 – Análise granulométrica por peneiramento do calcário.....	37
TABELA 5.3 – Análise granulométrica por sedimentação da areia	37
TABELA 5.4 – Análise granulométrica por sedimentação do calcário	38
TABELA 5.5 – Análise de densidade real da areia	40
TABELA 5.6 - Análise de densidade real do calcário	40
TABELA 6.1 – Planilha de cálculo de V_{CS} para cada concentração	67
TABELA 6.2 – Perfil vertical de concentração em volume ao longo do tubo	70
TABELA 6.3 – Valores de fator de atrito f calculados para cada concentração, número de Reynolds e velocidade média.....	74
TABELA 6.4 - Valores de fator de atrito f calculados para cada concentração, número de Reynolds e velocidade média.....	74
TABELA 6.5 – Planilha de cálculos de f em função do número de Reynolds e da concentração da Equação (6.11).....	78
TABELA A1 – Ensaio com variação crescente de velocidades para a mistura água-areia – Concentrações médias do sólido expressas em volume: 6,61%, 10,69% e 13,12%.....	94
TABELA A 2 – Ensaio com variação crescente de velocidades para a mistura água-areia – Concentrações médias do sólido expressas em volume: 15,36%, 18,86% e 21,29%.....	95
TABELA A 3 – Ensaio com variação decrescente de velocidades para a mistura água-areia – Concentrações médias do sólido expressas em volume: 7,15%, 9,89% e 13,24%.....	96

TABELA A 4 – Ensaio com variação decrescente de velocidades para a mistura água-areia – Concentrações médias do sólido expressas em volume: 16,09%, 18,33% e 21,10%.....	97
TABELA C.1 – Planilha de cálculos dos parâmetros J_l, J_m e Φ para cada concentração da mistura água-areia - Variação crescente de velocidades.....	106
TABELA C.2 – Planilha de cálculos dos parâmetros J_l, J_m e Φ para cada concentração da mistura água-areia - Variação decrescente de velocidades.....	107
TABELA C.3 – Planilha de cálculos de K_D – Variação crescente de velocidades	108
TABELA C.4 – Planilha de cálculos de K_D – Variação decrescente de velocidades	108
TABELA D.1 – Ensaio com variação decrescente para a mistura água-calcário.....	110
TABELA D.2 – Ensaio com variação decrescente para a mistura água-calcário.....	111

LISTA DE SÍMBOLOS

$C = \phi$ = Concentração Volumétrica [1]

C_c = Coeficiente de Correlação [1]

$C_d = C_D$ = Coeficiente de Arraste da partícula [1]

$C_i(\%)$ = Concentração volumétrica expressa em porcentagem [%]

C_w = concentração em peso [%]

d = Diâmetro da partícula [L]

D = Diâmetro do duto [L]

d_{50} = Diâmetro da partícula tal que 50% da amostra tem diâmetro inferior a ela [L]

d_{65} = Diâmetro da partícula tal que 65% da amostra tem diâmetro inferior a ela [L]

d_{85} = Diâmetro da partícula tal que 85% da amostra tem diâmetro inferior a ela [L]

$d_{rm} = W/vol.\gamma_a$ = Densidade relativa da mistura [1]

$d_{rs} = s$ = Densidade relativa do sólido [1]

d_s = diâmetro representativo do sólido [L]

f = Fator de atrito de Fanning [1]

f_D = Fator de atrito de Darcy [1]

F_D = Força de arraste [F]

F_L = Constante de correlação de DURAND [1]

g = Aceleração da gravidade [LT^{-2}]

I_D = Diâmetro interno [L]

J = Perda de carga unitária (L/L)

J_m = Perda de carga unitária da mistura [L/L]

J_l = Perda de carga unitária da fase líquida [L/L]

J_s = Perda de carga unitária da fase sólida [L/L]

$J_{ci}\%$ = Perda de carga unitária para $C_i(\%)$ de sólido [L/L]
 K_D = constante determinada experimentalmente = Constante de Durand [1]
 Q = Vazão (L^3T^{-1})
 r^2 = Coeficiente de correlação [1]
 R = Raio do duto [L]
 Re = Número de Reynolds = $\rho V_m D / \mu$ [1]
 R_h = Raio hidráulico [L]
 T = Temperatura [$^{\circ}C$]
 V_c = Velocidade crítica ou velocidade de mínima energia de transporte [LT^{-1}]
 V_{cs} = Velocidade crítica de sedimentação [LT^{-1}]
 V_s = velocidade de queda do sólido ou de sedimentação [LT^{-1}]
 V_{se} = velocidade de sedimentação da esfera [LT^{-1}]
 V_H = Velocidade de Transição entre misturas heterogênea e homogênea [LT^{-1}]
 Vol = Volume da mistura [L^3]
 ϕ = Concentração volumétrica [1]
 ρ = Massa específica [ML^{-3}]
 ρ_s = massa específica das partículas de sedimento [ML^{-3}]
 ρ_l = massa específica do líquido [ML^{-3}]
 τ = Tensão de cisalhamento na parede [$ML^{-1}T^{-2}$]
 ω = Peso dos sólidos da mistura [MLT^{-2}]
 μ = Viscosidade dinâmica [$ML^{-1}T^{-1}$]
 Φ = parâmetro adimensional de transporte de sedimento [1]
 Ψ = parâmetro adimensional [1]
 γ_a = Peso específico da água [$ML^{-2}T^{-2}$]

RESUMO

SOLDERA, Paulo Eduardo dos Santos. **Perda de Carga Provocada por Escoamento Heterogêneo em Conduitos Horizontais**. Campinas: 2001. 115 págs. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.

A perda de carga, de misturas sólido-líquidas escoando em conduitos forçados horizontais no regime heterogêneo, pode ser calculada, conhecendo-se um parâmetro adimensional (Φ) de transporte de sedimento. Este adimensional depende: da velocidade média do escoamento, da densidade relativa e do tamanho dos grãos sólidos, do diâmetro do conduto, e de uma constante determinada experimentalmente (K_D). Dentro da literatura sobre o assunto, a constante K_D assume diversos valores, dependendo do autor, o que deixa dúvidas se realmente ela é uma constante. Para a mistura água-areia, calculou-se os valores de K_D , que se trata de um parâmetro que depende da vazão do escoamento, do diâmetro dos sólidos e da concentração da mistura, e não uma constante como se encontra na literatura. Para a mistura água-calcário, não se pode obter valores coerentes para K_D . Esse comportamento atípico deve-se ao pequeno diâmetro representativo desse sólido. Foi desenvolvido uma equação para calcular o fator de atrito f da Fórmula Universal de Perda de Carga, de forma que se possa dimensionar uma tubulação de recalque para transporte dessa mistura.

Palavras Chave: conduitos horizontais, misturas sólido-líquidas, transporte de sedimentos, escoamento heterogêneo.

1 INTRODUÇÃO

As instalações de recalque de misturas sólido-líquidas são dimensionadas de forma a ocorrer o escoamento heterogêneo sem leito estacionário, porque é nele que ocorre a mínima dissipação de energia. Porém, existe ainda divergências na adoção de determinados coeficientes de uma mesma equação de perda de carga.

A velocidade crítica de sedimentação assume um papel fundamental, pois o seu valor é que define a distinção do escoamento heterogêneo com leito estacionário e sem leito estacionário.

Tem-se notícia da utilização de condutos como meio de transportes de sólidos desde 1913, devido à necessidade de se reduzir o custo de transporte de matérias-primas, da fonte ao mercado consumidor. Os depósitos de matérias-primas mais próximos são naturalmente os primeiros a serem explorados através de transportes rodoviários, ferroviários e hidroviários. Os depósitos mais distantes são desprezados ou considerados economicamente inviáveis. Com a escassez das fontes próximas, será então necessário a implantação de meios de transportes mais econômicos, um exemplo é o transporte através de dutos.

Uma outra modalidade de transporte, o transporte de sólidos através de condutos, há muito tempo está sendo utilizada em grandes escalas pelos países desenvolvidos.

Estudos comparativos entre os custos de transporte por rodovias, ferrovias e por condutos, têm demonstrado ser economicamente favorável a opção por condutos, além de inúmeras outras vantagens, tais como:

- a) ocupação mínima do solo; ausência de poluição ambiental; menor investimento inicial devido à redução do tamanho da instalação (menor custo de desapropriação);
- b) vencer acidentes geográficos inacessíveis ao transporte rodoviário e ferroviário, ou quando possível através destes tipos de transportes, o faz através de caminhos mais curtos;
- c) a operação não é afetada pelas condições do tempo.

O transporte de sólidos por condutos, além de constituir-se hoje, em uma das modalidades mais econômicas de transporte, tem vasta variedades de aplicações, das quais as mais conhecidas são: dragagens; transporte de minerais; “bota-fora” de materiais sólidos indesejáveis, como cinzas, borras de cimento, e etc; transporte pneumático de grãos; material em processamento industrial; produtos finais de vários segmentos de diferentes indústrias, incluindo todas as envolvidas na agricultura, papel, óleo e extração de minérios; extração marítima e remoção de lixo urbano. Encontram-se aplicações ainda nas áreas de irrigação, tratamento de esgoto, engenharia de alimentos, indústria farmacêutica e extintores de incêndio.

O escoamento de misturas sólido-líquidas em condutos é complexo por envolver um grande número de parâmetros empíricos e semi-empíricos, não existindo ainda modelos matemáticos que descrevam com precisão o escoamento heterogêneo. Esse fato, faz com que ainda existam, em grande número, instalações pilotos, que são utilizadas no levantamento de dados e parâmetros de escoamento de misturas sólido-líquidas, que posteriormente são comparados com aqueles obtidos em testes de laboratório e com os obtidos em relações teóricas, a fim de evitar ao máximo, erros de dimensionamento ou coeficientes de segurança muito elevado.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi investigar o comportamento das perdas de carga, num trecho horizontal de canalização de recalque, provocadas por escoamento de misturas sólido-líquidas em regime heterogêneo. Para a mistura água-areia, analisou a constante K_D , utilizada no cálculo do parâmetro adimensional de transporte de sedimentos Φ , que é utilizado no cálculo de perdas de carga, em função da concentração da mistura. Para a mistura água-calcário, as perdas de carga foram analisadas utilizando-se a Fórmula Universal de Perda de Carga, uma vez que as características desta mistura não se comportaram como mistura heterogênea composta com sólido não coesivo. Averiguou-se o comportamento do escoamento das misturas para velocidades médias iguais à velocidade crítica e velocidade crítica de sedimentação

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para se dimensionar uma instalação de recalque de misturas sólido-líquidas, é fundamental o conhecimento das perdas de carga ao longo das linhas de sucção e de recalque; da velocidade mínima que se pode permitir sem que haja sedimentação dos sólidos, os quais podem acarretar obstrução e funcionamento defeituoso; denominada velocidade crítica de sedimentação (V_{CS}) e da velocidade crítica, que corresponde àquela que provoca a mínima dissipação de energia (V_C).

O bombeamento de misturas sólido-líquidas, vinha sendo realizado desde o início do século, com predominância de instalações de pequeno porte, improvisadas, ou ainda com a apresentação de resultados de casos particulares estudados.

Pode-se afirmar, com certeza, que a partir do trabalho de DURAND & CONDOLIOS (1952), de abordagem mais científica e de aplicação geral, foi possível o desenvolvimento efetivo do assunto, ensejando o aparecimento de projetos de grande envergadura.

Para entender a importância do trabalho desenvolvido por DURAND & CONDOLIOS, e localizá-lo dentro da evolução histórica, mostram-se a seguir alguns poucos trabalhos anteriormente desenvolvidos.

BLATCH, (1906), fez ensaios com areia de 0,19 a 0,548 mm (concentração em volume de 5,35%), em **condutos horizontais**, de aço galvanizado e de latão de 25mm.

O'BRIEN E FOLSON, (1937), "apud", Nogueira, (1987), ensaiaram em **tubos horizontais** de aço galvanizado e de latão de 25mm de diâmetro.

DUREPRAIRE, (1939),"apud", Nogueira, (1987), pesquisou escoamentos de água com areia (diâmetro de 0,305 mm) **em tubos horizontais** de aço de 50mm de diâmetro.

HOWARD, (1939), pesquisou o escoamento das seguintes misturas: água-areia, água-cascalho, e água-silte, **em tubos horizontais** de aço com 60 mm de diâmetro interno.

WIEDENROTH (1993) estudou a velocidade crítica e a distribuição de velocidades da mistura água-areia (1mm de diâmetro médio) **em tubulações horizontais** de 125 e 200 mm.

YUFIN, (1949), "apud", Nogueira, (1987), pesquisou **em condutos horizontais**, de diâmetro variando entre 10 e 450 mm, o escoamento da mistura água-areia (diâmetro entre 0,25 e 7,36 mm), e concentração, expresso em volume, variando até 30%.

Um dos primeiros relatos de experiências com transporte sólido em condutos forçados pode ser atribuído a HAZEN e HARDY, (1906). Durante o projeto da Estação de Tratamento de Águas de Washington, os autores depararam com o problema de transporte de mistura água-areia em tubos de 3" (75 mm) e 4" (100 mm), necessitando a realização de ensaios experimentais. As **tubulações horizontais**, para medição de perdas de carga, eram alimentadas por um reservatório elevado e os sólidos eram injetados na linha a jusante do mesmo.

Para o caso de misturas homogêneas em condutos horizontais, GRAF, (1971), e VANONI (1977), apresentam a equação de Darcy-Weissbach como sendo apropriada para se calcular a perda de carga devido ao escoamento de misturas em suspensão homogênea.

GRAF (1971), encontrou pouca diferença entre a viscosidade da água e da mistura de água e areia. Considerou o fator de atrito devido ao escoamento da água limpa igual ao devido ao escoamento da mistura encontrando bons resultados.

3.1 VELOCIDADES DE DISTINÇÃO ENTRE OS REGIMES DE ESCOAMENTOS

O escoamento de misturas em suspensão heterogênea é o regime mais importante do transporte de sedimentos em conduto, porque, ele é normalmente, o regime que transporta uma quantidade maior de sedimentos por unidade de energia dissipada, ou seja há ocorrência da velocidade crítica (V_C).

Portanto, a velocidade crítica (V_C) é a velocidade média do escoamento que provoca a dissipação mínima de energia para determinada concentração dos sólidos (Figuras 3.1). Dependendo da granulometria do material sólido transportado, a velocidade crítica pode ser igual à velocidade de distinção entre o escoamento de misturas heterogêneas com leito estacionário e sem leito estacionário denominada velocidade crítica de sedimentação (V_{CS}). Enfatiza-se com isto, a importância da velocidade crítica, e conseqüentemente do escoamento heterogêneo para o projetista de instalações de recalque de misturas sólido-líquidas, seja por corresponder ao ponto de menor dissipação de energia, seja por ser a velocidade limite inferior de contorno, e permitir que se previna obstruções da linha numa eventual variação de funcionamento do sistema.

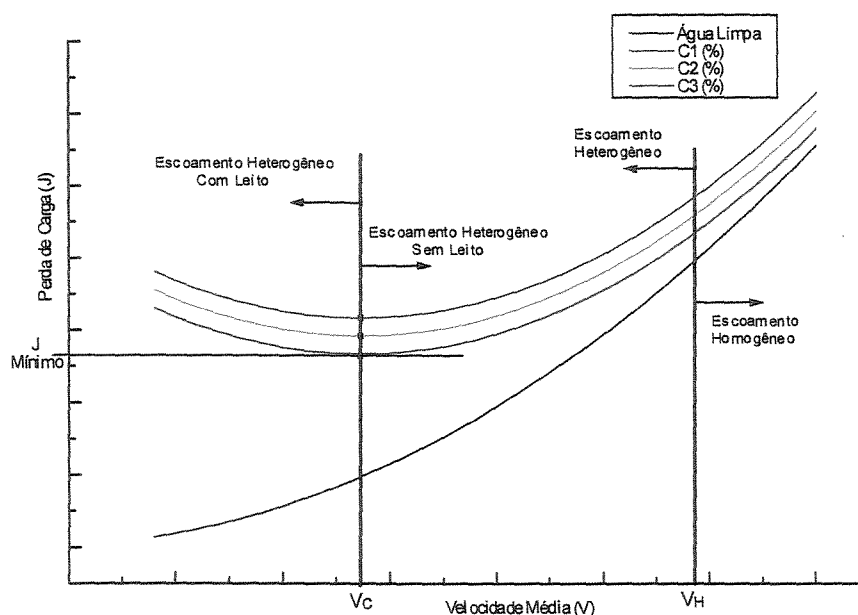


Figura 3.1- Perda de Carga (J) em função da Velocidade Média
Regime de Escoamentos

Do ponto de vista de projeto, a velocidade limite superior, para o caso de bombeamento de misturas sólido-líquidas, é definida a partir do conhecimento da velocidade média que provoca desgaste abrasivo considerável. Por sua vez, este desgaste depende da dureza, do tamanho, da forma e da densidade da fase sólida da mistura. Esta velocidade dependendo do material sólido transportado pode resultar misturas homogênea ou heterogênea.

A velocidade crítica de sedimentação também pode ser vista pelo aspecto físico e visual do escoamento. Analisando um corte transversal da tubulação, pode-se considerar como velocidade crítica de sedimentação, a velocidade média pelos quais os últimos grãos do sedimento estão na iminência de sair do leito estacionário e entrarem em movimento (Figuras 3.2 e 3.3).

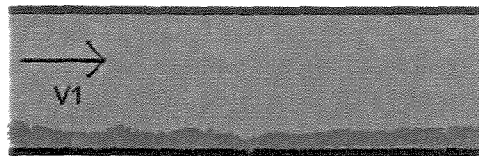


Figura 3.2- Corte transversal da tubulação
Escoamento Heterogêneo com Leito estacionário

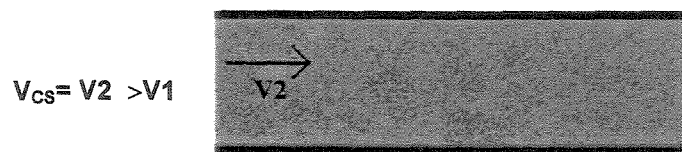


Figura 3.3 – Corte Transversal da Tubulação
Velocidade Crítica de sedimentação (V_{cs}) - Iminência de todos os grãos
de sedimento do leito estacionário entrarem em movimento

No escoamento heterogêneo sem leito estacionário, as partículas do sedimento não estão distribuídas uniformemente ao longo da vertical do tubo, portanto possui gradiente de concentração ao longo da vertical, como mostra a Figura 3.4.

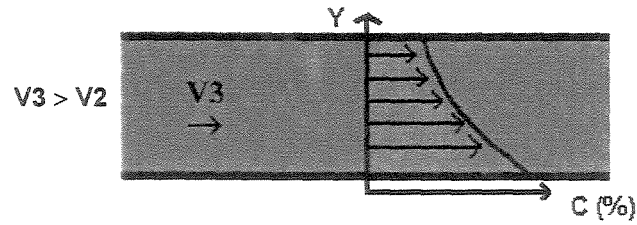


Figura 3.4 – Corte Transversal da Tubulação
Distribuição da Concentração ao Longo da Vertical do Tubo

DURAND (2) (1952), "apud" WASP, 1977 propôs que para $d_s > 0,2 \text{ mm}$ o escoamento seria heterogêneo.

Segundo THOMAS (1962), "apud" WASP, 1977, o escoamento heterogêneo poderia ser definido com a expressão:

$$\frac{V_s}{U^*} > 0,2 \quad (3.1)$$

Na qual:

V_s = velocidade de sedimentação;

U^* = Velocidade de atrito, na qual:

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_{Parede}}{\rho}} \quad (3.2)$$

ou

$$U^* = \bar{V} \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (3.3)$$

Na qual:

$$\tau_{Parede} = 0,0225\gamma \times (V_{máxima})^{\frac{7}{4}} \times \left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{4}}, \text{ segundo BLASIUS apud SATTO (1998)} \quad (3.4)$$

No escoamento homogêneo, os sólidos estão distribuídos uniformemente no líquido ao longo da vertical do tubo, como mostra a Figura 3.5.

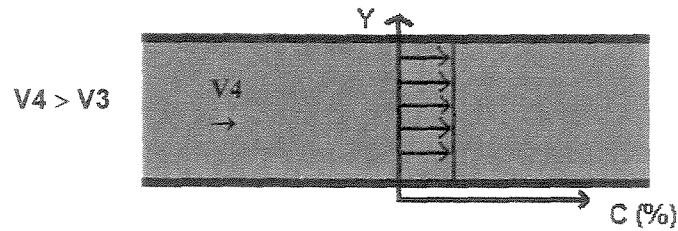


Figura 3.5 – Corte Transversal da Tubulação
Escoamento Homogêneo – Distribuição Uniforme de Sólidos ao Longo do Tubo

A distinção entre misturas homogênea e heterogênea, para efeito de projeto, não tem muita importância, uma vez que o dimensionamento é feito a partir da velocidade crítica (que ocorre no escoamento heterogêneo).

Por outro lado, é importante o conhecimento desta velocidade de distinção para não se cometer erros devido ao emprego inadequado das equações de resistência, já que cada regime de escoamento possui sua própria equação.

NEWITT et al. (1955) "apud" Graf (1971) sugeriu a velocidade de transição (V_H), supondo que a mesma distinguiria os escoamentos homogêneo e heterogêneo, através da equação (3.5):

$$V_H = \sqrt[3]{1,800 \times g \times v_{ss} \times D} \quad (3.5)$$

Na qual:

V_H = velocidade de transição entre escoamentos homogêneo e heterogêneo;

V_{ss} = velocidade de sedimentação da partícula;

D = diâmetro da tubulação

Como uma regra prática, esta equação é limitada para partículas com diâmetro inferior a $d = 30 \times 10^{-3}$ mm.

WASP et. alli (1977) propôs que o escoamento seria homogêneo quando $C/C_A \geq 0,8$. Para $d_s > 7$ a 8 mm , não é possível ocorrer o escoamento homogêneo. A Figura 3.6 mostra C e C_A num corte transversal da tubulação

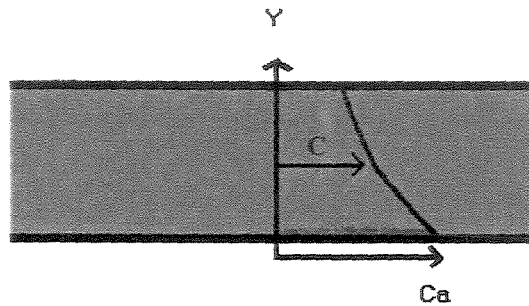


Figura 3.6 – Corte Transversal da Tubulação
C e C_A - Distribuição de concentrações

3.1.1 VELOCIDADE CRÍTICA (V_C) E VELOCIDADE CRÍTICA DE SEDIMENTAÇÃO (V_{CS}).

A operação de qualquer sistema hidráulico abaixo da velocidade crítica de sedimentação pode resultar em bloqueio da linha. Portanto a compreensão e o conhecimento total da velocidade crítica de sedimentação é importante para uma operação econômica e sem transtornos.

Uma regra para a determinação desta velocidade é necessária ao desenvolvimento de projetos de sistemas hidráulicos. O processo de determinação mais seguro é a sua determinação em laboratório e por visualização do instante em que inicia-se a formação do leito de sedimentos.

A velocidade crítica (V_C), correspondente à menor perda de carga, por nem sempre coincidir exatamente com a velocidade crítica de sedimentação (V_{CS}), não assegura plenamente o impedimento de bloqueio do tubo. Se a V_C for menor que a V_{CS} , isto significará que a velocidade crítica em questão é uma velocidade com leito de sedimentos e pode levar a bloqueios da linha. Se a V_C for maior que a V_{CS} , isto significará que a velocidade crítica será mais adequada aos projetos pois além da mínima perda de carga ela também assegura a não existência de leito de

sedimentos no fundo do tubo. Em projetos, segundo VANONI (1977), recomenda-se utilizar a velocidade média do escoamento um pouco maior que a velocidade crítica.

Muitas correlações apresentam-se incorporando diversas variáveis e fornecem valores satisfatórios de velocidade crítica. As correlações em geral são válidas dentro do intervalo de tamanhos de partículas e diâmetro de dutos para as quais foram obtidas.

WANI (1986) apresenta uma excelente revisão bibliográfica sobre a velocidade crítica e suas diversas correlações e ressalta que ainda não foi estabelecida uma correlação de aplicação universal.

Uma variável muito comum em correlações de velocidade crítica é a **velocidade de sedimentação** (V_s), também conhecida como velocidade de deposição ou velocidade terminal em fluidos em repouso e de dimensões infinitas. A velocidade de sedimentação é resultado de um balanço entre as forças de arraste viscoso e de arraste de forma contra a força gravitacional. Ela geralmente tem a direção da gravidade, que é perpendicular ao fluxo em dutos horizontais. Segundo CHIEN, SZE-FOO (1994), teoricamente ela tem somente um desempenho mínimo no escoamento padrão de sólidos com fluxo horizontal. Entretanto existem correlações que incluem a velocidade de sedimentação como um parâmetro. NEWITT et al (1955), estabeleceram que a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) em dutos horizontais deve ser 17 vezes a velocidade de sedimentação (V_s).

WILSON, W.E.(1942), "apud" CHIEN SZE-FOO, (1994) foi provavelmente o primeiro a propor uma velocidade crítica para o transporte de partículas sólidas em fluidos. Ele propôs a correlação dada pela Equação (3.6):

$$V_{cs} = \frac{(K \times s \times C \times g \times D \times V_s)^{1/3}}{1 + C \times (s - 1)} \quad (3.6)$$

Na qual:

K = constante;

S= densidade relativa do sólido;

C= Concentração volumétrica;

g= aceleração da gravidade;

V_s = velocidade de sedimentação;

D= diâmetro da tubulação

Como a velocidade de sedimentação é função do diâmetro da partícula e da viscosidade do fluido, os efeitos de tais propriedades portanto estão incluídos em sua correlação. O valor de K depende das unidades utilizadas.

DURAND (1953) e DURAND & CONDOLIOS (1952), realizaram muitos experimentos para a determinação da velocidade crítica de sedimentação de partículas de carvão, areias e cascalhos. A correlação encontrada por DURAND (1953) é dada pela Equação (3.7):

$$V_{cs} = F_L \sqrt{2gD(s-1)} \quad (3.7)$$

Na qual o valor de F_L é função da concentração volumétrica de sólidos e tamanho da partícula, e encontra-se representada na Figura 3.7.

Para concentrações volumétricas menores que 2%, o valor de F_L pode ser aproximado pela Equação (3.8):

$$F_L = 2,853 d^{0,143} \quad (3.8)$$

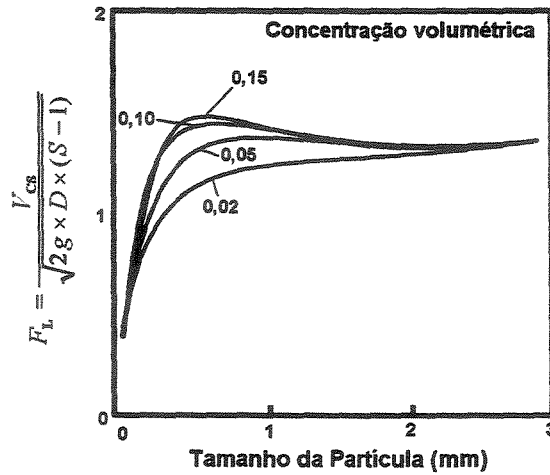


Figura 3.7- Valor de F_L da Correlação de Durand para grãos uniformes.

Pode-se observar na Figura 3.7 que para grãos maiores que cerca de 1 mm a concentração e o diâmetro das partículas tem pouca influência sobre a velocidade crítica de sedimentação. Entretanto para grãos não uniformes, a influência da concentração torna-se fortemente evidente como se pode observar na Figura 3.8 de DURAND & CONDOLIOS (1952) apud VANONI (1977).

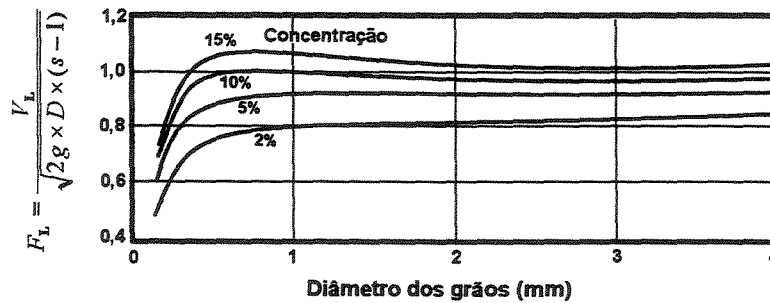


Figura 3.8 - Velocidade Limite de Sedimentação para material não uniforme de DURAND & CONDOLIOS apud VANONI (1977).

CAIRNS et al (1960), "apud" CHIEN, SZE-FOO (1994), utilizaram partículas de 15 a 30 microns . Eles estabeleceram a correlação representada na Equação (3.9):

$$V_{cs}=3,827 \left[g \times d \times (s-1)^{0,6} \left(\frac{D \times C \times \rho}{\mu} \right)^{0,3} \right]^{0,588} \quad (3.9)$$

Na qual as unidades estão no sistema MKS técnico:

g em (m/s^2) ;

d em (m) ;

D em (m) ;

C em $(\%)$;

ρ em $(Kgf \cdot s^2/m^4)$;

μ em $(Kgf \cdot s/m^2)$;

V_{cs} em (m/s)

Os valores de velocidade crítica obtidos são próximos aos de NEWITT et alli (1955) dados por $17 \times V_s$.

SINCLAIR (1962), realizou experimentos com areia, carvão e minério de ferro de 30 a 2000 microns em dutos de 1/2, 3/4 e 1 polegadas. Para partículas de areia com valores de d_{85}/D menores do que 0,002, o valor máximo da velocidade crítica de sedimentação pode ser dado aproximadamente pela Equação (3.10):

$$(V_{cs})_{max}=12,65 \left[\left(\frac{D}{d_{85}} \right)^{0,173} g \times d_{85} (s-1)^{0,8} \right]^{0,5} \quad (3.10)$$

Na qual utiliza-se o sistema MKS técnico.

O valor de $V_{cs}/(V_{cs})_{max}$ atingiu um valor máximo em uma certa concentração de sólidos como se pode observar na Figura 3.9.

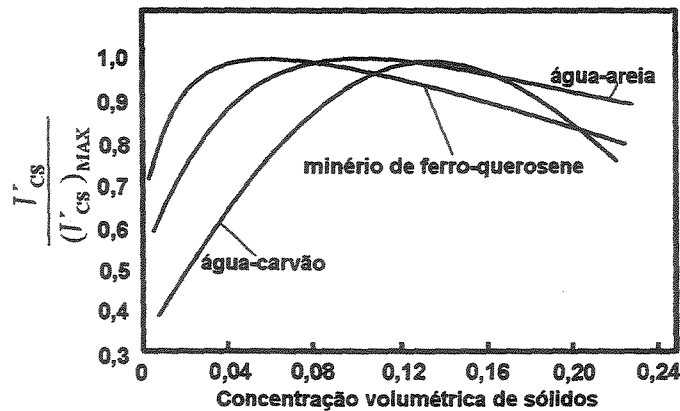


Figura 3.9- Relação entre $V_{CS}/(V_{CS})_{max}$ em função da concentração volumétrica do sólido

Obtidos dos experimentos de SINCLAIR(1962).

Observa-se que para um sistema de água e areia o máximo ocorre próximo de 10% de concentração. Concentrações de areia de 2%, têm razão $V_{CS}/(V_{CS})_{max}$ igual a aproximadamente 75%. Assim para suspensões aquosas com 2% de areia, a correlação obtida é representada na Equação (3.11). De acordo com CHIEN SZE-FOO (1994), os valores de SINCLAIR são relativamente menores comparados aos de outros autores.

$$V_{CS} = 9,49 \left[\left(\frac{D}{d_{85}} \right)^{0,173} g d_{85} (s - 1)^{0,8} \right]^{0,5} \quad (3.11)$$

Na qual utiliza-se o sistema MKS técnico

CONDOLIOS & CHAPUS (1963) plotaram $V_{CS}/(gD)^{0,5}$ em função da concentração de sólidos como se observa na Figura 3.10. Para concentração volumétrica menor que 2%, a velocidade crítica é dada pela Equação (3.12). De acordo com CHIEN SZE-FOO (1994), os seus resultados são comparáveis aos de WILSON e aos de CHARLES que serão citados posteriormente.

$$V_{CS} = 3,0 C^{0,149} \sqrt{gD} \quad (3.12)$$

Na qual utiliza-se o sistema MKS técnico.

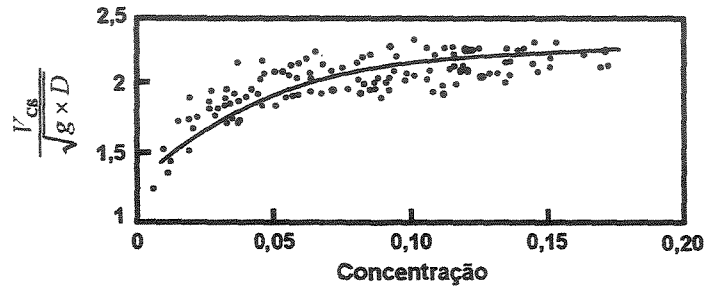


Figura 3.10- Correlação de velocidade crítica de CONDOLIOS & CHAPUS(1963).

YUFIN & LOPASIN(1966) apud CHIEN, SZE-FOO (1994), desenvolveram uma correlação para a velocidade crítica de sedimentação para areia e cascalho de diâmetros maiores que 50 microns. Sua correlação é representada na Equação (3.13).

$$V_{CS} = 8,3 \times D^{1,3} \times C^{0,0417} \quad (3.13)$$

Na qual utiliza-se o sistema MKS técnico.

ZANDI & GOVATOS (1967) propuseram uma velocidade crítica de sedimentação usando mais do que 1000 dados experimentais coletados de 11 referências. A sua correlação é representada pela Equação (3.14).

$$V_{CS} = \left[\frac{40 C g D (s - 1)}{\sqrt{C_d}} \right]^{0,5} \quad (3.14)$$

Na qual utiliza-se o sistema MKS técnico.

BABCOCK (1968), apud CHIEN, SZE-FOO (1994), apresentou uma correlação semelhante à de ZANDI & GOVATOS. Ela está representada na Equação (3.15). A velocidade crítica de BABCOCK é a metade da de ZANDI & GOVATOS.

$$V_{CS} = \left[\frac{10CgD(s-1)}{\sqrt{C_d}} \right]^{0,5} \quad (3.15)$$

Na qual utiliza-se o sistema MKS técnico.

SHOOK (1969), "apud" SATTO (1998) utilizou a correlação de perda de carga de DURAND e determinou a velocidade correspondente à mínima perda de carga e propôs a Equação (3.16). De acordo com CHIEN, SZE-FOO (1994), para pequenas concentrações, os resultados de SHOOK são próximos aos de ZANDI & GOVATOS.

$$V_{CS} = \frac{2,43C^{1/3}}{C_d^{1/4}} [2gD(s-1)]^{0,5} \quad (3.16)$$

Na qual utiliza-se o sistema MKS técnico.

BAIN & BONNINGTON (1970) propuseram a correlação dada na Equação (3.17).

$$V_{CS} = 3,48C^{1/3} \left[\frac{gD(s-1)}{\sqrt{C_d}} \right]^{1/2} \quad (3.17)$$

Na qual utiliza-se o sistema MKS técnico.

CHARLES (1970), apud CHIEN, SZE-FOO (1994), propuseram a correlação representada na Equação (3.18).

$$V_{CS} = \frac{4,8C^{1/3}}{C_d^{1/4}} \frac{[gD(s-1)]^{1/2}}{[1 + C(s-1)^{1/3}]} \quad (3.18)$$

Na qual utiliza-se o sistema MKS técnico.

GOVIER & AZIA (1972) utilizaram a equação de perda de carga de DURAND para obtenção da velocidade de mínima perda de carga. CHIEN, SZE-FOO (1994) observa que os valores da correlação de GOVIER & AZIZ são comparáveis aos de DURAND. A correlação obtida é apresentada como Equação (3.19).

$$V_{CS} = 1,9 \frac{(V_s D)^{0,5}}{d^{0,25}} \quad (3.19)$$

Na qual utiliza-se o sistema MKS técnico.

3.2 PERDA DE CARGA PROVOCADA POR MISTURAS SÓLIDO-LÍQUIDAS NO REGIMI HETEROGÊNEO.

A perda de carga provocada pelo escoamento de misturas sólido-líquidas no regime heterogêneo e homogêneo é igual à soma das perdas de cargas das fases líquida e sólida:

$$J_m = J_l + J_s \quad (3.20)$$

Na qual:

J_m = perda de carga unitária da mistura;

J_l = perda de carga unitária da fase líquida;

J_s = perda de carga unitária da fase sólida.

Segundo DURAND, em 1953, a diferença entre as perdas de carga da mistura e da fase líquida é proporcional à concentração transportada:

$$(J_m - J_l) / (C \cdot J_l) = \Phi \quad (3.21)$$

Na qual:

C = concentração expressa em volume da mistura em porcentagem;

Φ = parâmetro adimensional de transporte de sedimento, expressa de maneiras diferentes dependendo do regime de escoamento.

Para o regime de escoamento heterogêneo, o parâmetro adimensional de transporte de sedimento (Φ), é expresso como uma função da velocidade média do escoamento, da densidade relativa da mistura, do tamanho das partículas e do diâmetro do conduto.

$$\Phi = f(V, dr_s, d_s, D) \quad (3.22)$$

Ou:

$$\Phi = K_D \cdot \left[\frac{V^2}{g \cdot D \cdot (dr_s - 1)} \cdot \sqrt{C_d} \right]^{-3/2} \quad (3.23)$$

Na qual:

$K_D = 150$ [BONNINGTON (1959)];

C_d = coeficiente de arraste da partícula;

g = aceleração da gravidade;

D = diâmetro da tubulação;

dr_s = densidade relativa do sólido;

V = velocidade média do escoamento.

Para partículas esféricas:

$$C_d = 4/3 \cdot [g \cdot d_s \cdot (dr_s - 1)] / V_s^2 \quad (3.24)$$

Na qual:

d_s = diâmetro representativo do sólido;

V_s = velocidade de queda do sólido.

GRAF, em 1971, mostra que as velocidades de sedimentação de partículas de quartzo (areia) aproximam-se muito das velocidades de queda de partículas esféricas.

COLADO, em 1985, verificou que as velocidades de sedimentação das três areias utilizadas aproximam-se muito das velocidades de queda de partículas esféricas.

Portanto, substituindo (C_d) da Equação (3.23) pelo seu valor dado pela Equação (3.24) tem-se:

$$\Phi = K_1 \cdot \left[\frac{V^2}{g \cdot D \cdot (dr_s - 1)} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot d_s \cdot (dr_s - 1)}{V_s^2}} \right]^{-3/2} \quad (3.25)$$

Na qual:

$K_1 = 121$ (Segundo NEWITT et alii (1955)).

WORSTER, em 1952, apresenta o parâmetro adimensional de transporte de sedimento Φ associado com partículas sólidas de grande tamanho, em particular partículas de carvão, produzindo uma equação similar à equação de DURAND e CONDOLIOS, (1952):

$$\Phi = K \cdot \left[\frac{g \cdot D}{V^2 \cdot \sqrt{C_d}} \cdot \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right]^{3/2} \quad (3.26)$$

Na qual:

ρ_s = massa específica das partículas de sedimento;

ρ_l = massa específica do líquido;

$K = 81$ (Segundo WORSTER, em 1952)

Como a maioria dos casos, o líquido utilizado é a água, a Equação (3.26) pode ser escrita como:

$$\Phi = K \cdot \left[\frac{g \cdot D \cdot (dr_s - 1)}{V^2 \cdot \sqrt{C_d}} \right]^{3/2} \quad (3.27)$$

WORSTER considera para partículas grandes de carvão $C_d = 0,4$.

SASIC e MARJANOVIC, em 1978, utilizaram a equação de WORSTER e suas experiências sobre o transporte de areia através de condutos de diâmetros pequenos e encontraram bons resultados. Calcularam o coeficiente de arraste através da Equação (3.24) considerando a velocidade de sedimentação calculada por meio da seguinte equação.

$$V_s = V_{se} \cdot e^{-2,6 \cdot C} \quad (3.28)$$

Ou pela Equação de Newitt dada por:

$$V_s = V_{se} \cdot (1 - C)^{2,4} \quad (3.29)$$

Nas quais:

V_{se} = velocidade de sedimentação da esfera

DURAND, em 1953, apresentou o parâmetro adimensional de transporte de sedimento Φ em função de outro parâmetro adimensional Ψ elevado a um expoente (-m):

$$\Phi = K_D \cdot \Psi^m \quad (3.30)$$

Na qual:

K_D = Constante de Durand

O parâmetro adimensional (Ψ) é igual à relação entre colchetes apresentada na Equação (3.23), ou seja:

$$\Psi = \left[\frac{V^2}{g \cdot D \cdot (dr_s - 1)} \sqrt{C_d} \right] \quad (3.31)$$

A maioria dos pesquisadores consultados confirmam que o expoente (m) tem o valor 1,5, com exceções de ZANDI e GOVATOS, (1967), que a partir de uma quantidade muito grande de dados já existentes, sugeriram $m = 0,354$ para $\Psi < 10$, e CARLETON et alii, 1978, que das suas experiências sobre o transporte de rocha de carbonato de cálcio de tamanho que variaram de até 50 mm, em condutos com 102 e 154 mm de diâmetros e concentrações que variaram de até 27% V. M., concluíram que o valor do expoente (m) varia entre 0,85 a 1,55.

Entretando, para o coeficiente K_D são propostos diferentes valores.

ZANDI e GOVATOS encontraram $K_D = 6,3$ para $\Psi > 10$, e $K_D = 280$ para $\Psi < 10$.

HISAMITSU et alii, 1978, de seus estudos experimentais sobre o transporte de vários tipos de areias e diversos minerais, de diâmetro médios entre 0,15 a 0,80 mm, em condutos de aço com três polegadas de diâmetro e nove metros de comprimento, resultou a seguinte expressão:

$$\Phi = 120 \cdot \Psi^{-1,5} + (\sqrt{dr_s} - 1) \quad (3.32)$$

Na qual:

$K_D = 120$

KOCH (1964) propôs $K_D = 100$.

BONNINGTON (1961) propôs $K_D = 190$.

4 MATERIAIS

Para alcançar o objetivo proposto neste trabalho, foi montada uma Bancada de Ensaio automatizada no Laboratório de Hidráulica com recursos financeiros concedidos pela FAPESP-Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

A bancada de ensaios permitiu variar, com flexibilidade, a velocidade média do escoamento, a concentração e o diâmetro da fase sólida da mistura. A fase sólida foi composta primeiro, por areia e posteriormente por calcário.

A Figura 4.1 apresenta o esquema dessa bancada, cujos elementos serão pormenorizadamente descritos a seguir:

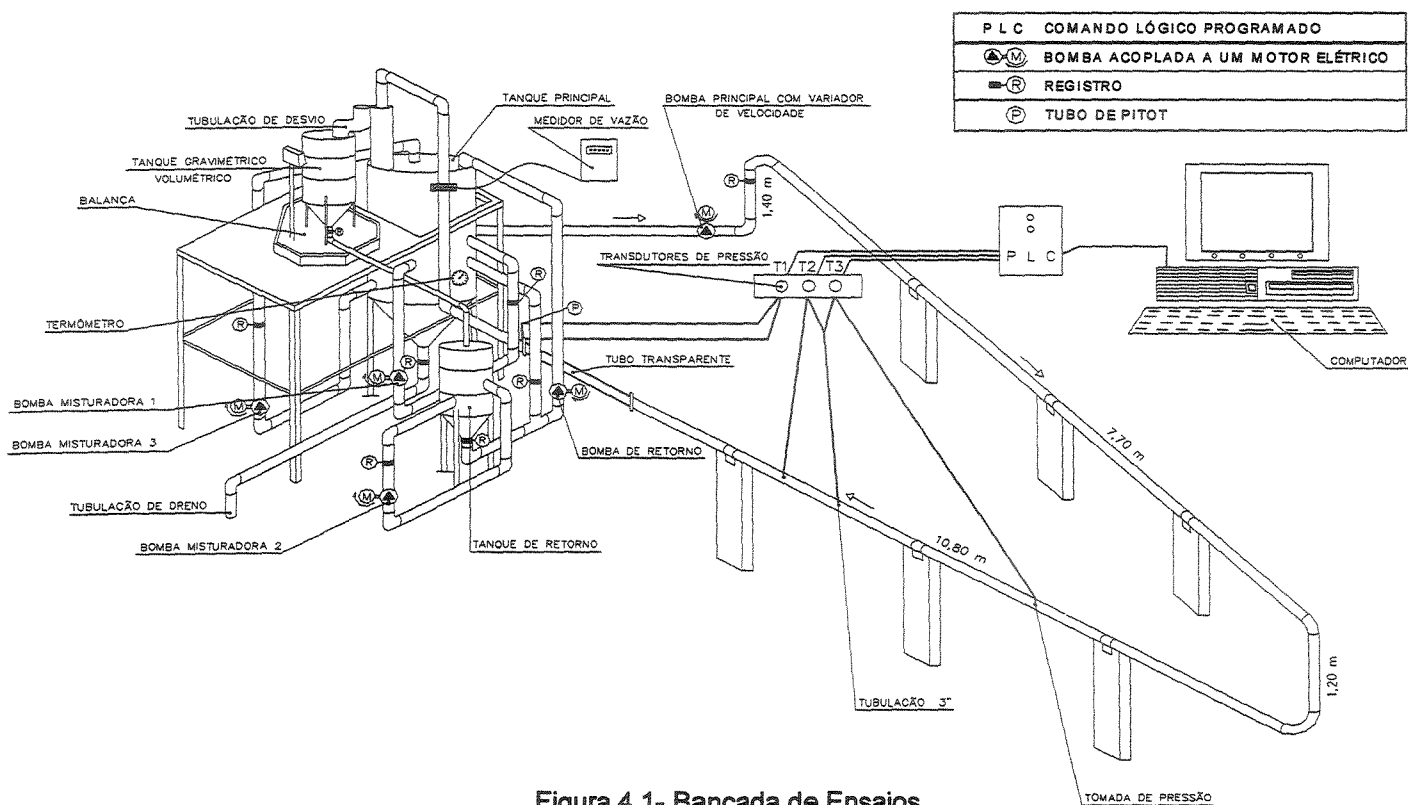


Figura 4.1- Bancada de Ensaio

4.1 - RESERVATÓRIO PRINCIPAL

O reservatório principal é cilíndrico-cônico com capacidade para 2000 litros, mede 1,20 m de diâmetro por 2,00 m de altura, fixo sobre três pés com 1,20 m de altura. Tem no seu interior um dispositivo que funciona como dispersor de fluxo ascendente. O reservatório principal é o local onde serão preparadas as misturas sólido-líquidas e as manterão homogênea através das bombas misturadoras.

4.2 - SISTEMA DE MEDIDAS GRAVIMÉTRICAS

O sistema de medidas gravimétricas é constituído por um tanque volumétrico fixo sobre uma balança. A balança é eletrônica, da marca Filizola, com capacidade para 750 kg e precisão de até 50 gramas.

O tanque volumétrico é cilíndrico-cônico, com capacidade para 200 litros. Mede 0,50 m de diâmetro por 0,90 m de altura. Sua parte inferior é cônica, permitindo perfeito esvaziamento através de um registro especial de três polegadas. Na sua parede externa foi instalada um medidor de nível (tubo transparente) com uma escala que permitiu leituras com precisão de até 0,50 mm.

4.3 - TANQUE DE DESCARGA

O tanque de descarga é cilíndrico-cônico com capacidade para 300 litros, mede 0,62 m de diâmetro por 0,90 m de altura. Recebia a mistura do tanque volumétrico, do qual era recalcado, de volta, para o reservatório principal

4.4 - BOMBA PRINCIPAL

A bomba principal é centrífuga revestida de borracha natural, entrada e saída com três e quatro polegadas de diâmetro, respectivamente; rotor semi-fechado, instalada a 3,00 m abaixo do nível de operação do reservatório principal. Sua função, na bancada de ensaios, é retirar as misturas sólido-líquidas de um ponto médio do reservatório principal, bombeando-as para o tanque volumétrico ou para o próprio reservatório principal, através da canalização de sucção e de recalque.

A bomba principal é acoplada a um motor elétrico, trifásico, de 20 Hp.

4.5 - BOMBA MISTURADORA 1

Centrífuga, da marca Lenz, modelo 800/14, entrada e saída com três e duas e meia polegadas de diâmetros, respectivamente; rotor semi-fechado com 120 mm de diâmetro. A canalização de sucção desta bomba é ligada ao reservatório principal e ao tanque de descarga. Esta bomba, ora succiona a mistura de um ponto médio do reservatório principal injetando-a no fundo do mesmo, de maneira a provocar a homogeneização da mistura, ora succiona a mistura do tanque de descarga, recalcando-a até o reservatório principal\

A bomba misturadora 1 está acoplada a um motor elétrico, trifásico, marca Kohlbach, de 10 Hp, 2 pólos, 3500 rpm, 220/380 V.

4.6 - BOMBA MISTURADORA 2

Centrífuga, da marca Lens, modelo 800/10, rotor semi-fechado, com 100 mm de diâmetro. Esta bomba retira a mistura de um ponto médio do tanque de descarga, injetando-a no sentido nível-fundo. Sua função é impedir a sedimentação da fase sólida da mistura, desobstruindo a canalização de sucção que une o tanque de descarga à bomba misturadora 1, durante a operação de retorno da mistura do tanque de descarga ao reservatório principal.

A bomba misturadora 2 está acoplada a um motor elétrico, trifásico, marca Kohlbach, de 3 Hp, 2 pólos, 3500 rpm, 220/380V.

4.7 CANALIZAÇÃO DE SUCÇÃO

É de PVC rígido com quatro polegadas de diâmetro, une o reservatório principal à bomba principal.

4.8 CANALIZAÇÃO DE RECALQUE

É de PVC rígido com três polegadas de diâmetro e transporta a mistura aos pontos de medidas, desviando-a ao tanque volumétrico ou retornando-a ao reservatório principal. É constituído por dois trechos horizontais de 12 m de comprimento cada e um trecho vertical de 5 m e 4" de diâmetro.

4.9 DESVIADOR ROTACIONAL DE FLUXO

Permite que ora o fluxo seja desviado para o reservatório principal, ora para o tanque volumétrico.

4.10 MEDIDAS

4.10.1 MEDIÇÕES DA VAZÃO E DA CONCENTRAÇÃO MÉDIA DO SÓLIDO DA MISTURA.

A vazão foi medida através do medidor eletromagnético (Fisher Rosemount Modelo 570 TM) instalado num trecho vertical com 5m de comprimento.

Em toda operação leu-se o peso do tanque volumétrico (cheio e vazio), o valor da cota do nível da suspensão no tanque volumétrico e a temperatura da mistura ou da água limpa.

Os valores das perdas e carga foram obtidos através de transdutores diferenciados de pressão, que eram ligados às tomas de pressão através de mangueiras “cristal”.

Os transdutores diferenciais de pressão estão conectados via cabo a um microcomputador através de uma interface, responsável pela transmissão de dados do transdutor para o microcomputador.

4.10.2 VOLUME DA MISTURA OU ÁGUA LIMPA NO TANQUE VOLUMÉTRICO.

O tanque volumétrico foi calibrado (Figura 4.2), tomando como padrão, uma bureta com capacidade para 500 ml e escala que permite uma precisão de até 5 ml. Fez-se o relação entre o volume d'água limpa ou da mistura, depositado no tanque volumétrico, e valores da cota do nível da mistura ou água limpa lidos na escala de um piezômetro instalado na parede externa do tanque, obtendo a curva de calibração e a equação do tanque volumétrico. Esta curva foi ajustada através do método dos mínimos quadrados.

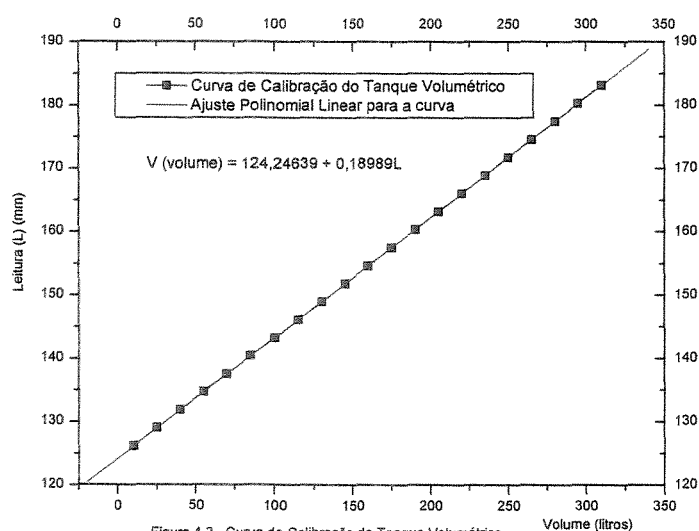


Figura 4.2 - Curva de Calibração do Tanque Volumétrico

4.10.3 PERDAS DE CARGA

As perdas de carga foram medidas no trecho horizontal através de transdutores diferenciais de pressão. O trecho contém oito tomadas de pressão. Elas mediram as perdas de carga entre 1 m, entre 3m e entre 8,2m de tubulação (Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6).

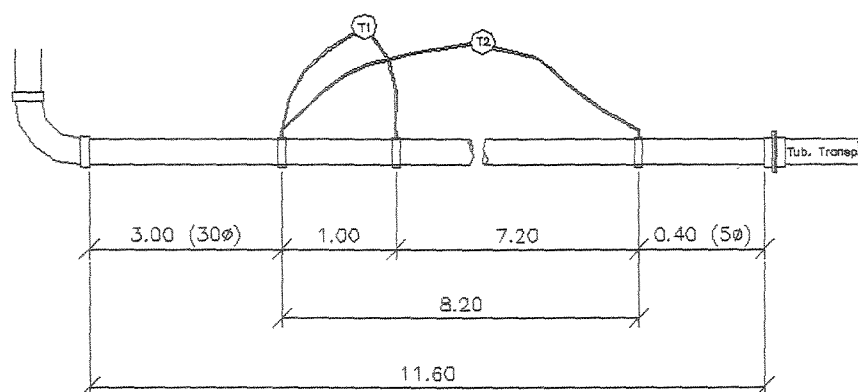


Figura 4.3- Posição das tomadas de pressão

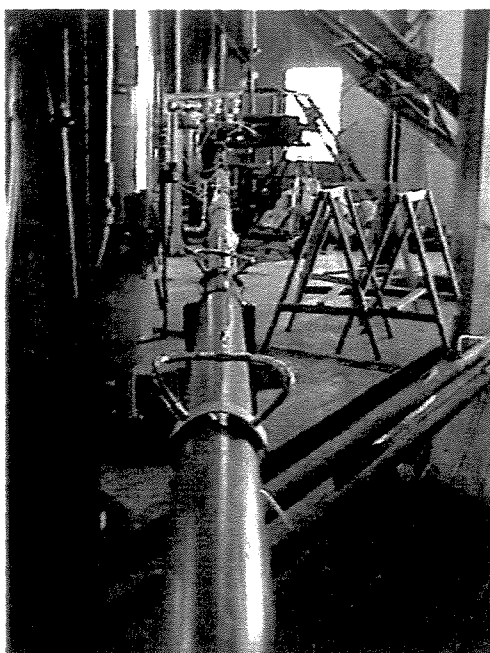


Figura 4.4 – Tubulação de Recalque com as tomadas de pressão instaladas

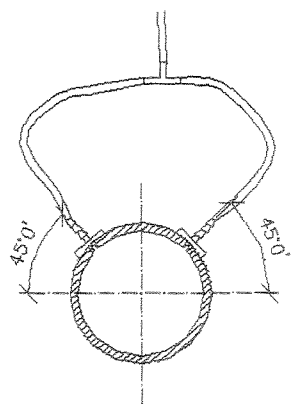


Figura 4.5 -
Esquema das tomadas de pressão no tubo

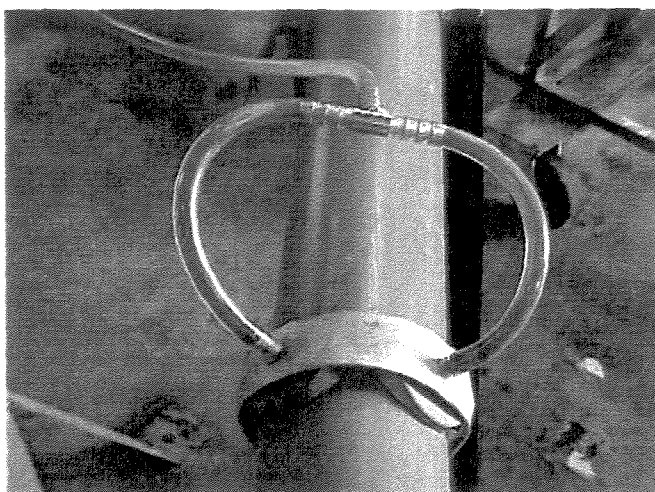


Figura 4.6 – Esquema de instalação da tomada de pressão
na tubulação

5 METODOLOGIA

5.1 CÁLCULO DA VAZÃO

A velocidade média foi variada utilizando um variador programável de rotação do conjunto moto-bomba (Toshiba –Transistor Inverter Tosvert VF-SXN).

A vazão de água limpa ou da mistura foi calculada através da seguinte equação:

$$Q = \frac{Vol}{t} \quad (5.1)$$

Na qual:

Q = vazão em m³/s;

Vol. = volume da água limpa ou da mistura depositada no tanque volumétrico;

t = tempo em que o fluxo ficou desviado para o tanque volumétrico.

5.1.1 CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO MÉDIA DO SÓLIDO NA MISTURA

A concentração da fase sólida foi variada até 21% em volume de areia e 26% em volume de calcário, e preparada conforme descrito no item 5.1.2. O diâmetro da fase sólida (areia e calcário) foi determinado a partir da Análise Granulométrica Conjunta.

A concentração média do sólido expressa em volume da mistura será calculada através da seguinte equação:

$$C = \frac{d_{rm} - 1}{d_{rs} - 1} \quad (5.2)$$

Na qual:

C = concentração média do sólido expressa em volume da mistura;

d_{rm} = densidade relativa da mistura;

d_{rs} = densidade relativa do sólido

5.1.2 PREPARO DAS MISTURAS SÓLIDO-LÍQUIDAS

5.1.2.1 PREPARO DA AREIA

A areia que foi utilizada como elemento sólido da mistura, foi tratada, ficando completamente isenta de elementos estranhos.

Visando melhor caracterizar a areia utilizada na composição das mistura, foi levantada a curva granulométrica, e determinado o seu peso específico.

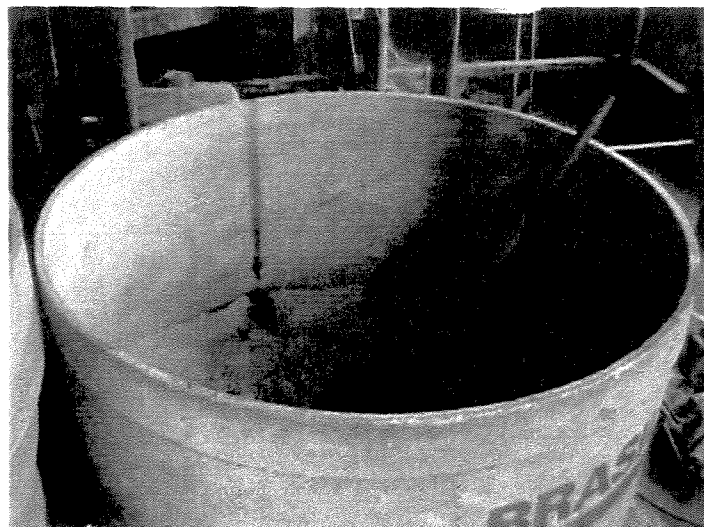


Figura 5.1 – Areia Armazenada no reservatório

A areia foi armazenada em um reservatório de 800 litros, conforme a figura 5.1

5.1.2.2 PREPARO DO CALCÁRIO

O calcário passou pelo mesmo processo que a areia, com a vantagem de ter os diâmetros dos seus grãos mais homogêneos, o que facilita a obtenção do diâmetro representativo. Foi armazenado em um reservatório de 500 litros, conforme a Figura 5.2.

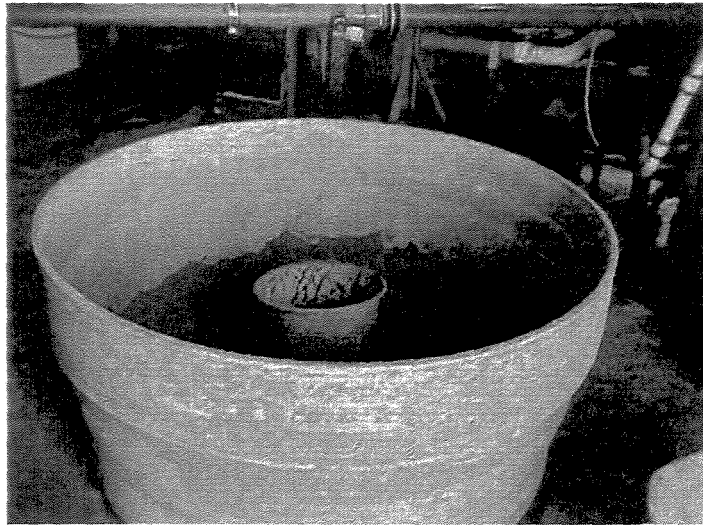


Figura 5.2 – Calcário armazenado no reservatório

5.1.2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SÓLIDOS

Foram realizados processos para se determinar o diâmetro representativo (d_{50}) e o peso específico real de cada sólido.

5.1.2.4 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA CONJUNTA

A análise granulométrica conjunta é composta de duas fases de ensaio: peneiramento e sedimentação.

A primeira consiste no peneiramento do sólido através de uma série de peneiras empilhadas em ordem decrescente de abertura das malhas das mesmas. Estas aberturas representam o diâmetro das partículas do sólido, por definição. O peneiramento é efetuado para as frações dos sólidos de granulometria mais grossa, isto é, aquela retida na peneira nº 200 (abertura 0,074 mm).

A sedimentação é baseada na equação de Stokes a qual descreve a velocidade de queda livre de esferas em um meio infinito. Nesta fase, o diâmetro das partículas é definido como sendo o diâmetro de esferas de mesma densidade e mesma velocidade de sedimentação que aquelas partículas.

A análise conjunta (peneiramento + sedimentação) foi utilizada nos ensaios dos sólidos areia e calcário pelo fato dos mesmos apresentarem mais que 5% de seus grãos passando na peneira nº 200. Caso contrário, seria apenas necessário ensaios de peneiramento.

5.1.2.5 ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS DOS SÓLIDOS

A Análise Granulométrica por Peneiramento foi utilizada na identificação e classificação do sólidos. As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os cálculos desta análise.

Tabela 5.1 – Análise Granulométrica por peneiramento da areia

Análise Granulométrica - Areia							
Peneiramento							
Pene. Nº	D (mm)	Peso Pene.	Peso Pe. + s	P. ret	% Retida	% ret. Ac.	% passa
10	2,00	-	-	-	-	-	100
20	0,84	415,12	415,33	0,21	0,42	0,42	99,58
40	0,42	333,81	334,81	1,00	2,00	2,42	97,58
60	0,25	323,75	329,41	5,66	11,32	13,74	86,26
100	0,15	315,59	345,90	30,31	60,62	74,36	27,94
200	0,07	386,09	398,17	12,08	24,16	98,52	26,65

Tabela 5.2 – Análise Granulométrica por peneiramento do calcário

Análise Granulométrica - Calcário							
Peneiramento							
Pene. Nº	D (mm)	Peso Pene.	Peso Pe. + s	P. ret	% Retida	% ret. Ac.	% passa
10	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
20	0,84	417,09	417,37	2,20	2,28	4,56	95,44
40	0,42	333,82	340,47	6,65	6,65	17,86	82,14
60	0,25	323,80	331,60	7,80	7,80	33,46	66,54
100	0,15	315,67	322,55	6,88	6,88	47,22	52,78
200	0,07	386,12	391,47	5,35	5,36	57,92	42,08

A Análise Granulométrica por Sedimentação está apresentada nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.3 – Análise Granulométrica por sedimentação da areia

Análise Granulométrica - Areia										
	P. ESP. 2,64	a 1,00	--	peso 50,00	corr. Inicial -5,00					
Sedimentação										
CT	Tempo (min)	Temper. °C	Ra	Rc	% Passa	R	L	L/T	K	D (mm)
1,30	0,50	25,00	7,00	13,30	26,66	8,00	14,82	29,63	0,0129	0,0702
1,30	1,00	24,00	6,50	12,80	25,56	7,50	14,99	14,99	0,0129	0,0499
1,30	2,00	24,00	6,50	12,80	25,45	7,50	14,99	7,50	0,0129	0,0353
1,30	4,00	24,00	6,50	12,80	25,20	7,50	14,99	3,75	0,0129	0,025
1,30	8,00	24,00	6,00	12,30	24,70	7,00	15,85	1,98	0,0129	0,0182
1,30	16,00	24,00	6,00	12,30	24,66	7,00	15,85	0,99	0,0129	0,0128
1,30	30,00	24,00	6,00	12,30	24,36	7,00	15,85	0,53	0,0129	0,0094
1,30	60,00	24,00	6,00	12,30	21,10	7,00	15,85	0,26	0,0129	0,0066
1,30	120,00	24,00	5,50	11,80	23,85	6,50	16,03	0,13	0,0129	0,0047
1,30	240,00	26,00	5,50	11,80	23,71	6,50	16,03	0,07	0,0129	0,0033
1,30	480,00	26,00	5,50	11,80	23,59	6,50	16,03	0,03	0,0129	0,0024
1,30	1440,00	26,00	5,50	11,80	23,50	6,50	16,03	0,01	0,0129	0,0014

Tabela 5.4 – Análise Granulométrica por sedimentação do calcário

Análise Granulométrica - Calcário										
	P. ESP.	a		peso	corr. Inicial					
	2,67	1,00		50,00	-6,00					
Sedimentação										
CT	Tempo (min)	Temper. °C	Ra	Rc	% Passa	R	L	L/T	K	D (mm)
1,30	0,50	24,50	19,50	26,80	53,36	20,50	14,47	28,95	0,0127	0,0683
1,30	1,00	24,50	18,00	25,30	50,37	19,00	14,76	14,76	0,0127	0,0488
1,30	2,00	24,50	17,00	24,30	48,38	18,00	14,96	7,48	0,0127	0,0347
1,30	4,00	24,50	15,00	22,30	44,40	16,00	14,35	3,59	0,0127	0,0241
1,30	8,00	24,50	15,00	22,30	44,40	16,00	14,35	1,79	0,0127	0,017
1,30	16,00	24,50	15,00	22,30	44,40	16,00	14,35	0,90	0,0127	0,012
1,30	30,00	24,50	14,50	21,80	43,40	15,50	14,44	0,48	0,0127	0,0088
1,30	60,00	24,50	13,00	20,30	40,42	14,00	14,73	0,25	0,0127	0,0063
1,30	120,00	24,50	11,50	18,80	37,43	12,50	15,03	0,13	0,0127	0,0045
1,30	240,00	24,50	11,00	18,30	36,43	12,00	15,12	0,06	0,0127	0,0032
1,65	480,00	25,50	10,00	17,65	35,14	11,00	15,32	0,03	0,0125	0,0022
1,65	1440,00	25,50	8,50	16,15	32,15	9,50	15,61	0,01	0,0125	0,0013

A s Curvas Granulométricas obtidas através das análises granulométricas conjuntas estão apresentadas nas Figuras 5.3 e 5.4.

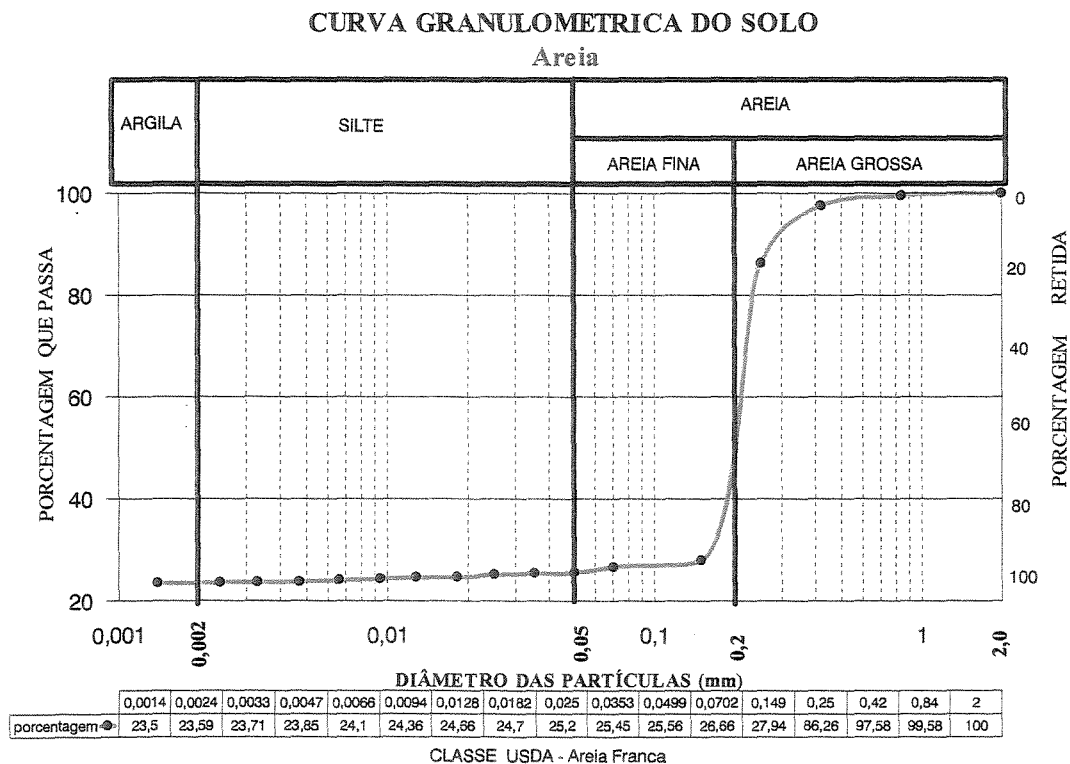


Figura 5.3 – Curva Granulométrica da areia

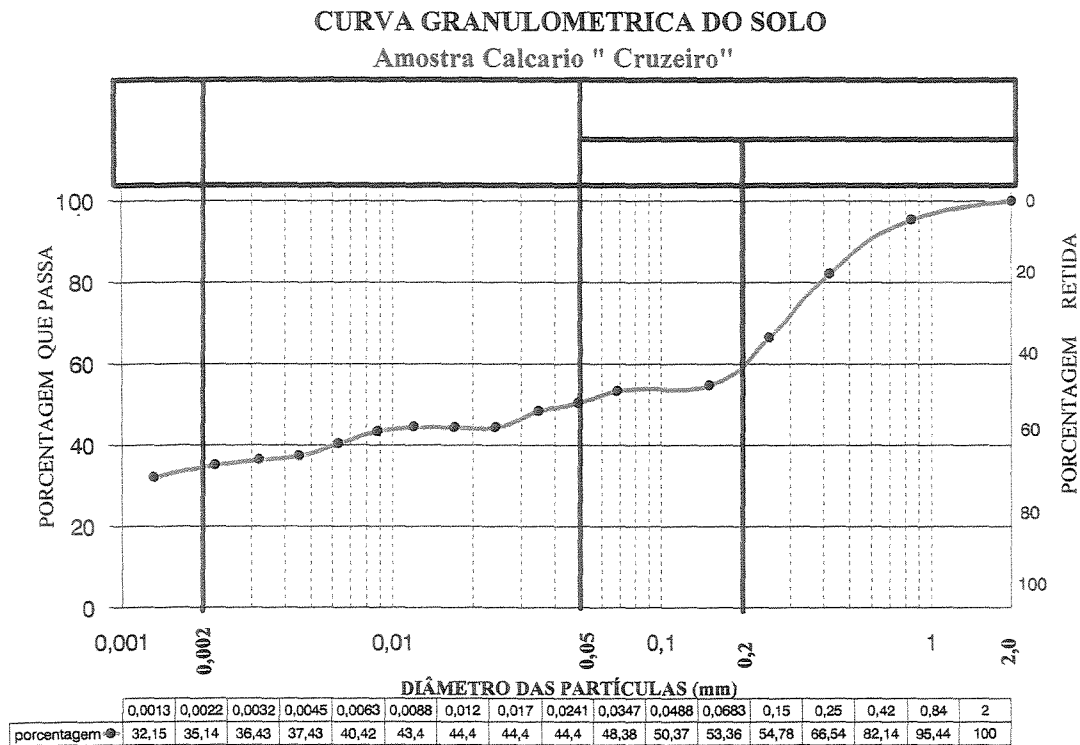


Figura 5.4 – Curva Granulométrica do calcário

Através da Análise Granulométrica Conjunta e da curva granulométrica da areia, obteve-se o diâmetro representativo do sólido (d_{50}) como sendo $d_{50} = 0,2$ mm.

Através da Análise Granulométrica Conjunta e da curva granulométrica do calcário, obteve-se o diâmetro representativo do sólido (d_{50}) como sendo $d_{50} = 0,05$ mm.

5.1.2.6 DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO PELO MÉTODO DO PICNÔMETRO

O peso específico real ou densidade real (d_s) é um parâmetro praticamente constante (variando na faixa de 2,6 a 2,7 g/cm³). O peso específico é a relação entre a peso e o volume das partículas do sólido seco.

A Tabela 5.5 apresenta a análise de densidade real da areia.

Tabela 5.5 – Análise de Peso específico da Areia

ANÁLISE DE DENSIDADE REAL AREIA			
PONTO 1	0 - 50	PICNÔMETRO 1	
PESO SOLO			50
PESO VIDRO			169,55
PESO VIDRO + AGUA			668,45
PESO DO VIDRO + AGUA + SOLO			699,57
PESO DO (VIDRO + AGUA) - (PESO DO VIDRO)			498,9
fc			0,9978
Ppa+Ps-Ppas	P.E.REAL	P.E.REAL.* fc	
18,88	2,6483051	2,64 g/cm3	

Através da Análise da densidade real da areia determinou-se o peso específico da areia com sendo $2,64 \text{ g/cm}^3$.

A Tabela 5.6 apresenta a análise de peso específico do calcário.

Tabela 5.6 – Análise de peso específico do Calcário

ANÁLISE DE DENSIDADE REAL CALCÁRIO			
PONTO 1	0 - 50	PICNÔMETRO 1	
PESO SOLO			60
PESO VIDRO			173,84
PESO VIDRO + AGUA			672,17
PESO DO VIDRO + AGUA + SOLO			709,75
PESO DO (VIDRO + AGUA) - (PESO DO VIDRO)			498,33
fc			0,99666
Ppa+Ps-Ppas	P.E.REAL	P.E.REAL.* fc	
22,42	2,676182	2,67 g/cm3	

Através da Análise de peso específico do calcário, determinou-se o peso específico do calcário como sendo $2,67 \text{ g/cm}^3$.

A Figura 5.5 mostra o andamento do ensaio de densidade real do calcário realizado no Laboratório de Hidrologia da Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp.

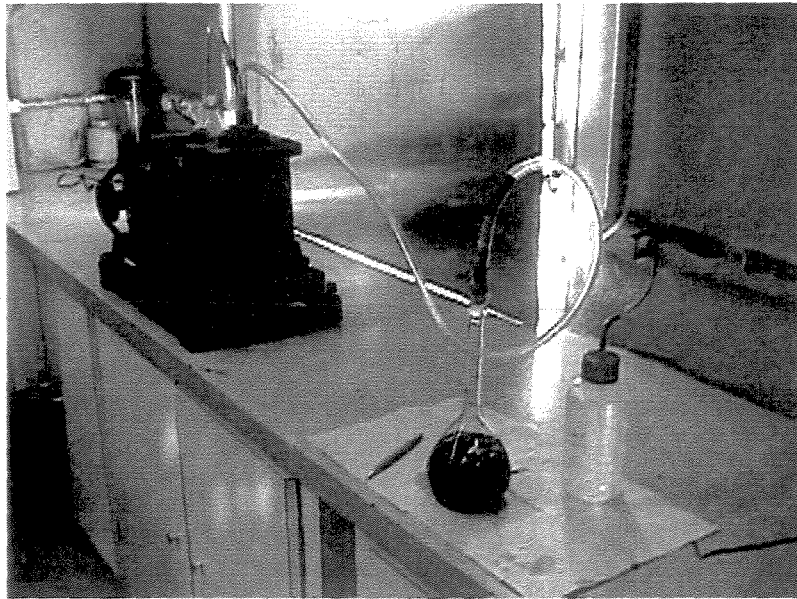


Figura 5.5 – Ensaio de densidade real do calcário
Bomba de vácuo e balão volumétrico com a mistura água-calcário

5.1.2.7 PREPARO DAS MISTURAS DE ÁGUA E SÓLIDOS

Para cada ensaio, foi preparada, no reservatório principal (Figura 5.6), uma mistura de concentração conhecida, obtida pela adição de um determinado volume de um dos sólidos secos a um volume conhecido de água limpa.

As medidas foram executadas após assegurada a estabilidade dos processos de bombeamento desenvolvidos pela bomba principal e pelas bombas misturadoras.

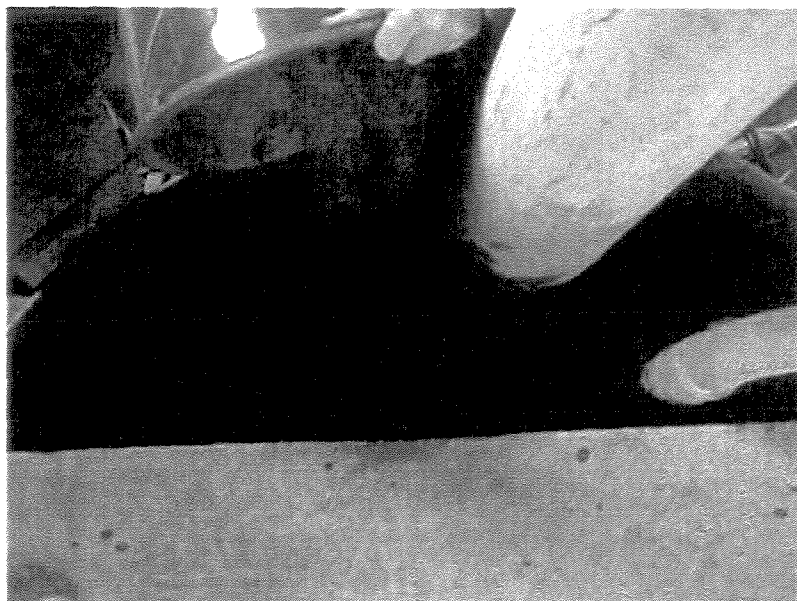


Figura 5.6 – Mistura de sólido no reservatório principal

5.2 MISTURA SÓLIDO-LÍQUIDO NO RESERVATÓRIO PRINCIPAL

A mistura sólido-líquido foi preparada no reservatório principal, onde se adicionou os sólidos com o reservatório praticamente cheio pelo fluído água. Para isto, era necessário que a bomba principal e as bombas misturadoras estivessem em pleno funcionamento, para que os sólidos pudessem distribuir-se de forma homogênea por todo o reservatório.

Os sólidos eram colocados no reservatório principal através de recipientes (baldes). Primeiro foram feitos os ensaios com calcário e posteriormente com areia. A Figura 5.6 mostra o reservatório principal no momento em que se está adicionando calcário à água.

5.3 VELOCIDADE DE ESCOAMENTO DO SISTEMA

As velocidades médias de escoamento puderam ser facilmente controlados através do variador programável de rotação do conjunto moto-bomba (Toshiba –Transistor Inverter Tosvert

VF-SXN) da bomba principal. Através deste variador podia-se aumentar ou reduzir a velocidade de escoamento de modo conveniente.

5.4 PERDAS DE CARGA

Foram instaladas 08 tomadas de pressão distribuídas em 04 pontos da tubulação de recalque da bancada de ensaios (Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6).

Os dados eram analisados e decodificados pelo Aplicativo Elipse Windows, instalado no microcomputador (Figuras 5.8 e 5.9). Este aplicativo calcula as médias de vazão do escoamento, dos valores das perdas de cargas nas três seções designadas para esta pesquisa.

Os valores de perda de carga foram obtidos através dos transdutores diferenciados de pressão (Figura 5.7), ligados às tomadas de pressão através de mangueiras “cristal”. Os dados também foram transmitidos via cabo através de interface para o microcomputador. Foi também o aplicativo Elipse Windows que fez as médias dos valores obtidos em um tempo de 120 segundos

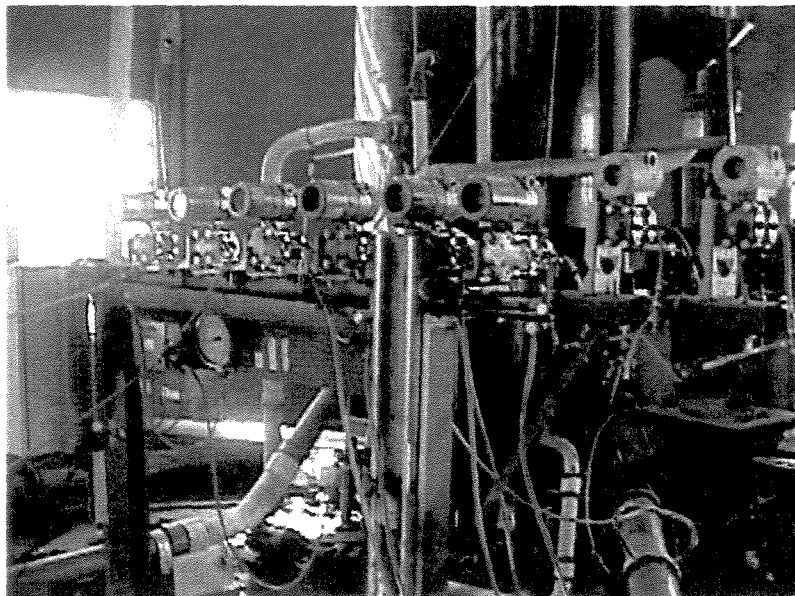


Figura 5.7 – Transdutores diferenciados de pressão

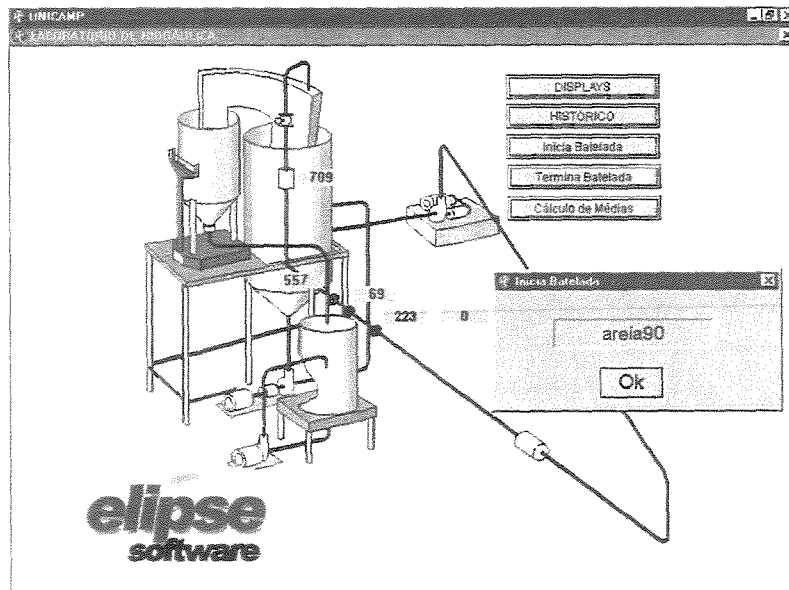


Figura 5.8 – Tela de apresentação do aplicativo Elipse Windows
Início de batelada

The screenshot displays the 'Análise de Médias' (Average Analysis) window. It contains a table with 15 columns: 'Data', 'Vazão (l/s)', 'Perda (l/s)', 'Carga (kg/s)', 'Perda (kg/s)', 'Carga (kg/s)', 'Perda (kg/s)', 'Carga (kg/s)', 'Perda (kg/s)', 'Carga (kg/s)', 'Perda (kg/s)', 'Carga (kg/s)', 'Perda (kg/s)', 'Carga (kg/s)', 'Perda (kg/s)'. The table is filled with numerical data. Below the table, there are buttons for 'Retorna', 'Imprime para Texto', and 'Imprime Este Relatório'. At the bottom, a summary table shows the following values:

	Média P1M	Média P8.2M	Média P3M
	69,3	557,9	223,5
	Vazão 1	Ensaio	No. Amostras
	706,0	areia90	242

Figura 5.9 – Planilha de dados de vazão e
perda de Carga do aplicativo Elipse Windows

5.5 CONCENTRAÇÕES DAS MISTURAS

A concentração do sólido que escoava no sistema foi calculada através das Equações (5.3, 5.4 e 5.5).

$$C_W = 100 \times \frac{\gamma_s}{\gamma_m} \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma_a}{\gamma_s - \gamma_a} \right) \quad (5.3)$$

$$C_V = C_W \times \frac{\gamma_m}{\gamma_s} \quad (5.4)$$

$$\gamma_m = \frac{\text{Peso da mistura}}{\text{Volume da mistura}} \quad (5.5)$$

Nas quais:

CW em % do peso;

CV em % de volume

γ_m = peso específico da mistura;

γ_a = peso específico da água;

γ_s = peso específico do sólido.

Para se obter a concentração da mistura, utilizava-se o desviador rotacional de fluxo para desviar o fluxo de recalque para o tanque volumétrico. Este tanque está calibrado com um medidor de nível (Figura 5.10) e sobre uma balança Filizola ID 10.000 de precisão (Figura 5.11)



Figura 5.10 – Medidor de nível instalado no tanque volumétrico



Figura 5.11 – Balança de precisão

Com o volume e o peso da mistura conhecidos, utilizou-se a Equação (5.3) para obter-se a concentração da mesma. Este procedimento foi feito em todos os ensaios.

5.5.1 PERFIS DE CONCENTRAÇÃO NO TUBO

Para os ensaios com calcário, foi necessário obter os perfis de concentração ao longo do tubo de recalque. Isto ocorreu devido ao fato de que a grande solubilidade do calcário faz com que a mistura fosse muito turva e impedisse a observação visual do escoamento no tubo de acrílico para determinação da velocidade crítica.

Utilizou-se o Tubo de Pitot para levantar os perfis verticais de concentração em 05 pontos do tubo de acrílico. Desta forma, pode-se analisar em qual velocidade obtinha-se a menor diferença de valores de concentração nos perfis, sendo a velocidade teórica limite que separa o escoamento heterogêneo do homogêneo.

O Tubo de Pitot coletou amostras da mistura nestes 05 pontos (A, B, C, D e E), que depois eram armazenados em béquers (Figuras 5.12, 5.13 e 5.14). Mediu-se o peso e o volume da mistura nestes béquers e utilizou-se a Equação (5.3) para obter as respectivas concentrações em volume.

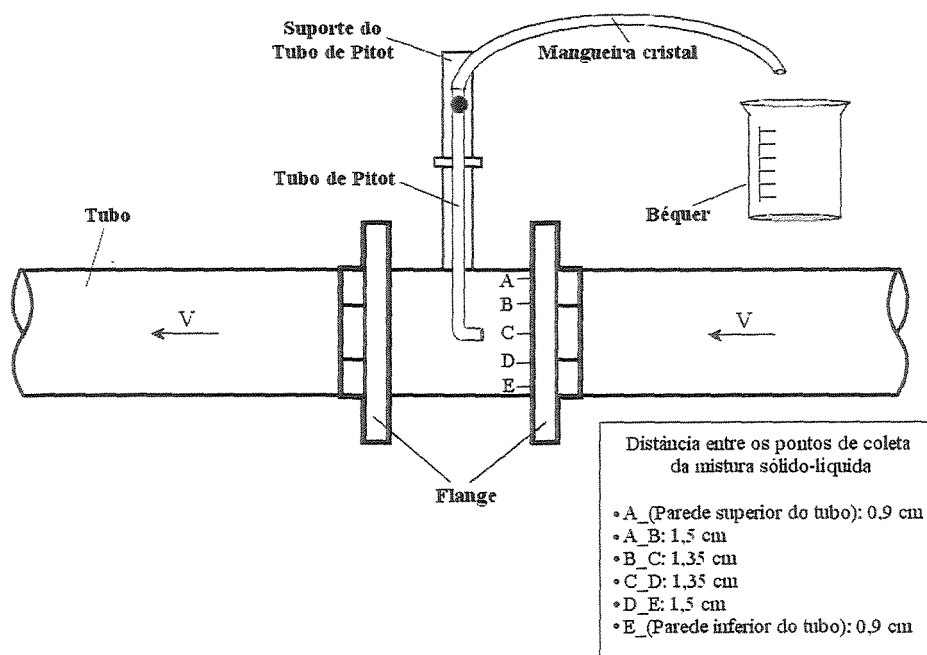


Figura 5.12 – Esquema do Tubo de Pitot

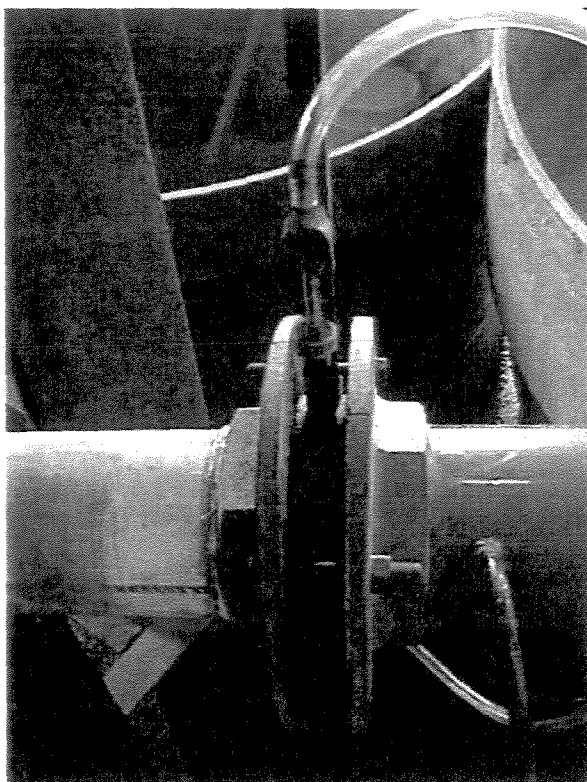


Figura 5.13 – Tubo de Pitot instalado na tubulação de recalque

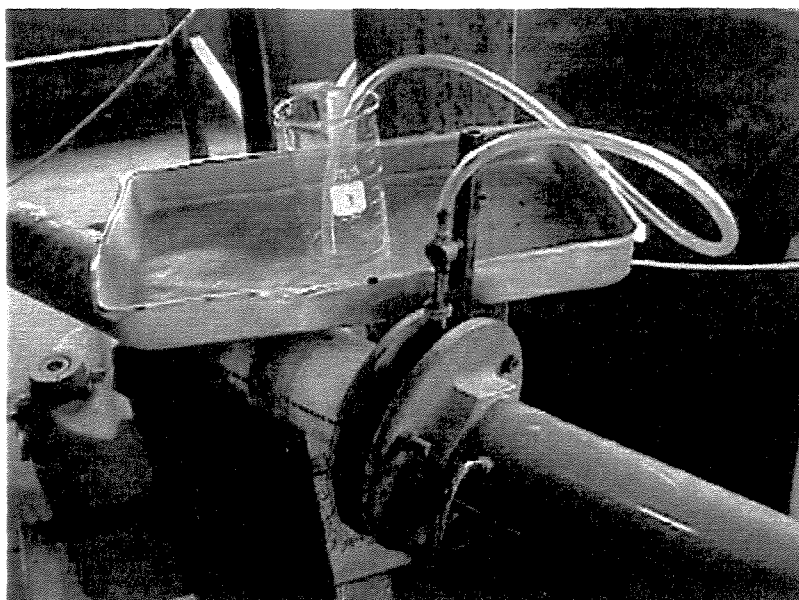


Figura 5.14 – Tubo de Pitot ligado à mangueira cristal para levar a mistura ao béquer

5.6 VELOCIDADE CRÍTICA DE SEDIMENTAÇÃO (V_{cs})

As velocidades críticas de sedimentação foram analisadas de formas diferentes para cada sólido.

Para a mistura areia-água, foi possível a observação visual do escoamento no interior do tubo de acrílico transparente (Figura 5.15), onde se verificava o instante em que o leito estacionário estava na iminência de entrar em movimento (escala crescente de velocidade) ou quando o leito estacionário estava na iminência de se formar (escala decrescente de velocidade).

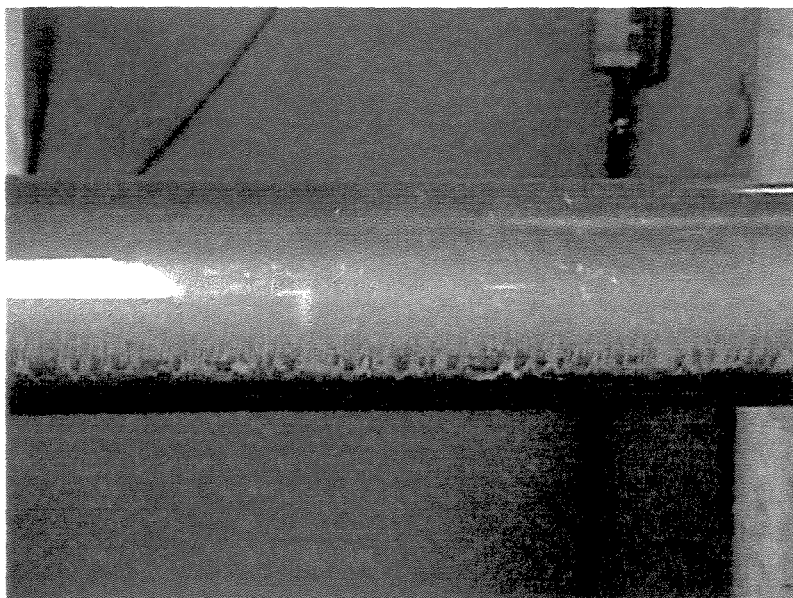


Figura 5.15 – Tubo de acrílico com leito estacionário de areia

Para a mistura calcário-água, não foi possível a observação visual do escoamento no interior do tubo de acrílico transparente devido à grande solubilidade do sólido calcário, que deixava a mistura turva. Com isso, optou-se obter as velocidades críticas de sedimentação através de equações propostas por outros autores. Calculou-se as velocidades críticas de sedimentação através das equações de calcário de BAIN & BONNINGTON (1970), CAIRNS et alli apud CHIEN, SZE-GOO (1994), SHOOK (1969) apud SATTO (1998) e ZANDI & GOVATOS (1967).

5.7 ANÁLISE DE DADOS

Para a realização deste trabalho, determinaram-se dados de vazão, perda de carga e concentração da mistura para cada ensaio.

Os valores de velocidade média foram calculados utilizando a equação da continuidade a partir da medida da vazão e do conhecimento da seção transversal do tubo, conforme consta no item 5.4. Os valores de perda de carga foram obtidos conforme consta no item 5.4.

Os valores de concentração da mistura foram obtidos através dos dados de peso e volume fornecidos pelo tanque volumétrico. A relação entre esses parâmetros calculados através da Equação (5.3) demonstrava a concentração em porcentagem de volume da mistura.

Para cada velocidade medida, foi relacionado um valor de perda de carga, a concentração da mistura e a situação do leito estacionário (com leito, sem leito ou velocidade crítica). A partir desses dados, construiu-se tabelas e gráficos que apresentam estas relações obtidas em laboratório.

5.8 DIFICULDADES DE OPERAÇÃO DO SISTEMA

Este item descreve os problemas surgidos durante a realização dos ensaios dentro do laboratório.

Um problema constante foi o desgaste por abrasão e corrosão dos rotores das bombas centrípetas. A abrasividade dos sólidos das misturas fez com que esses rotores sofressem avariações e trocados por novos.

Outro grande problema que surgiu durante os ensaios, foi a obstrução da tubulação pela areia. Isto ocorreu devido à baixa velocidade em que se estava trabalhando no sistema. O reparo desta ocorrência fez com que se perdesse um bom tempo para fazer a manutenção. A Figura 5.16 mostra esta situação.

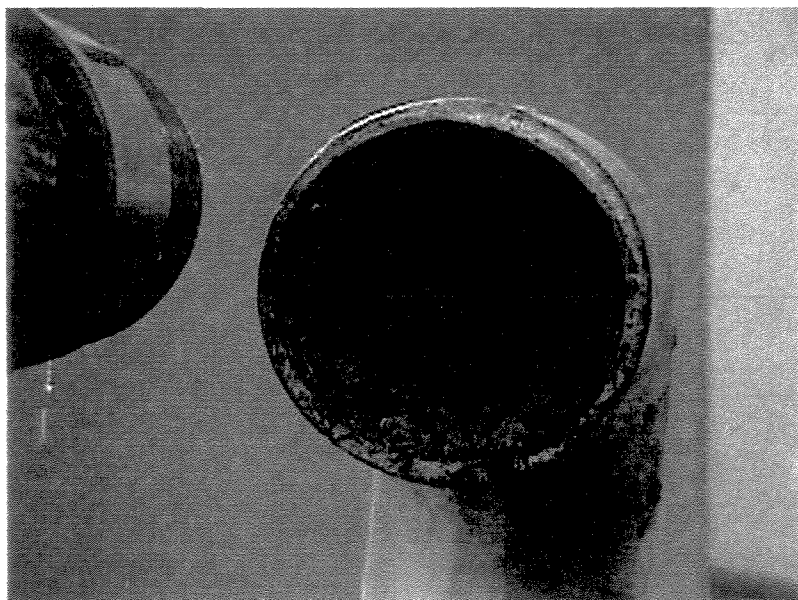


Figura 5.16 – Curva da tubulação obstruída pela areia

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De posse de todos o resultados obtidos dos ensaios, aqui são analisados e discutidos todos os parâmetros estudados.

6.1 ENSAIOS COM ÁGUA LIMPA

Primeiro foram realizados os ensaios somente com água, para que fosse possível a comparação com os ensaios com as misturas sólido-líquidas. A Figura 6.1 demonstra estes ensaios.

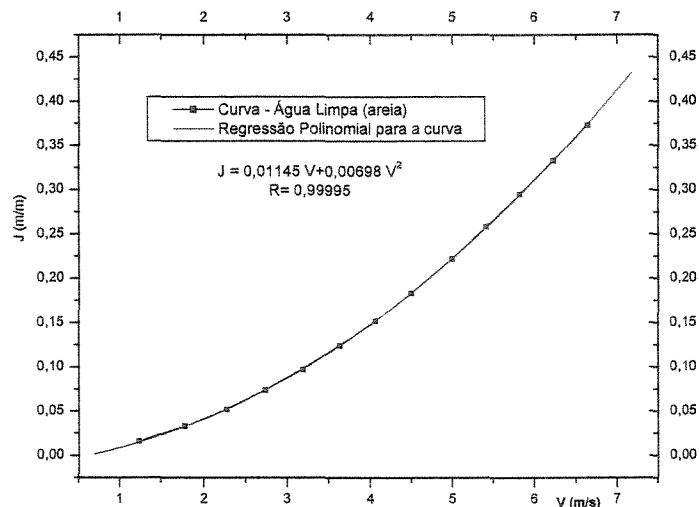


Figura 6.1 - Perda de Carga em função da Velocidade média
Água Limpa - Referência para os Ensaios com Areia

6.2 ENSAIOS COM A MISTURA ÁGUA-AREIA

Com a mistura areia-água foram realizados 176 ensaios, incluindo variações crescente de decrescente de velocidades. Nos ensaios com variação crescente de velocidades, iniciava-se o ensaio com uma velocidade baixa na qual era gradualmente aumentada até um máximo valor possível. Nos ensaios com variação decrescente de velocidade, iniciava-se o ensaio com uma velocidade alta a qual era reduzida gradualmente até um mínimo valor possível.

Os dois procedimentos de ensaios eram necessários afim de comparar os valores de velocidade crítica de sedimentação, para uma mesma concentração.

Para cada velocidade, foram obtidos a respectiva perda de carga e a concentração média expressa em porcentagem de volume da mistura. As Tabelas A.1 e A.2, do Anexo A, apresentam os dados obtidos para os ensaios com variação crescente de velocidades. As Tabelas A.3 e A.4 apresentam os dados obtidos para os ensaios com variação decrescente de velocidade.

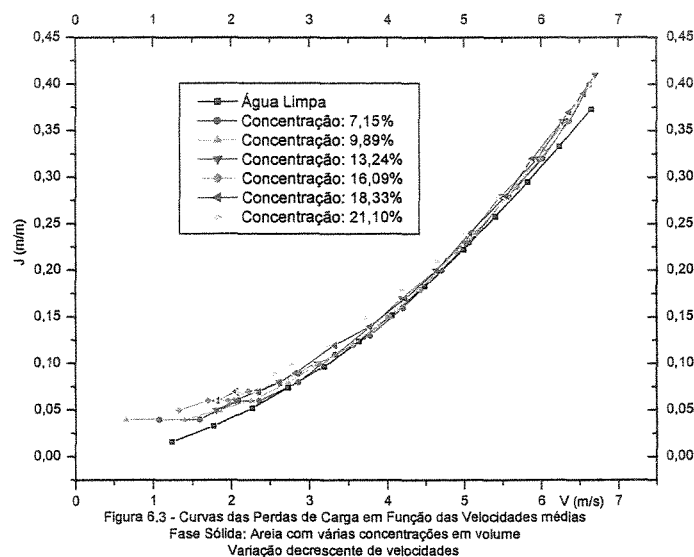
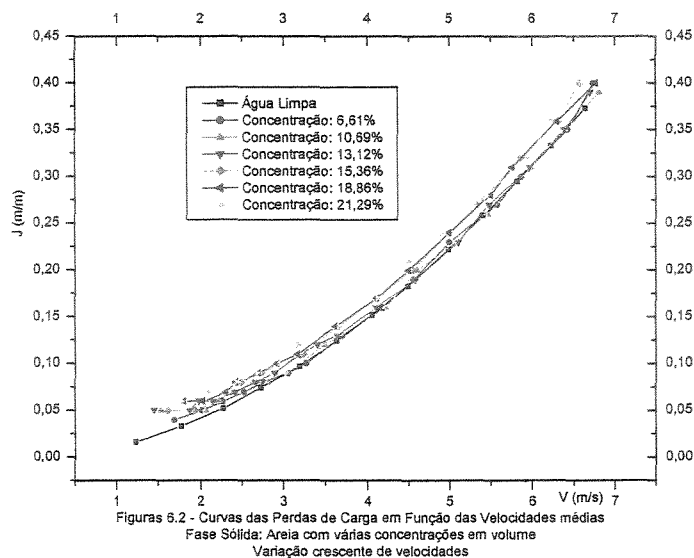
6.2.1 ANÁLISE DOS DADOS – CURVAS DE PERDA DE CARGA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO

Foram desenvolvidos gráficos nos quais as curvas representam os valores de perda de carga em função da velocidade média do escoamento. Essas curvas foram ajustadas (Ajuste Polinomial) de modo que se obtivessem equações representativas dessas curvas. As Figuras B.1, B.2, B.3, B.4, B.5, B.6, B.7, B.8, B.9, B.10, B.11 e B.12, do Anexo B, apresentam estas curvas.

Nessas curvas também estão indicados os valores de velocidade crítica de sedimentação, obtidas através da observação visual do escoamento no tubo de acrílico da bancada de ensaios.

6.2.2 RELAÇÃO ENTRE AS CURVAS

Para verificar a influência da concentração, todos os valores de $(J_m \times V)$ dos gráficos apresentados no Anexo B, foram plotadas e apresentados nas Figuras 6.2 e 6.3.



Os valores dos pontos que relacionam a perda de carga unitária com as velocidades médias do escoamento, apresentados nas Figuras 6.2 e 6.3 foram ajustados e mostrados nas Figuras 6.4 e 6.5.

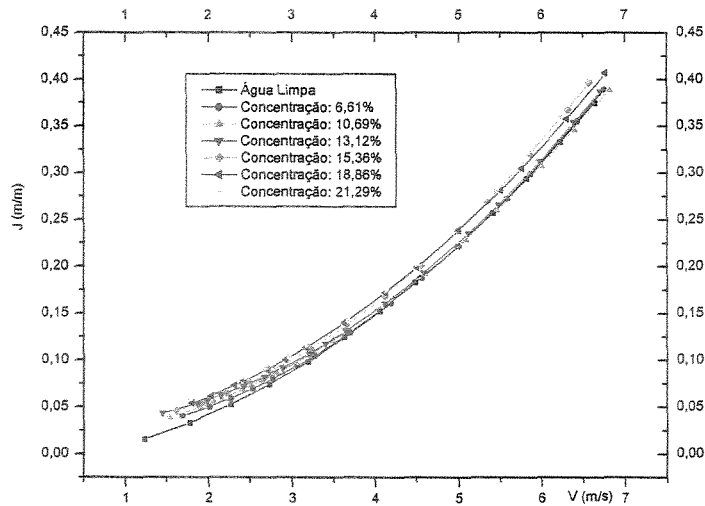


Figura 6.4 - Curvas Ajustadas das Perdas de Carga em Função das Velocidades médias
Fase Sólida: Areia com várias concentrações em volume
Variação crescente de velocidades

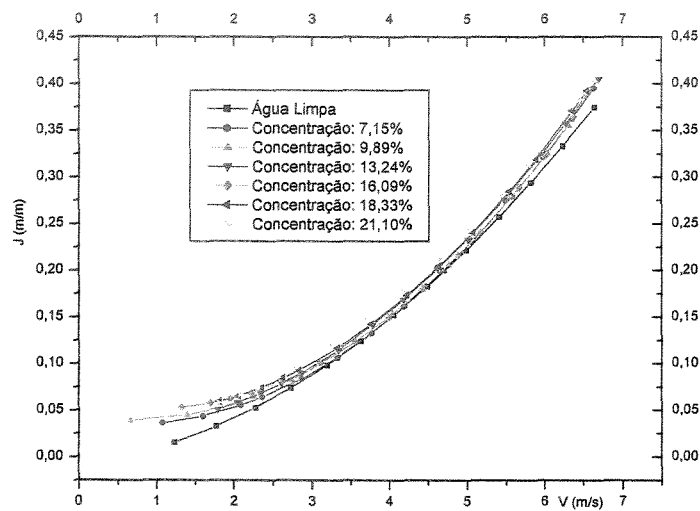


Figura 6.5 - Curvas Ajustadas das Perdas de Carga em Função das Velocidades médias
Fase Sólida: Areia com várias concentrações em volume
Variação decrescente de velocidades

6.2.3 VELOCIDADE CRÍTICA DE SEDIMENTAÇÃO

A utilização dos dois procedimentos, variações crescente e decrescente da velocidade média de escoamento, devem-se ao fato de que, nos casos de se iniciar com um leito estacionário constituído de partículas finas coesas em repouso por muito tempo, a velocidade crítica para uma certa concentração de sólido, é maior quando a variação de velocidade média é crescente do que decrescente. Isto se baseia no fato de que a velocidade requerida para fazer os grãos dos sólidos do leito estacionário entrarem em movimento deve ser maior do que a velocidade em que os grãos do sólido deixariam de estar em movimento para formarem o leito estacionário.

Para que se comprovasse isto, foram analisadas as velocidades críticas para os dois procedimentos (variação crescente e decrescente de velocidades). As Figuras 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11 apresentam comparações para valores de concentrações bem próximos.

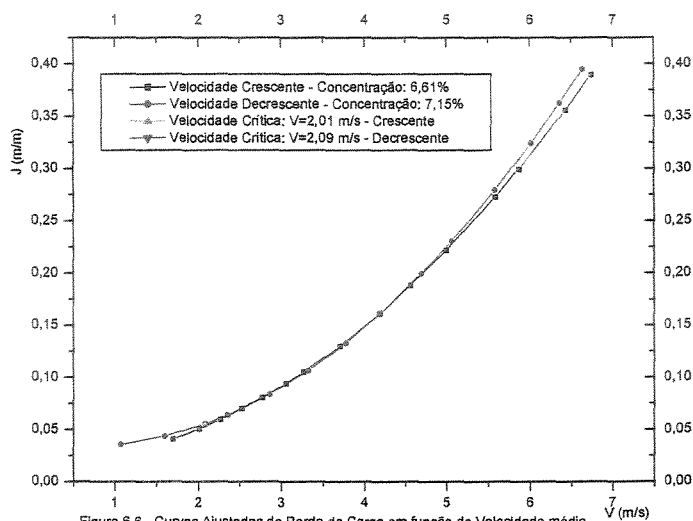


Figura 6.6 - Curvas Ajustadas de Perda de Carga em função de Velocidade média
Curvas comparativas entre variações crescente e decrescente de velocidades
Concentrações de 6,61% e 7,15%

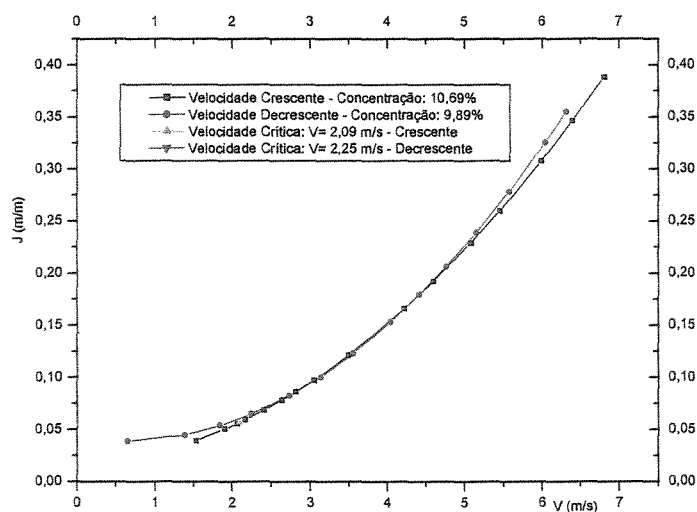


Figura 6.7 - Curvas Ajustadas de Perda de Carga em função de Velocidade média
Curvas comparativas entre variações crescente e decrescente de velocidades
Concentrações de 10,69% e 9,89%

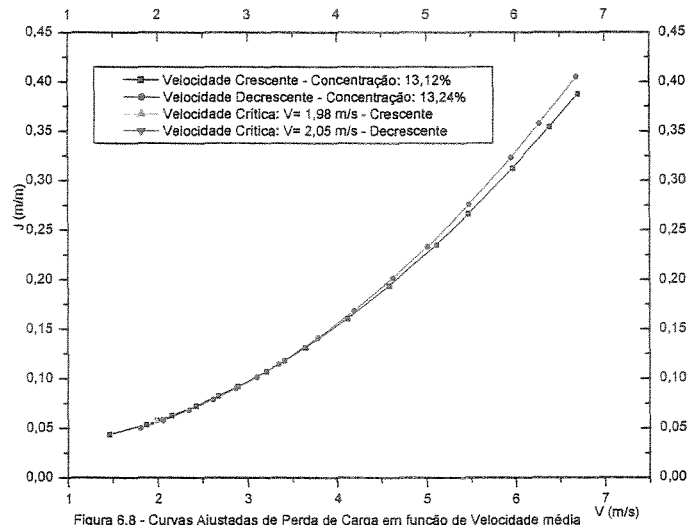


Figura 6.8 - Curvas Ajustadas de Perda de Carga em função de Velocidade média
Curvas comparativas entre variações crescente e decrescente de velocidades
Concentrações: 13,12% e 13,24%

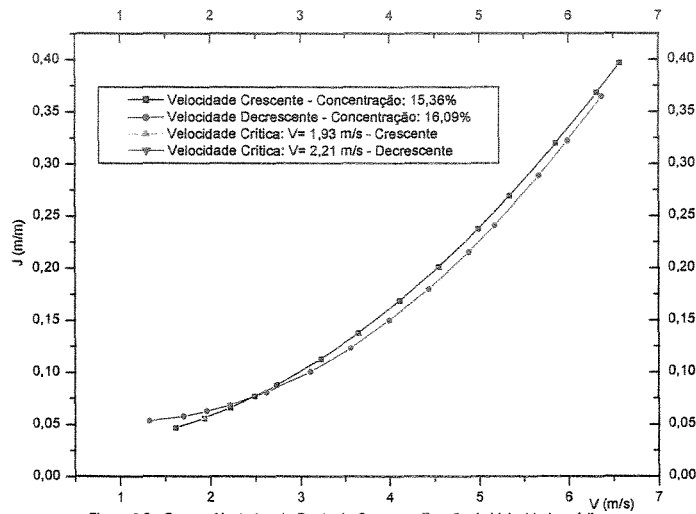


Figura 6.9 - Curvas Ajustadas de Perda de Carga em função de Velocidade média
Curvas Comparativas entre variações crescente e decrescente de velocidades
Concentrações: 15,36% e 16,09%

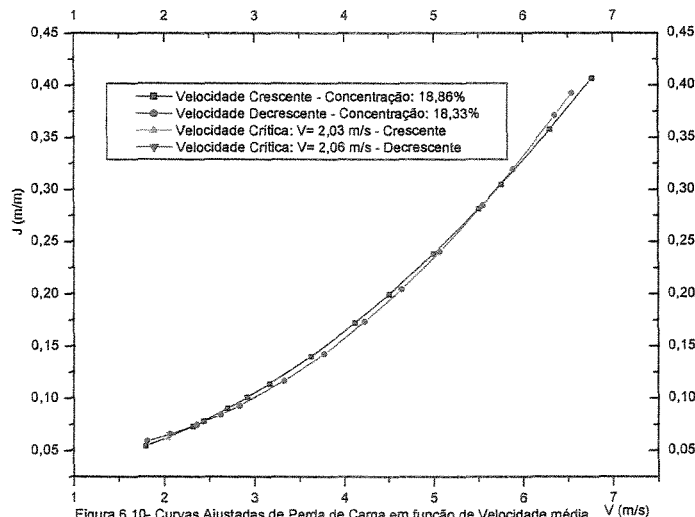


Figura 6.10 - Curvas Ajustadas de Perda de Carga em função de Velocidade média
Curvas Ajustadas entre variações crescente e decrescente de velocidades
Concentrações: 18,86% e 18,33%

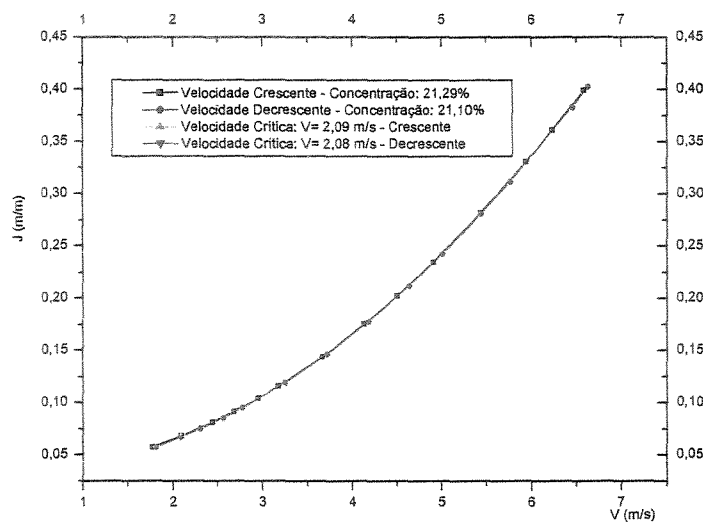


Figura 6.11 - Curvas Ajustadas de Perda de Carga em Função de Velocidade média
Curvas comparativas entre variações crescente e decrescente de velocidades
Concentrações: 21,29% e 21,10%

Analisando os valores de velocidades críticas de sedimentação entre as variações crescentes e decrescentes, observa-se que das seis comparações feitas, cinco apresentam valores maiores para a variação decrescente de velocidades, contrariando o que foi afirmado anteriormente.

Mas vale salientar que as diferenças entre esses valores são muito baixos (0,10 m/s na média) e que não representam uma notável desigualdade entre as velocidades críticas de sedimentação. Também há de notificar o fato de que essas velocidades foram obtidas através do método visual no tubo de acrílico, onde observava o momento em que o leito estacionário estava na iminência de desaparecer ou de se formar. E que portanto, pode levar a incertezas porque depende da habilidade do observador.

Outro aspecto a considerar é que na maioria das vezes o leito estacionário não tinha sido mantido em repouso por muito tempo.

Para efeito de conclusão, assume-se que os valores de velocidade crítica de sedimentação para o caso de mistura de água-areia, não se alteram com os procedimentos adotados.

6.2.4 PARÂMETRO K_D

Para se calcular os valores de K_D , isolou-se este parâmetro (K_D) da Equação (3.23), obtendo-se a seguinte Equação:

$$K_D = \frac{\Phi}{\left[\frac{V^2 \times \sqrt{C_d}}{g \times D \times (d_{rs} - 1)} \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (6.1)$$

O valor de C_d foi calculado através da Equação (3.24).

$$C_d = 4/3 \cdot [g \cdot d_s \cdot (d_{rs} - 1)] / V_s^2 \quad (3.24)$$

O valor de V_s foi calculado através da Equação (3.39) de STOKES.

$$V_s = \frac{d^2}{18 \times \mu} \times (\gamma_s - \gamma_A) \quad (3.39)$$

Nas quais:

γ_s = peso específico do sólido (kg/m^3);

γ_A = peso específico da água (kg/m^3);

d = diâmetro representativo do sólido (areia)= 2×10^{-4} m;

μ = viscosidade dinâmica da água ($\text{kgf} \cdot \text{s/m}^2$).

Para essas condições, $V_s = 0,357$ m/s.

Com o valor de V_s conhecido, calculou-se $C_d = 3,36$.

Para água limpa (J_1), foram utilizados os valores de perda de carga apresentados na Figura 6.1. Os valores de J_m foram calculados através da Equação (3.20) e os valores de Φ calculados pela Equação (3.21). Todos esses parâmetro foram calculados isoladamente para

várias velocidades. As Tabelas C.1 e C.2, do Anexo C, apresentam os valores desses parâmetros calculados.

Com C_d e V_s calculados através da Equações (3.24) e (3.39), respectivamente, os valores de K_D , para cada velocidade e concentração, foram calculados utilizando a Equação (3.38) e os valores de Φ apresentados nas Tabelas C.1 e C.2. As Tabelas C.3 e C.4, do Anexo C, apresentam os valores de K_D calculados.

Os dados das Tabelas C.3 e C.4 foram plotados em gráficos, para fins de melhor visualização do comportamento de K_D em função da velocidade média e da concentração. As Figuras 6.11 e 6.12 apresentam as curvas de K_D em função da velocidade média para cada concentração.

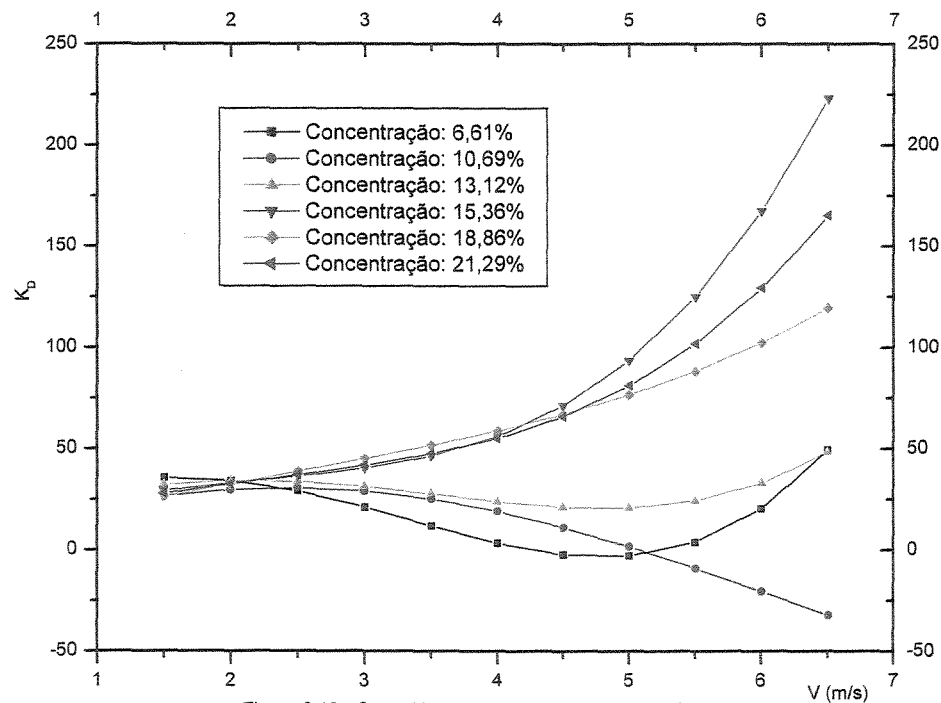


Figura 6.12 - Curva K_D em função da Velocidade média
Fase Sólida: Areia com várias concentrações em volume
Variação crescente de velocidade

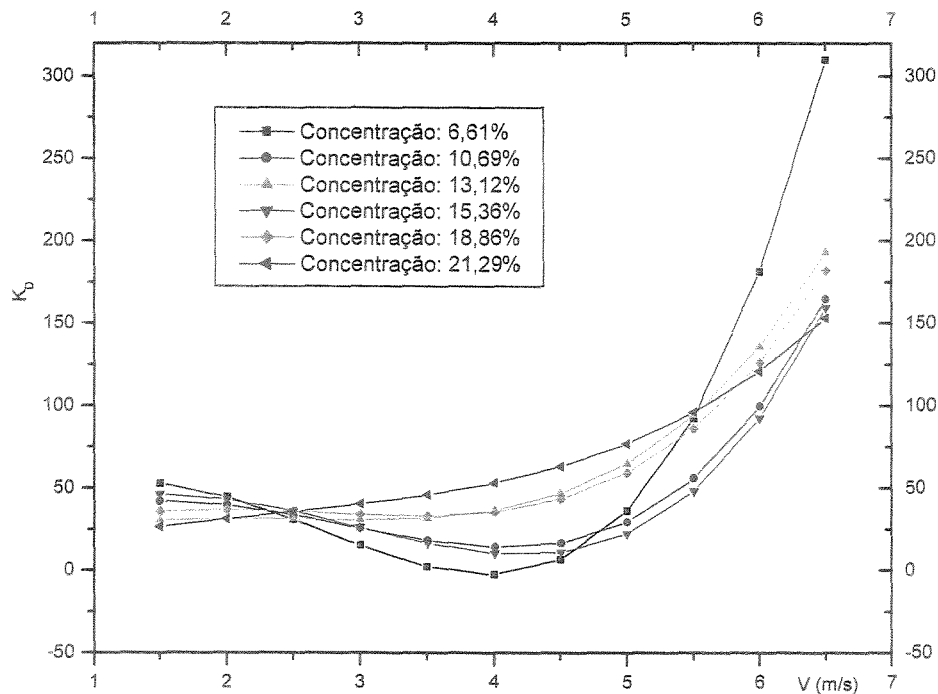


Figura 6.13 - Curva K_D em função da Velocidade média
Fase Sólida: Areia com várias concentrações em volume
Variação decrescente de velocidade

Observando as curvas das Figuras 6.12 e 6.13, nota-se que as curvas de K_D em função da velocidade média em variação crescente de velocidades estão dispostas de forma aleatória e desordenadas em relação às curvas com variação decrescente de velocidades.

Porém, nas duas figuras, as curvas cruzam-se num mesmo ponto, e este ponto coincide com aqueles que relacionam os valores das velocidades críticas de sedimentação com os respectivos valores de K_D . Isto leva a concluir que, para as velocidades críticas de sedimentação, os valores de K_D independem da concentração da mistura.

As Figuras 6.14 e 6.15 apresentam as curvas de K_D em função do número de Reynolds para cada concentração. As Figuras 6.16 e 6.17 apresentam as curvas de K_D em função do número de Froude para cada concentração.

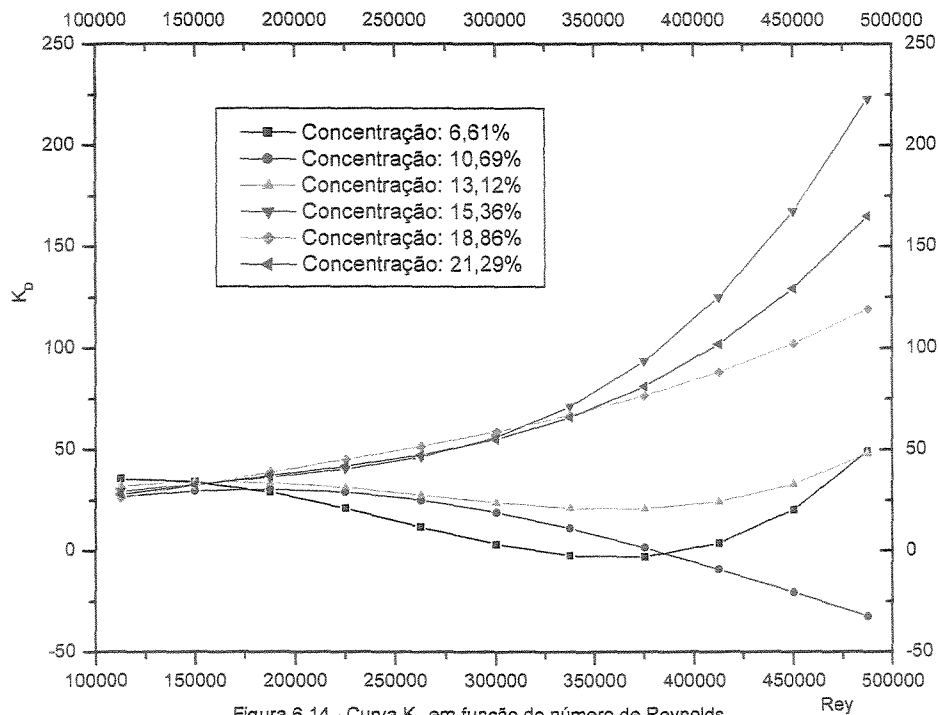


Figura 6.14 - Curva K_p em função do número de Reynolds
 Fase Sólida: Areia com várias concentrações em volume
 Variação crescente de velocidade

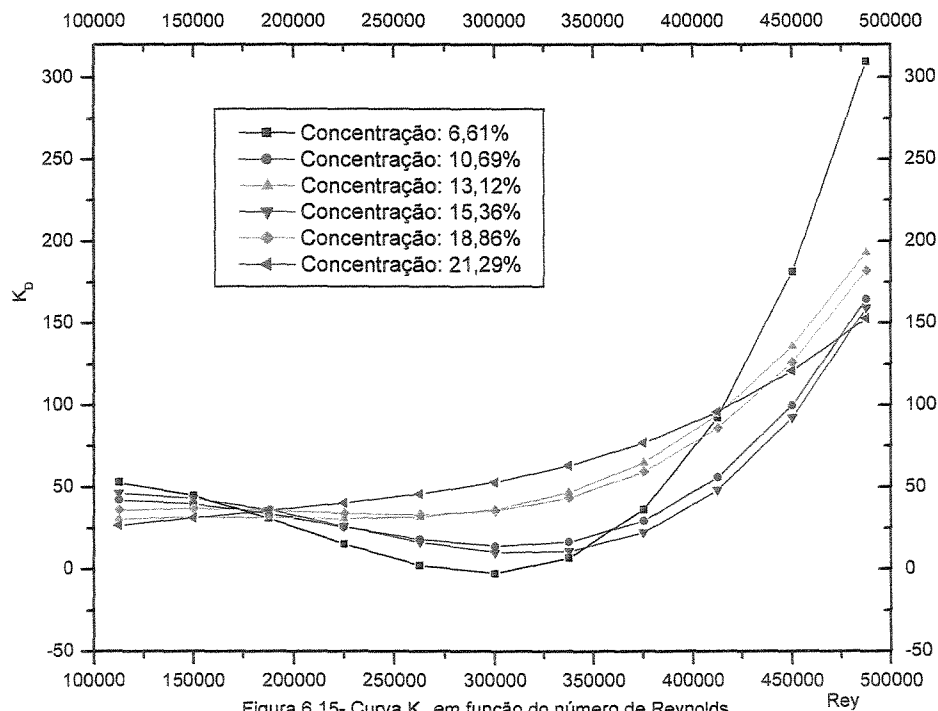
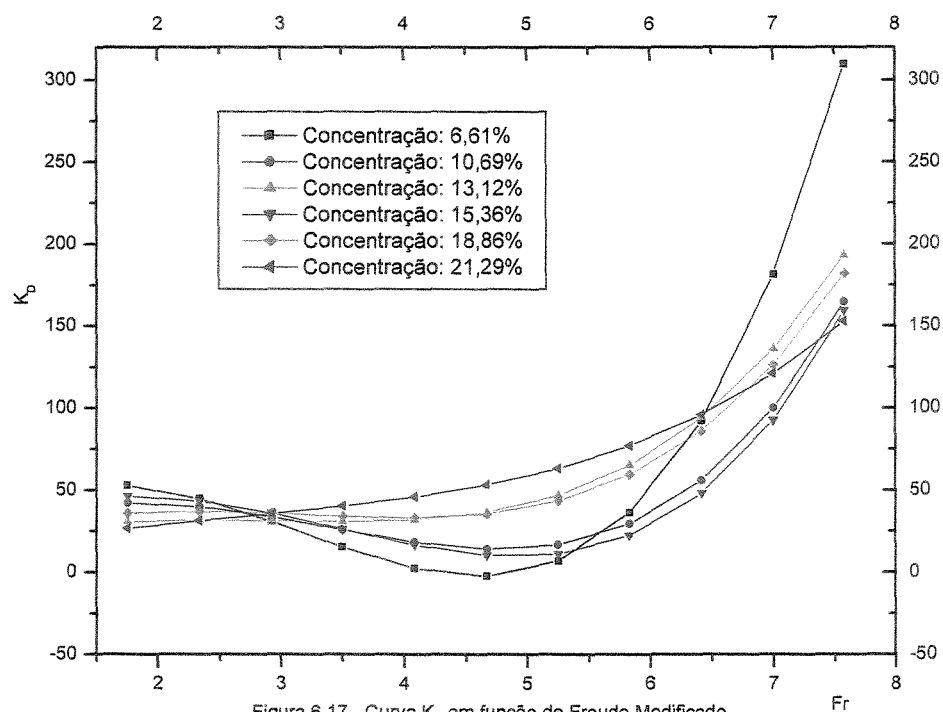
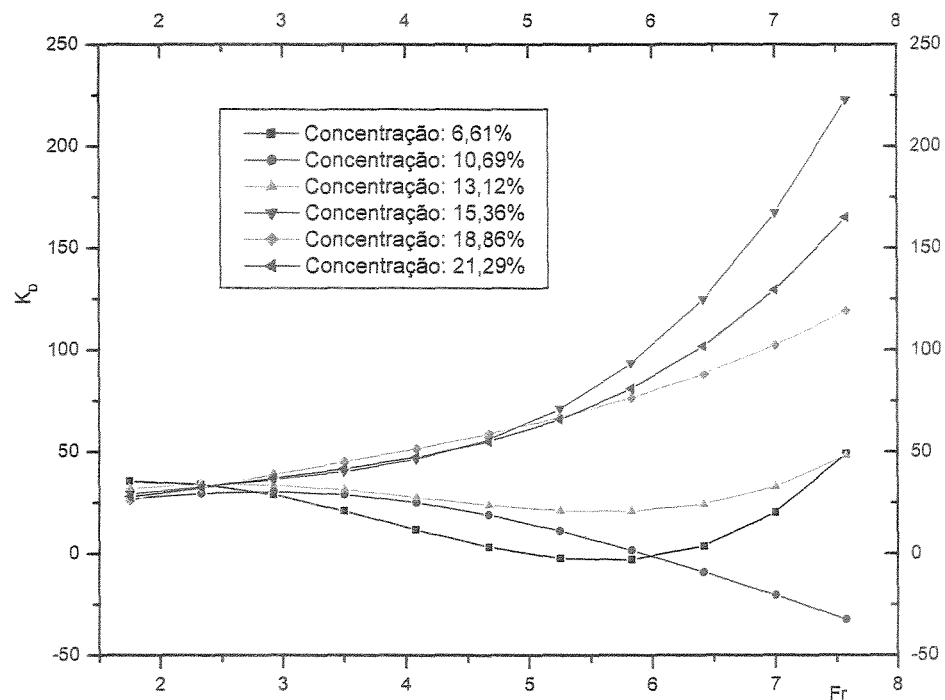


Figura 6.15- Curva K_p em função do número de Reynolds
 Fase Sólida: Areia com várias concentrações em volume
 Variação decrescente de velocidade



6.3 ENSAIOS COM A MISTURA ÁGUA-CALCÁRIO

Com a mistura água-calcário foram realizados 86 ensaios, com variação decrescente de velocidades.

Para possibilitar a comparação com os ensaios da mistura água-calcário, primeiro foram realizados os ensaios com água limpa. A Figura 6.18 apresenta esses ensaios.

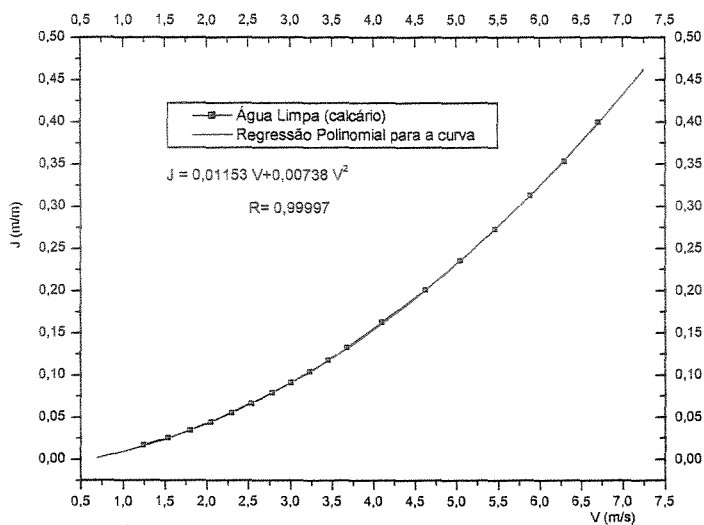


Figura 6.18 - Curva da Perda de Carga em Função da Velocidade média
Água Limpa - Referências para os ensaios com calcário

Para cada velocidade, foi obtido a respectiva perda de carga e a concentração em volume (%) da mistura. As Tabelas D.1 e D.2, do Anexo D, apresentam os dados obtidos para os ensaios.

6.3.1 ANÁLISE DE DADOS – CURVAS DE PERDA DE CARGA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO

Foram desenvolvidos gráficos nos quais as curvas representam os valores de perda de carga em função da velocidade média do escoamento. Essas curvas foram ajustadas (Ajuste Polinomial) de modo que se obtivessem equações representativas dessas curvas. As Figuras E.1, E.2, E.3, E.4, E.5 e E.6, do Anexo E, apresentam estas curvas.

6.3.2 RELAÇÃO ENTRE AS CURVAS

Para se verificar a influência da concentração do sólido da mistura, foram apresentadas na Figura 6.19 todas as curvas de perda de carga mostrados no Anexo E.

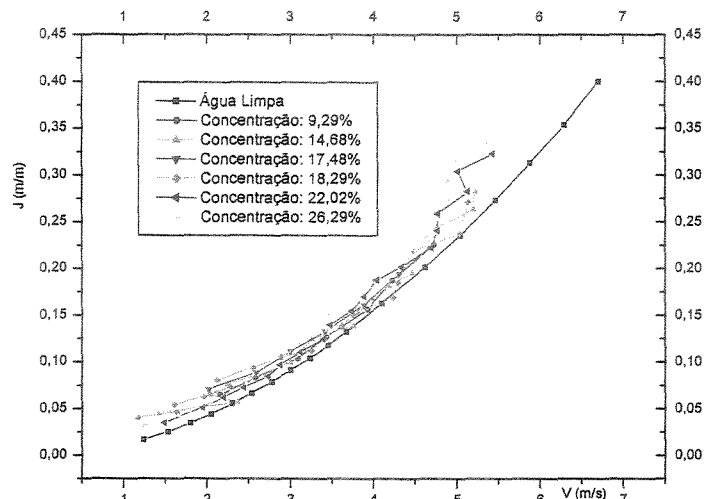


Figura 6.19 - Curvas de Perda de Carga em função da Velocidade média
Concentrações de Calcário e Água Limpa

A Figura 6.20 apresentam os ajustes dos pontos da Figura 6.19. Os ajustes foram feitos através de função polinomial.

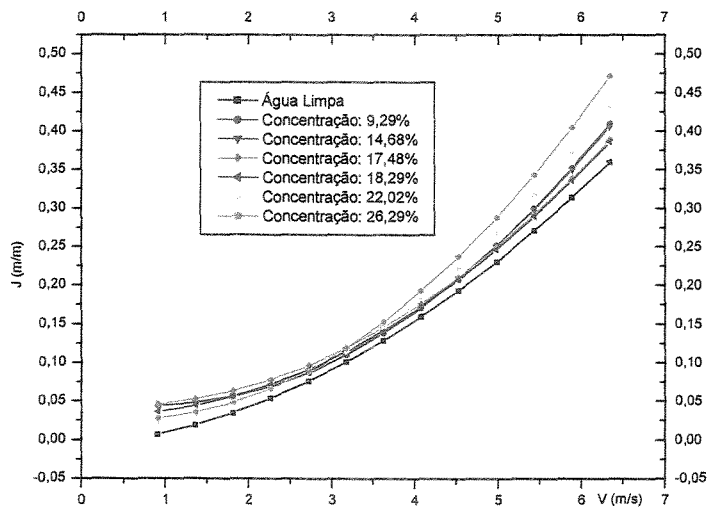


Figura 6.20 - Curvas Ajustadas de Perda de Carga em função da Velocidade média
Concentrações de Calcário e Água Limpa

6.3.3 VELOCIDADE CRÍTICA DE SEDIMENTAÇÃO

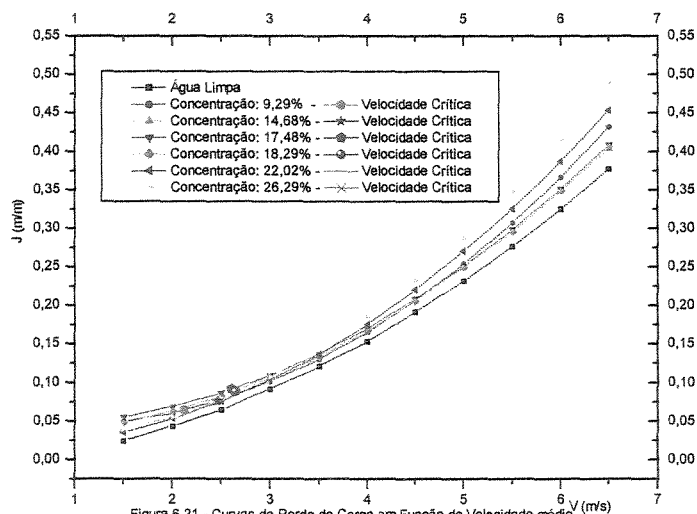
Para a mistura calcário-água, não foi possível a observação visual do escoamento no interior do tubo de acrílico devido à suspensão sólida calcário, que deixava a mistura turva. Com isso, optou-se obter as velocidades críticas de sedimentação através de equações propostas por autores. Calculou-se as velocidades críticas de sedimentação de calcário através das Equações de BAIN & BONNINGTON (1970), CAIRNS et al apud CHIEN, SZE-GOO (1994), SHOOK (1969) apud SATTO (1998) e ZANDI & GOVATOS (1967).

Utilizou-se, respectivamente, as Equações (3.17), (3.09), (3.16) e (3.14) para se calcular empiricamente os valores de velocidade crítica de sedimentação (V_{CS}). Calculou-se um valor de velocidade crítica de sedimentação para cada concentração, utilizando todas as equações. A Tabela 6.1 apresenta os valores calculados com essas equações.

Tabela 6.1 – Planilha de cálculo de V_{CS} para cada concentração

Concentração em volume	Velocidade Crítica de Sedimentação (V_{CS}) para as equações dos autores			
	BAIN & BONNINGTON (1970)	CAIRNS et al apud CHIEN SZE-GOO (1994)	SHOOK (1969) apud SATTO (1998)	ZANDI & GOVATOS (1967)
9,29%	2,115	0,213	2,088	0,557
14,68%	2,463	0,23	2,432	0,7
17,48%	2,611	0,238	2,578	0,764
18,29%	2,651	0,24	2,617	0,782
22,02%	2,82	0,248	2,784	0,858
22,02%	2,991	0,255	2,954	0,937

As curvas com as velocidades críticas de sedimentação calculadas estão apresentadas nas Figuras 6.21, 6.22, 6.23 e 6.24.



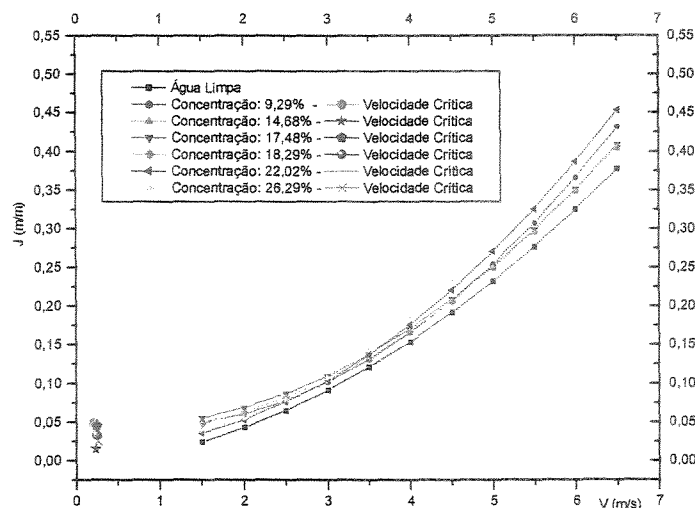


Figura 6.22 - Curvas de Perda de Carga em Função de Velocidade média
Água Limpa e Várias Concentrações

Velocidades Críticas de sedimentação calculadas através da Equação CAIRNS et al apud CHIEN SZE-GOO (1994)

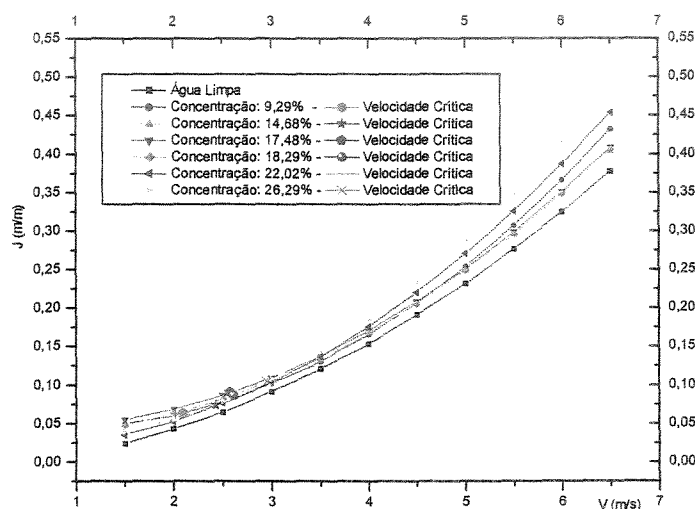


Figura 6.23 - Curvas de Perda de Carga em Função de Velocidade média
Água Limpa e Várias Concentrações

Velocidades Críticas de sedimentação calculadas através da Equação SHOOK et al

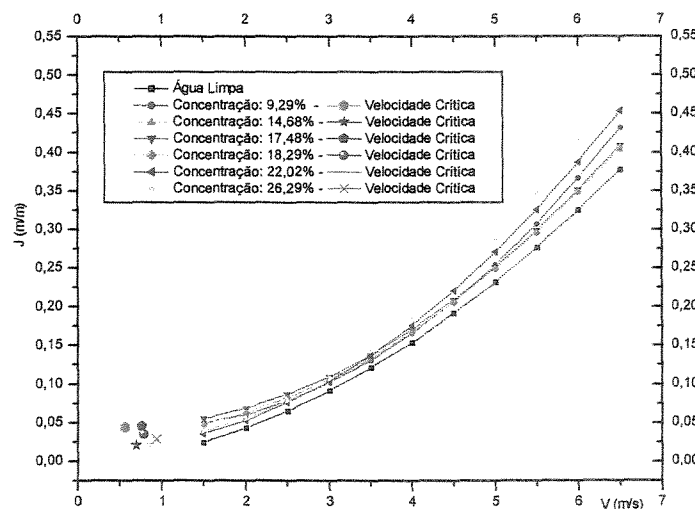


Figura 6.24 - Curvas de Perda de Carga em Função de Velocidade média
Água Limpa e Várias Concentrações

Velocidades Críticas de sedimentação calculadas através da Equação ZANDI & GOVATOS (1967)

Analisando a Tabela 6.1 e as curvas das Figuras 6.21, 6.22, 6.23 e 6.24, nota-se que as Equações de CAIRNS et al apud CHIEN, SZE-GOO (1994) e ZANDI & GOVATOS (1967) não se adaptaram às condições de escoamento dessa pesquisa.

Com as Equações de BAIN & BONNINGTON (1970) e SHOOK (1969) apud SATTO (1998), foram encontrados valores de V_{CS} que podem corresponder à realidade do escoamento da mistura água-calcário. Mesmo porque os valores médios de V_{CS} das duas Equações são muito próximos, o que leva a concluir que para calcular a V_{CS} desse tipo de mistura, pode-se utilizar essas duas Equações.

Para a Equação (3.17) de BAIN & BONNINGTON (1970), o valor médio de V_{CS} calculado foi $V_{CS} = 2,6$ m/s. Para a Equação (3.16) de SHOOK (1969) apud SATTO (1998), o valor de V_{CS} médio calculado foi $V_{CS} = 2,57$ m/s.

6.3.4 PERFIL DE CONCENTRAÇÃO NA TUBULAÇÃO

Com o objetivo de distinguir numericamente os escoamentos heterogêneos sem e com leito estacionário, foram analisados os perfis de concentração ao longo da vertical da tubulação. Para isso utilizou-se um Tubo de Pitot instalado na no tubo, de forma que pudesse coletar amostras da mistura em cinco pontos em linha vertical no tubo, um ponto central e os outros periféricos, como mostra a Figura 5.12.

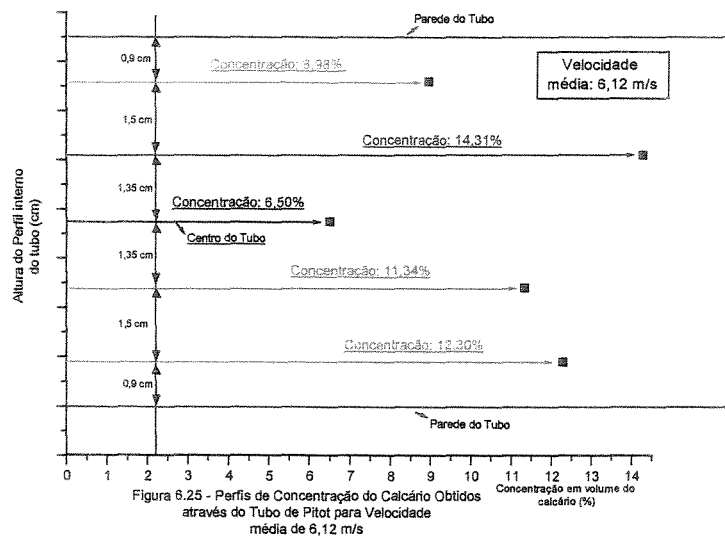
Utilizou-se uma concentração média para a mistura (15% em volume de sólido), onde a velocidade do escoamento foi variada em ordem crescente, de forma que para cada velocidade, coletava-se amostras em todos os pontos

A Tabela 6.2 apresenta os dados obtidos através do Tubo de Pitot. Analisando esses dados, nota-se que para todas as velocidades, a concentração da mistura no centro do tubo é sempre bem inferior aos pontos periféricos. Este comportamento atípico deverá ser explorado em trabalhos futuros uma vez que não consta nos objetivos desta pesquisa.

Tabela 6.2 – Perfil vertical de concentração em volume ao longo do tubo

Perfil de Concentrações através do Tubo de Pitot					
V (m/s)	Concentração em volume (%)				
	Perfil A	Perfil B	Perfil C (Centro)	Perfil D	Perfil E
3,03	14,652	7,845	2,212	3,734	3,405
3,94	15,117	10,293	4,377	6,512	2,237
4,8	11,250	10,654	6,288	10,802	7,179
5,29	11,620	10,806	6,525	11,734	4,484
5,75	12,216	11,198	4,970	6,889	8,831
6,12	12,300	11,344	6,505	14,307	8,978
6,47	12,816	11,090	7,956	11,607	10,820
6,81	13,598	12,019	8,031	12,661	11,372

Foi estimado a velocidade de 6,47 m/s com sendo a velocidade que delimita o escoamento heterogêneo sem leito do homogêneo, pois, a concentração do Perfil A (ponto mais alto do tubo – 10,82%) representa 84,4% da concentração do Perfil E (ponto mais baixo do tubo – 12,81%), uma porcentagem bastante representativa para a distribuição de sólido no perfil vertical do tubo. Segundo WASP et alli, 1977, para $C/C_a \geq 0,8$ é considerado uniforme. As Figuras 6.25, 6.26 e 6.27 apresentam esses perfis de forma ilustrada no tubo, a partir de 6,12 m/s.



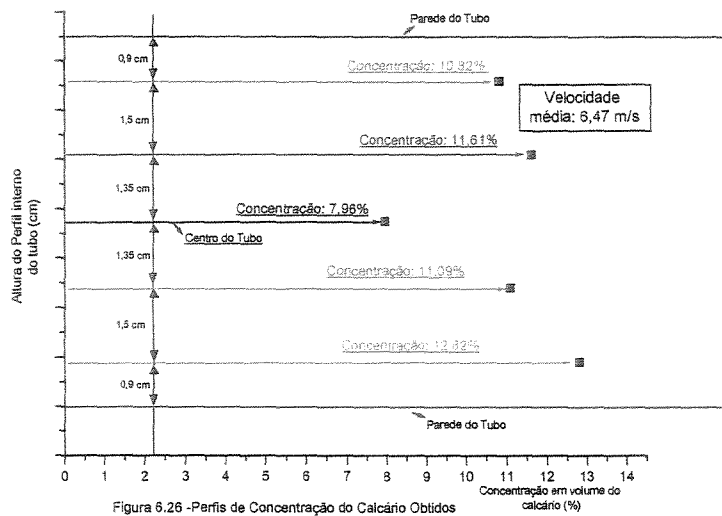


Figura 6.26 - Perfis de Concentração do Calcário Obtidos através do Tubo de Pitot para Velocidade média de 6,47 m/s

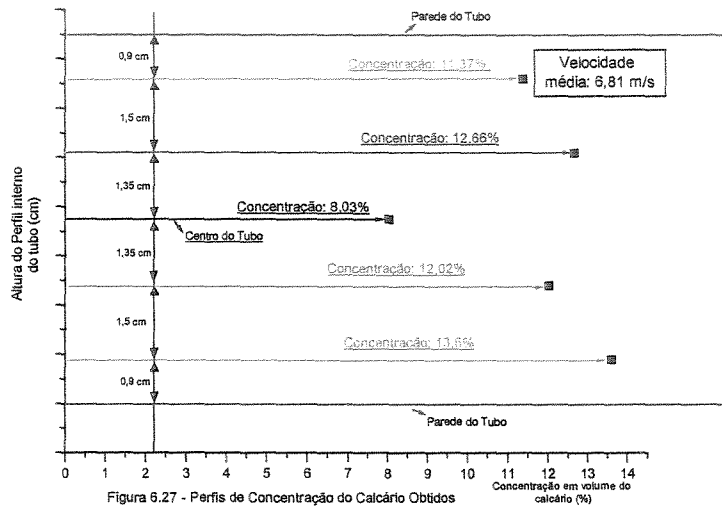


Figura 6.27 - Perfis de Concentração do Calcário Obtidos através do Tubo de Pitot para Velocidade média de 6,81 m/s

6.3.5 PARÂMETRO K_D

Os valores de K_D calculados resultaram números muito altos. Isto se deve ao valor muito baixo do diâmetro representativo do calcário ($d_{50} = 0,05$ mm), que influencia o coeficiente de arraste (C_d) e a velocidade de queda do sólido (V_s).

$$V_s = \frac{d^2}{18 \times \mu} \times (\gamma_s - \gamma_A) \quad (6.2)$$

Como pode ser observado na Equação (6.2), a velocidade de sedimentação é diretamente proporcional ao diâmetro da partícula elevado à potência 2, resultando também valores muito pequenos para a velocidade de sedimentação.

Por outro lado, verificando a Equação (3.24), C_d é inversamente proporcional à velocidade da sedimentação elevada à potência 2, resultando valores muito baixos de C_d .

$$C_d = 4/3.[g.d_s.(d_{rs} - 1)] / V_s^2 \quad (3.24)$$

Com C_d tendo um valor muito baixo, os valores de K_D seriam extremamente altos, devido ao fato de C_d estar localizado no denominador da Equação (6.1).

$$K_D = \frac{\Phi}{\left[\frac{V^2 \times \sqrt{C_d}}{g \times D \times (d_{rs} - 1)} \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (6.1)$$

Como os valores de K_D afastaram-se muitíssimo daqueles encontrados na literatura, concluiu-se que as misturas água-calcário apresentam comportamentos diferentes das misturas heterogêneas compostas com sólidos não coesivos.

Assim, para se calcular as perdas de carga, optou-se pela Fórmula Universal de Perda de Carga, Equação (6.3).

$$j = f \times \frac{1}{D} \times \frac{V^2}{2 \times g} \quad (6.3)$$

Nas quais:

j = perda de carga distribuída (m/m);

f = fator de atrito;

D = diâmetro do tubo (m);

V = velocidade do escoamento (m/s) e

g = aceleração da gravidade (m/s^2).

Para que se pudesse utilizar esta equação, foi preciso definir a relação do fator de atrito f em função da concentração da mistura e do número de Reynolds, uma vez que os outros parâmetros da equação são conhecidos.

Isolou-se o fator de atrito f na Equação (6.4).

$$f = \frac{j}{\frac{1}{D} \times \frac{V^2}{2 \times g}} \quad (6.4)$$

O número de Reynolds foi calculado através da Equação (6.5).

$$Re\ y = \frac{V \times D}{\nu} \quad (6.5)$$

Na qual:

ν = viscosidade cinemática.

Com os números de Reynolds calculados através da Equação (6.5), os valores dos fatores de atrito foram calculado através da Equação (6.4). As Tabelas 6.3 e 6.4 apresentam os valores de f obtidos através dessas equações. Os valores de J foram obtidos através das curvas ajustadas das Figuras E.1, E.2, E.3, E.4, E.5 e E.6.

Tabela 6.3 – Valores de fator de atrito f calculados para cada concentração, número de Reynolds e velocidade média

Fator de Atrito (f)									
		Água Limpa		Conc. 9,29%		Conc. 14,68%		Conc. 17,48%	
V (m/s)	Rey	J (m/m)	f	J (m/m)	f	J (m/m)	f	J (m/m)	f
1,5	112500	0,024	0,016	0,050	0,033	0,051	0,033	0,056	0,037
2,0	150000	0,043	0,016	0,061	0,022	0,063	0,023	0,069	0,025
2,5	187500	0,065	0,015	0,078	0,018	0,081	0,019	0,087	0,021
3,0	225000	0,091	0,015	0,102	0,017	0,104	0,017	0,110	0,018
3,5	262500	0,121	0,015	0,131	0,016	0,133	0,016	0,138	0,017
4,0	300000	0,154	0,014	0,166	0,015	0,168	0,015	0,171	0,016
4,5	337500	0,192	0,014	0,207	0,015	0,208	0,015	0,209	0,015
5,0	375000	0,232	0,014	0,254	0,015	0,254	0,015	0,251	0,015
5,5	412500	0,277	0,013	0,307	0,015	0,306	0,015	0,299	0,015
6,0	450000	0,325	0,013	0,366	0,015	0,363	0,015	0,351	0,014
6,5	487500	0,377	0,013	0,432	0,015	0,426	0,015	0,409	0,014

Tabela 6.4 – Valores de fator de atrito f calculados para cada concentração, número de Reynolds e velocidade média

Fator de Atrito (f)							
		Conc. 18,29%		Conc. 22,02%		Conc. 26,29%	
V (m/s)	Rey	J (m/m)	f	J (m/m)	f	J (m/m)	f
1,5	112500	0,048	0,031	0,036	0,024	0,040	0,026
2,0	150000	0,063	0,023	0,053	0,020	0,056	0,021
2,5	187500	0,082	0,019	0,076	0,018	0,079	0,019
3,0	225000	0,106	0,017	0,104	0,017	0,108	0,018
3,5	262500	0,134	0,016	0,137	0,016	0,144	0,017
4,0	300000	0,168	0,015	0,176	0,016	0,186	0,017
4,5	337500	0,206	0,015	0,221	0,016	0,234	0,017
5,0	375000	0,249	0,015	0,271	0,016	0,288	0,017
5,5	412500	0,296	0,014	0,326	0,016	0,349	0,017
6,0	450000	0,349	0,014	0,387	0,016	0,416	0,017
6,5	487500	0,406	0,014	0,454	0,016	0,490	0,017

Através dos dados obtidos nas Tabelas 6.3 e 6.4, foram plotadas curvas de fator de atrito f em função do número de Reynolds (Rey). Essas curvas foram ajustadas através de regressão potencial segundo a Equação 6.6. As Figuras 6.28, 6.29, 6.30, 6.31, 6.32 e 6.33 apresentam essas curvas. Os valores dos parâmetros Y_0 , A_1 e T_1 foram ajustados em função da concentração obtendo-se as Equações 6.7, 6.8 e 6.9.

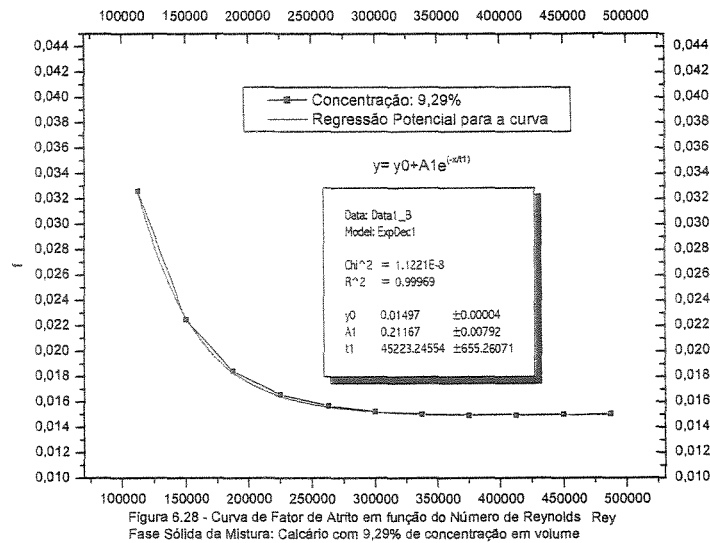


Figura 6.28 - Curva de Fator de Atrito em função do Número de Reynolds Rey
Fase Sólida da Mistura: Calcário com 9,29% de concentração em volume

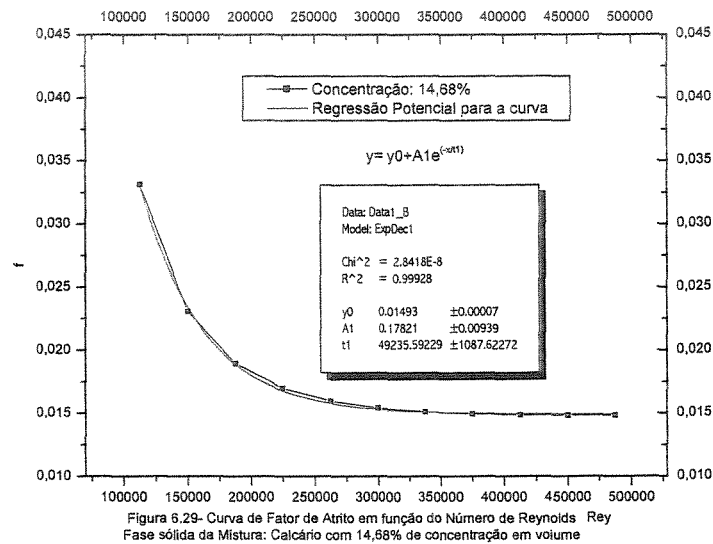


Figura 6.29 - Curva de Fator de Atrito em função do Número de Reynolds Rey
Fase sólida da Mistura: Calcário com 14,68% de concentração em volume

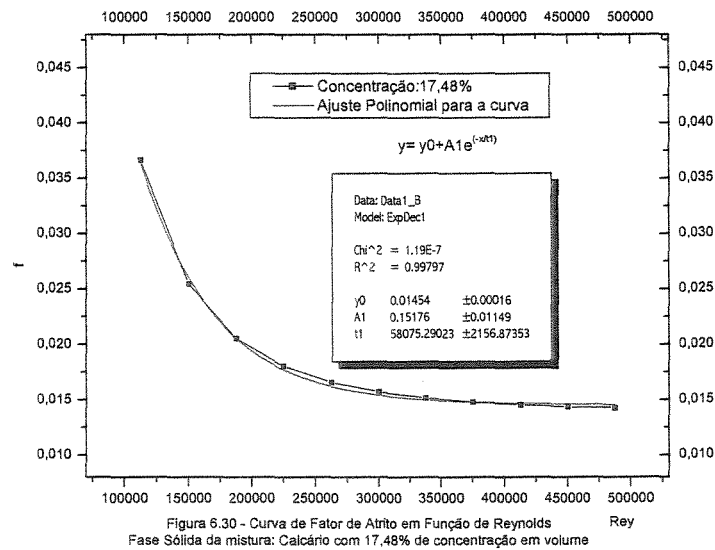


Figura 6.30 - Curva de Fator de Atrito em Função de Reynolds Rey
Fase Sólida da mistura: Calcário com 17,48% de concentração em volume

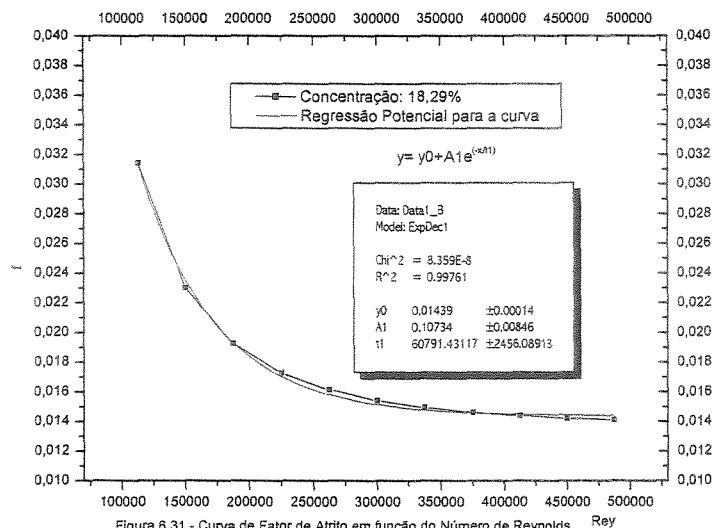


Figura 6.31 - Curva de Fator de Atrito em função do Número de Reynolds
Fase Sólida da Mistura: Calcário com 18,29% de concentração em volume

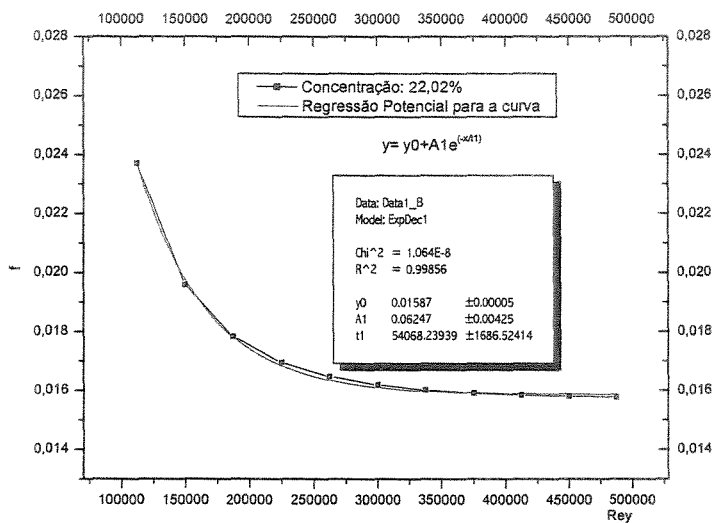


Figura 6.32 - Curva de Fator de Atrito em função do Número de Reynolds
Fase Sólida da mistura: Calcário com 22,02% de concentração em volume

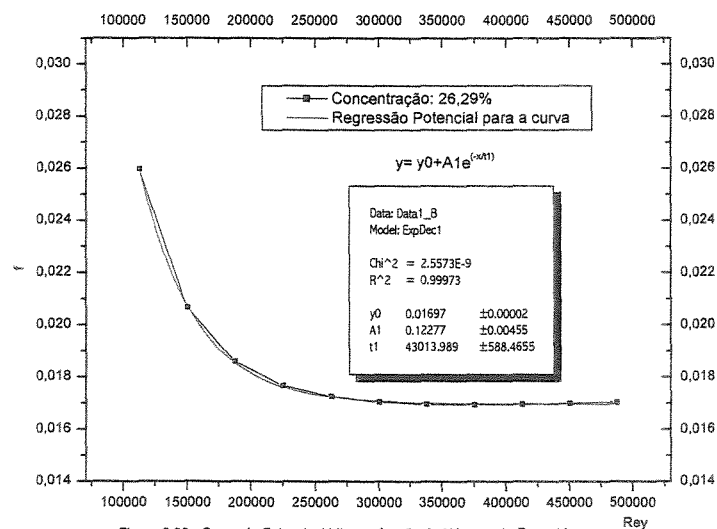


Figura 6.33 - Curva de Fator de Atrito em função do Número de Reynolds
Fase Sólida da mistura: Calcário com 26,29% de concentração em volume

Para cada concentração, foi obtido uma regressão potencial com uma equação no molde da Equação (6.6)

$$f = y0 + A1 \times e^{\left(\frac{-Re y}{t1}\right)} \quad (6.6)$$

$$y0 = \frac{-2,26 \times 10^{-3}}{1 + e^{\frac{(C-22,01887)}{0,02045}}} + 0,01697 \quad (6.7)$$

$$A1 = \frac{0,11292}{1 + e^{\frac{(C-16,85271)}{1,18658}}} + 0,09247 \quad (6.8)$$

$$T1 = 41405,5678 + 140875,6 \times \frac{6,80215}{4 \times (C - 19,12925)^2 + 46,27} \quad (6.9)$$

Na qual:

C= concentração expressa em volume (%).

As Equações (6.7), (6.8) e (6.9) foram substituídas na Equação (6.6), para que se pudesse obter uma equação para calcular o fator de atrito f em função do número de Reynolds (Rey) e da Concentração(C). As Equações (6.10) e (6.11) representam em função.

$$f = f(C, Rey) \quad (6.10)$$

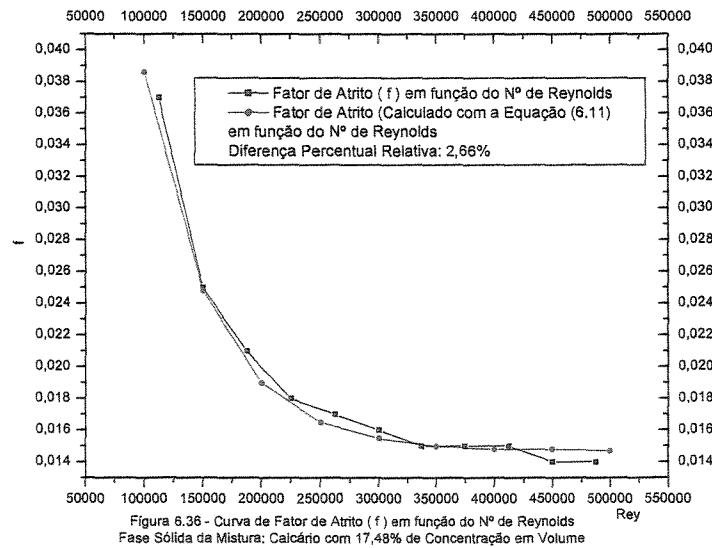
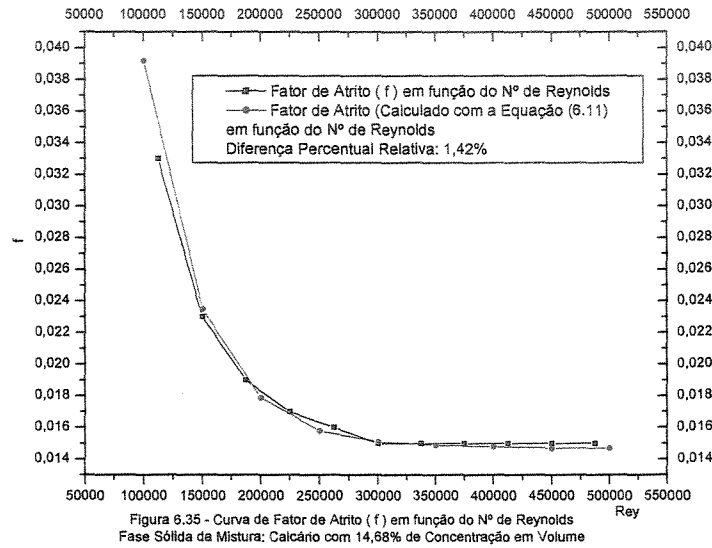
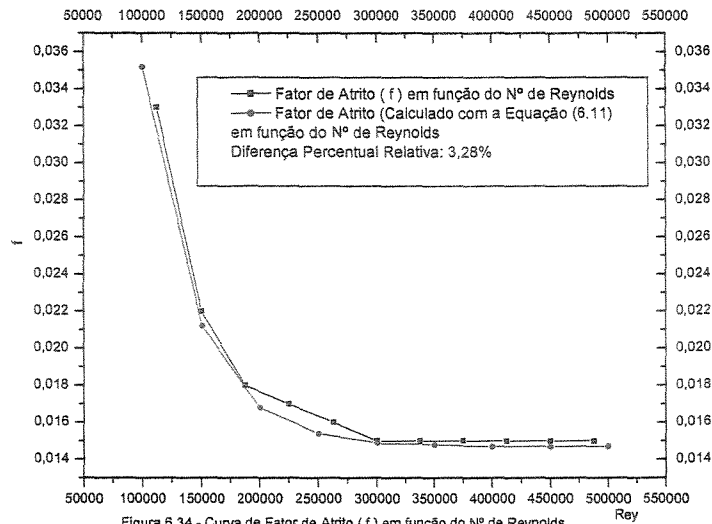
$$f = \left[\frac{-2,26 \times 10^{-3}}{1 + e^{\frac{(C-22,01)}{0,02045}}} + 0,01697 \right] + \left[\frac{0,11292}{1 + e^{\frac{(C-16,852)}{1,186}}} + 0,09247 \right] \times e^{\left(\frac{-Rey}{41405,56 + 140875,6 \times \frac{6,80215}{4 \times (C-19,129)^2 + 46,27}} \right)} \quad (6.11)$$

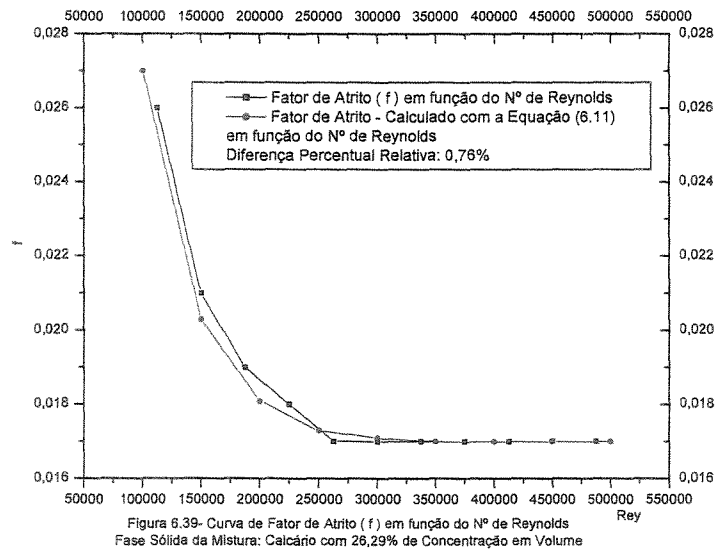
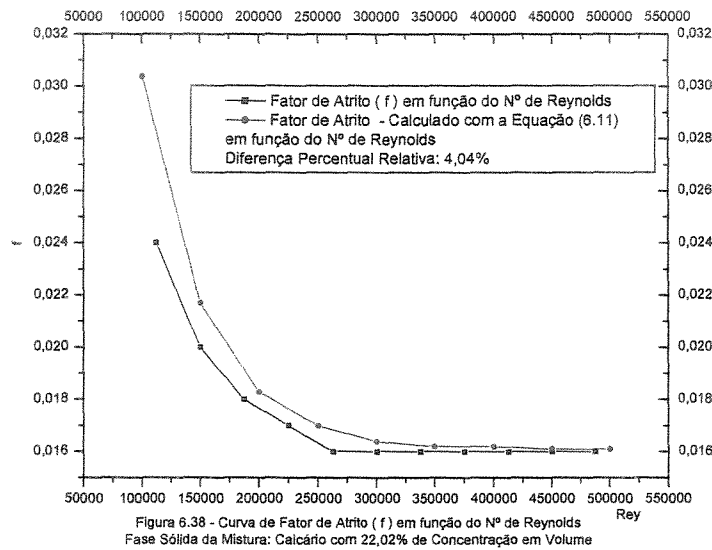
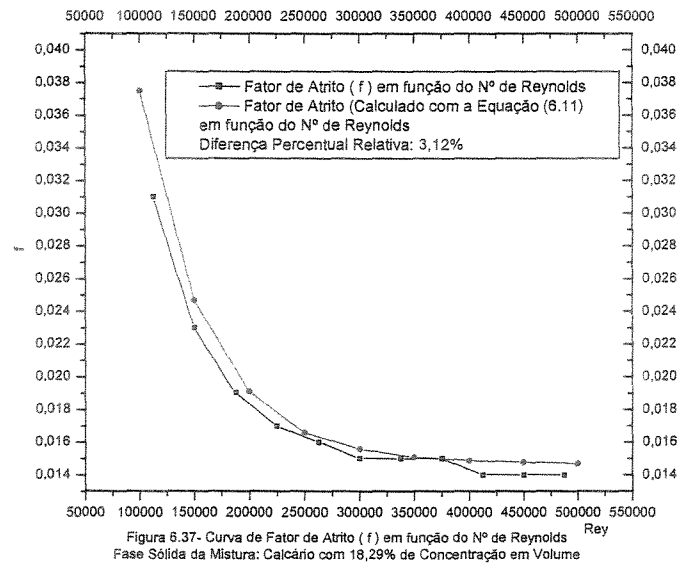
Através da Equação (6.11), foram calculados valores de fator de atrito f em função do número de Reynolds (Re) e da concentração em volume. Foram usados os mesmos valores de concentração e números de Reynolds das Tabelas 6.3 e 6.4, para que se pudesse comparar os valores obtidos nos ensaios em laboratório com os valores calculados através da Equação (6.11). A Tabela 6.5 apresenta os dados calculados com essa equação.

Tabela 6.5 – Planilha de cálculos de f em função do n° de Reynolds e da concentração através da Equação (6.11)

Reynolds	Fator de Atrito (f)					
	Conc. 9,29%	Conc. 14,68%	Conc. 17,48%	Conc. 18,29%	Conc. 22,02%	Conc. 26,29%
100000	0,0352	0,0392	0,0386	0,0375	0,0304	0,0270
150000	0,0212	0,0235	0,0248	0,0247	0,0217	0,0203
200000	0,0168	0,0179	0,0190	0,0191	0,0183	0,0181
250000	0,0154	0,0158	0,0165	0,0166	0,0170	0,0173
300000	0,0149	0,0151	0,0155	0,0156	0,0164	0,0171
350000	0,0148	0,0149	0,0150	0,0151	0,0162	0,0170
400000	0,0147	0,0148	0,0148	0,0149	0,0162	0,0170
450000	0,0147	0,0147	0,0148	0,0148	0,0161	0,0170
500000	0,0147	0,0147	0,0147	0,0147	0,0161	0,0170

Para efeito de visualização e comprovação da adequabilidade da Equação (6.11) para o escoamento com a mistura água-calcário, elaboraram-se gráficos onde as curvas comparam os valores de fator de atrito obtidos através do isolamento do fator de atrito na Equação Universal de Perda de Carga (Equação (6.4)) e os valores calculados através da Equação (6.11), proposta neste trabalho. As Figuras 6.37, 6.38, 6.39, 6.40, 6.41 e 6.42 apresentam esses gráficos.





Observando esses gráficos, nota-se que a equação proposta (6.11) se adequou ao escoamento com mistura água-calcário. Para efeito de projeto, pode-se utilizar a Fórmula Universal de Perda de Carga Distribuída, desde que, o fator de atrito f seja calculado através da Equação (6.11), uma vez que a diferença percentual relativa média entre as curvas foi de 2,54%, um valor estatístico excelente.

6.3.6 VIABILIDADE DO HIDROTRANSPORTE DA MISTURA ÁGUA-CALCÁRIO

Para que os estudos sobre o hidrotransporte de calcário via tubulação de recalque não se resumisse apenas a cálculos dos seus parâmetros de dimensionamento, foi feito uma análise dessa mistura transportada para efeitos de praticidade, em que se propõe a substituição do transporte desse minério via meios rodoviários, ferroviários, etc. Simulou-se em laboratório a coleta dessa mistura, de forma que a mesma sofreu um processo de secagem e que provasse que o material transportado não perdesse as suas características. A mistura água-calcário transportada na bancada de ensaios foi coletada (Figura 6.43 e 6.44), sofrendo em seguida um processo de secagem da fase líquida da mistura. O calcário manteve suas características sem sofrer qualquer alteração, como apresenta a Figura 6.45.

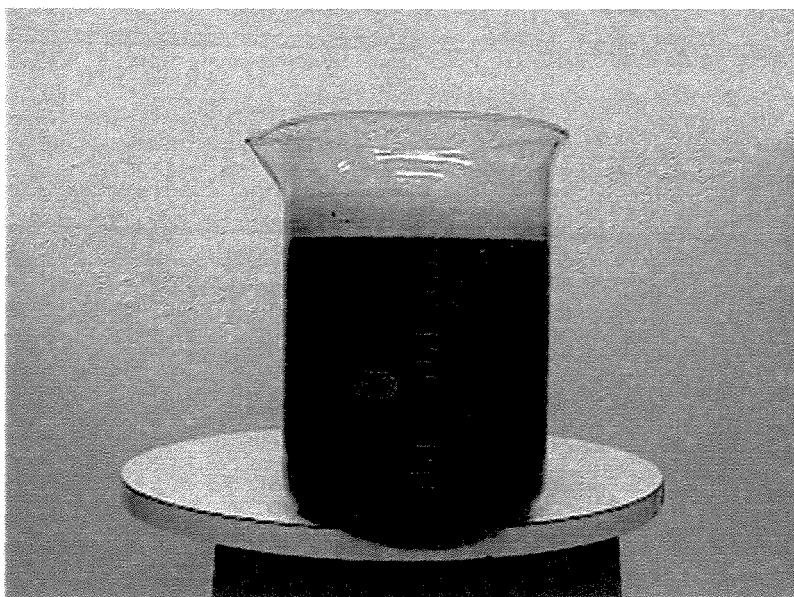


Figura 6.40– Amostra da mistura água-calcário coletada

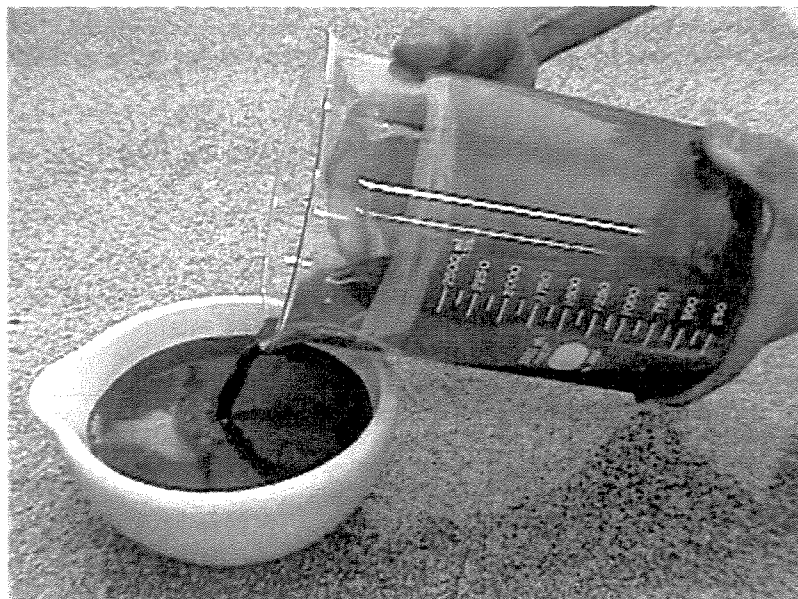


Figura 6.41 – Amostra da mistura água-calcário sendo armazenada no cadinho para sofrer processo de secagem

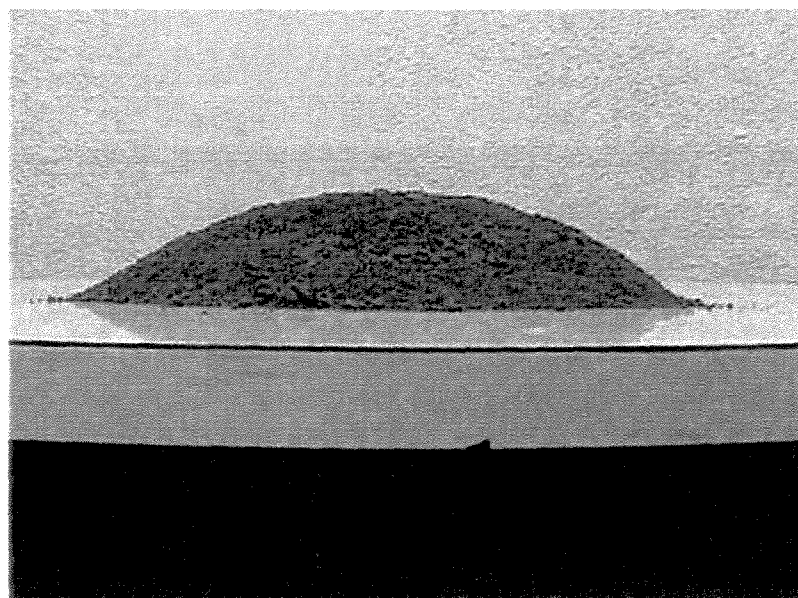


Figura 6.41 – Amostra de calcário seca e com as características originais

7 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos e levando em consideração as condições estudadas, pode-se chegar às seguintes conclusões:

Na literatura encontra-se o coeficiente K_D descrito como uma constante. Para a mistura água-areia, propõe-se considerá-lo como um parâmetro e não como uma constante. Isso deve-se ao fato de que os valores de K_D variam em função da velocidade, da concentração de areia e da granulometria da fase sólida da mistura. Com isso, perde a característica de valor fixo que possui uma constante.

Para se dimensionar uma tubulação de recalque, levando em consideração as perdas de carga distribuídas e as características dos ensaios realizados nesse trabalho (diâmetro da tubulação, granulometria da areia, valores de concentrações e equipamento utilizado, sugere-se utilizar os valores de K_D encontrados através das curvas propostas nesse trabalho, para que haja uma maior precisão no projeto.

As velocidades críticas de sedimentação da mistura água-areia foram analisadas através da observação visual do leito estacionário no tubo transparente de acrílico.

Foram comparadas os valores de velocidades críticas de sedimentação com variações crescente e decrescente de velocidades. Devido às poucas diferenças de valores encontradas entre essas velocidades, conclui-se que, para os dois tipos de procedimentos, as velocidades críticas de sedimentação são iguais.

Para a mistura água-calcário, os valores do parâmetro K_D calculados não são adequados para as equações de dimensionamento, pelo fato de serem extremamente altos. Isso ocorre devido às características granulométricas do calcário, que tem o diâmetro representativo muito pequeno.

Adaptou-se a Fórmula Universal de Perda de Carga para essa mistura, de forma que se pudesse ter uma equação de dimensionamento da tubulação de recalque para essa mistura. Foi elaborada uma equação do fator de atrito f dessa fórmula em função da concentração de sólido da mistura e do número de Reynolds. Assim, é possível projetar um sistema de recalque sem a necessidade de adotar coeficientes de segurança altos.

Devido à grande turbidez do escoamento com a mistura água-calcário, produzida pela grande solubilidade do calcário, não foi possível a observação visual do leito estacionário no tubo de acrílico.

Os valores de velocidade crítica de sedimentação da mistura água-calcário foram calculadas utilizando-se equações sugeridas por autores citados na referência bibliográfica. Das quatro equações utilizadas, duas se mostraram adequadas às condições da mistura água-calcário, resultando em valores coerentes com os dados de escoamento dos ensaios.

Enfim, levando em consideração os dados obtidos, as condições de pesquisa e o equipamento utilizado, o transporte de sedimentos através de condutos forçados se mostra uma alternativa viável e promissora para suprir as necessidades e dificuldades de locomoção das matérias primas até os locais de consumo ou industrialização.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAIN, A. G. and BONNINGTON. S.T., "The Hydraulic Transport of Solids by Pipeline", Pergamon Press 1970
- BLATCH, N. S. - Discussion: Works for purification of the water supply of Washington, D.C., by Allen Hazen and E. D. Hardy. Trans. ASCE, V. 57, P. 400 - 408, Paper nº 1036, Dec. 1906.
- BONNINGTON, S.T - Experiments on the hydraulic Transport of mixed - Sized Solids, British Hydrom. Res. Assoc., RR637, 1959.
- BONNINGTON, S. T. - Estimation of Pipe Friction Involved in Pumping Solid Material. British Hydromechanics Research Association. TN708, dec., 1961.
- CARLETON, H. J. et alii - Hydraulic Transport of Large Particles Using Conventional and High Concentration Conveying. Hidrotransport 5, Cranfield, Bedford, England, Organized by BHRA Fluid Engineering, (Paper D2): p. 15-28, may, 1978.
- CHIEN, SZE- FOO - "Critical Velocity of Sand-Fluid Mixtures in Horizontal Pipe vol189- Liquid Solid Flows- ASME 1994, pp 231-246.
- COIADO, E. M. - Escoamento de Misturas Sólido-Líquidas através de Conduitos Forçados (Aplicação às Instalações de Recalque). São Paulo, Escola Politécnica da USP, 1985, 700 p. (Tese de Doutorado).
- CONDOLIOS, E and CHAPUS, E.E., "Designing Solids-Handling Pipelines", Chemical Engineering, July 8, 1963, pp131-138
- DURAND, R. & CONDOLIOS, E. - Étude expérimentale du refoulement des matériaux en conduites, en particulier des produits de dragage et des schlamms. In: Journées de Hydraulique, 2º Grenoble, France, Juin. 1952.

- DURAND, R. - Basic Relationships of the Transportation of Solids in Pipes. Experimental Research, International Hydraulic Research, 5th Congress, Minniapolis, 1953.
- GOVIER, G.W. and Azia, K., "The Flow of Complex Mixtures in Pipes", Van Nostrand Reinhold Company, 1972
- GRAF, W. H. - Hidraulic of Sediment Transport. McGraw Hill, 1971. 513p.
- HAZEN, A. & HARDY, E. D. - Works for the purificatin of the water supply of Washington, D. C. Trans. ASCE, V.57, Paper n°1036, p.307-363, 1906.
- HISAMITSU, N. et alii - Effect of Added Fine Particles on Flow Properties of Settling Slurries. Hydrotransport 5, Cranfield, Organized by BHRA, (Paper D3): p.29-50, may, 1978.
- HOWARD, G. W. - Transportation of sand and gravel in a four inch pipe. Trans. ASCE, V.104, Paper n° 2039, p.1334-1380, 1939.
- KOCH, L. - Solids in Pipes. International Science Technology, 26, 1964.
- NEWITT, D. M., et al. (1955) - Hidraulic Conveying of Solids in Horizontal Pipes. Trans. Inst. Chem. Engrs., Vol. 33/2, 1955
- NOGUEIRA, A. A. S. - Escoaamentos bifásicos (líquido-sólidos) em condutos forçados circulares (bombas centrífugas): alguns aspectos de particular interesse. São Paulo, 1987. 347p.
- SASIC, M. & MARJANOVIC, P. - On de Methods for Calculation of Hydraulic Transport and their Reliability in Practice. Hydrotransport 5, Cranfield, BHRA, (Paper A5): p. 61-76, may, 1978.
- SATTO, M. Y. U. - Influência de Polímero Redutor de Arraste no Escoamento Bifásico (Sólido-Líquido) em Condutos Forçados. Campinas, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, 1998. DOC. (6.2.3.01). (Tese de Doutorado).
- SINCLAIR, C.G., "The limit deposit-velocity of heterogeneous suspensions", Proceedings Of The Symposium On The Interaction Between Fluids And Particles, London 20-22 June, 1962, p.78-86.
- VANONI, V. A. - Sedimentation Engineering. New York. ASCE, 1977. 245-349 p.
- WANI, G. A., "Critical velocity in multisize particle transport throught pipes", Encyclopedia of Fluid Mechanics, Gulf Publishing Company, vol 5, 1986, pp.181-184
- WASP, Eduard; KENNY, John; GANDHI, Ramesh. L. - Solid-Liquid Flow - Slurry Pipeline Transportation, Ttrans Tech Publications - Clausthal, Germany, 1977

- WIEDENROTH, Wolfgang, "On line critical velocity and concentration distribution measurements of the solid matter in horizontal pipes", 12 th International Conference in Slurry Handling and Pipeline Transport, Hydrotransport 12, p 331-341
- WORSTER, R. C. - The Hydraulic Transport of Solids. Proc. of on the Hydraulic Transport of Coal. Organized by National Coal Board Scientific Departamet, nov., 1952.
- ZANDI, I. & GOVATOS, G. - Heterogeneous Flow of Solids in Pipelines. Journal of the Hydraulic Division, ASCE, vol. 93 (N° HY3: p. 145-159, mar., 1967.

ABSTRACT

SOLDERA, Paulo Eduardo dos Santos. Head loss set by heterogeneous average in conduits horizontal. Campinas: 2001, 115 P. dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas.

The head loss of solid-liquid draining mixtures in horizontal forced conduits in the heterogeneous regimen, can be calculated by knowing a parameter (Φ) of adimensional sediment carrier. This adimensional depends on the draining average speed, on the relative density and the solid grain size, on the conduit diameter, and on experimentally determined constant (K_D). In this subject literature, constant K_D assumes diverse values, depending on the author, what it means that it is not sure it is really a constant. For the mixture water-sand, one calculated the values of K_D , that if deals with a parameter that depends on the outflow of the draining, of the diameter of solids and the concentration of the mixture, and not a constant as it finds in literature. For the water-calcareous mixture, it is impossible to get coherent values for K_D . This atypical behavior is due to the small representative diameter of this solid. An equation was developed to calculate the attrition factor f of the Head Loss Universal formula, on such way it can measure a stresses tubing to carry this mixture.

Keywords: hidrotransport, horizontal conduits, solid-liquid mixtures, carrier of sediments, heterogeneous draining.

ANEXOS

ANEXO A

Tabelas com planilhas de cálculos dos ensaios com mistura água-areia

Tabela A1 – Ensaios com variação crescente de velocidades para a mistura água-areia
Concentrações médias do sólido expressas em volume: 6,61%, 10,69% e 13,12%

Areia - Variação Crescente de Velocidade											
Ensaio	Velocidade (m/s)	J 1m (m/m)	J 3m (m/3m)	J 8,2 m (m/8,2m)	J Utilizado (m/m)	Leitura do Volume	Volume (L)	Massa Real (Kg)	Concentração (%)	Média de Concentração (%)	Situação do leito
1	1,69	0,045	0,1528	0,3476	0,0424	152	153,1094	159,2	6,18		com leito
2	2,01	0,0505	0,1733	0,4009	0,0489	144	151,5903	158	6,53		crítica
3	2,27	0,06	0,2023	0,4819	0,0588	174	157,2869	164	6,59		sem leito
4	2,53	0,0712	0,2354	0,573	0,0699	158	154,2487	160,6	6,37		sem leito
5	2,77	0,0814	0,2716	0,6639	0,0810	133	149,5015	155,4	6,11		sem leito
6	3,06	0,0931	0,3077	0,7579	0,0924	121	147,2228	152,8	5,88		sem leito
7	3,27	0,1065	0,3462	0,8564	0,1044	170	156,5274	163	6,39	6,61	sem leito
8	3,70	0,1323	0,4285	1,0795	0,1316	103	143,8049	149,6	6,24		sem leito
9	4,19	0,163	0,5174	1,322	0,1612	127	148,3622	154,2	6,09		sem leito
10	4,56	0,1936	0,609	1,573	0,1918	94	142,0959	147,2	5,58		sem leito
11	5,00	0,2289	0,7166	1,8598	0,2268	95	142,2858	147,6	5,80		sem leito
12	5,58	0,2677	0,8338	2,1814	0,2660	165	155,5779	162,2	6,57		sem leito
13	5,87	0,2985	0,9143	2,4264	0,2959	128	148,5521	154,8	6,50		sem leito
14	6,43	0,3562	1,0753	2,8861	0,3520	140	150,8307	156,8	6,13		sem leito
15	6,74	0,4003	1,2044	3,2439	0,3956	125	147,9824	154,4	6,69		sem leito
16	1,53	0,05	0,1598	0,3756	0,0458	195	161,2746	171,6	9,69		com leito
17	1,90	0,061	0,1716	0,408	0,0498	188	159,9453	171	10,41		com leito
18	2,06	0,0647	0,1846	0,4412	0,0538	171	156,7173	167,8	10,63		crítica
19	2,17	0,0588	0,1976	0,4816	0,0587	150	152,7296	163	10,14		sem leito
20	2,40	0,0678	0,2229	0,5472	0,0667	143	151,4004	162,2	10,72		sem leito
21	2,64	0,0761	0,2508	0,6218	0,0758	110	145,1341	154,8	10,05		sem leito
22	2,81	0,0846	0,2771	0,6854	0,0836	101	143,4251	152,8	9,88		sem leito
23	3,04	0,094	0,3104	0,7703	0,0939	134	149,6914	159,6	9,99	10,69	sem leito
24	3,49	0,1232	0,4016	1,0113	0,1233	144	151,5903	161,6	9,97		sem leito
25	4,22	0,1659	0,528	1,3487	0,1645	103	143,8049	153,2	9,87		sem leito
26	4,60	0,1985	0,6222	1,618	0,1973	110	145,1341	154,6	9,86		sem leito
27	5,08	0,2322	0,7243	1,8929	0,2308	134	149,6914	159,4	9,80		sem leito
28	5,46	0,2625	0,821	2,1478	0,2619	154	153,4892	163,6	9,95		sem leito
29	5,99	0,3118	0,9565	2,5213	0,3075	162	155,0083	165,6	10,30		sem leito
30	6,40	0,3517	1,0622	2,8442	0,3469	153	153,2993	164,2	10,69		sem leito
31	6,81	0,3924	1,174	3,1602	0,3854	192	160,7049	172,2	10,75		sem leito
32	1,45	0,0527	0,174	0,401	0,0489	164	155,388	169,2	13,14		com leito
33	1,87	0,0516	0,184	0,425	0,0518	188	159,9453	175,2	14,02		com leito
34	1,98	0,0559	0,1964	0,4593	0,0560	181	158,6161	173,2	13,55		crítica
35	2,15	0,0604	0,211	0,4966	0,0606	193	160,8948	176,2	13,98		sem leito
36	2,42	0,0704	0,2423	0,5817	0,0709	166	155,7678	170,2	13,65		sem leito
37	2,67	0,0805	0,2731	0,6644	0,0810	137	150,2611	164,2	13,67		sem leito
38	2,89	0,091	0,305	0,7508	0,0916	163	155,1981	169,4	13,50		sem leito
39	3,20	0,1078	0,3578	0,8874	0,1082	131	149,1217	162	12,80		sem leito
40	3,40	0,1159	0,3845	0,9566	0,1167	83	140,0071	151,6	12,31	13,12	sem leito
41	3,64	0,1336	0,4365	1,0951	0,1335	152	153,1094	166	12,50		sem leito
42	4,11	0,1621	0,5264	1,3339	0,1627	138	150,4509	163	12,39		sem leito
43	4,58	0,1941	0,6222	1,5941	0,1944	92	141,7161	153,4	12,26		sem leito
44	5,11	0,2341	0,7459	1,9222	0,2344	212	164,5027	178,8	12,87		sem leito
45	5,48	0,2701	0,85	2,2155	0,2702	166	155,7678	169,6	13,13		sem leito
46	5,97	0,3097	0,9628	2,5266	0,3081	116	146,2734	158,8	12,70		sem leito
47	6,39	0,353	1,0618	2,867	0,3496	137	150,2611	163,6	13,12		sem leito
48	6,70	0,3956	1,2012	3,2092	0,3914	124	147,7925	161,2	13,39		sem leito

Tabela A2 – Ensaios com variação crescente de velocidades para a mistura água-areia
Concentrações médias do sólido expressas em volume: 15,36%, 18,86% e 21,29%

Areia - Variação Crescente de Velocidade											
Ensaio	Velocidade (m/s)	J 1m (m/m)	J 3m (m/3m)	J 8,2 m (m/8,2m)	J Utilizado (m/m)	Leitura do Volume	Volume (L)	Massa Real (Kg)	Concentração (%)	Média de Concentração (%)	Situação do leito
49	1,61	0,0504	0,176	0,4004	0,0488	248	171,3386	189,4	15,35		com leito
50	1,93	0,0537	0,1927	0,444	0,0541	262	173,9971	193	15,85		crítica
51	2,22	0,0639	0,2269	0,5311	0,0648	242	170,1993	189	16,01		sem leito
52	2,49	0,0747	0,2622	0,6217	0,0758	205	163,1734	181,6	16,33		sem leito
53	2,73	0,0859	0,2977	0,7158	0,0873	242	170,1993	189,6	16,47		sem leito
54	3,23	0,112	0,3772	0,9209	0,1123	175	157,4768	175,2	16,28		sem leito
55	3,65	0,1378	0,4625	1,1446	0,1396	153	153,2993	169,2	15,13	15,36	sem leito
56	4,11	0,1683	0,555	1,3911	0,1696	144	151,5903	168	15,72		sem leito
57	4,55	0,201	0,6551	1,6534	0,2016	113	145,7037	161,2	15,47		sem leito
58	4,99	0,237	0,7615	1,938	0,2363	142	151,2105	166,6	14,87		sem leito
59	5,34	0,2747	0,8716	2,226	0,2715	219	165,8319	183,2	15,26		sem leito
60	5,86	0,3232	1,0214	2,6138	0,3188	142	151,2105	166,8	15,05		sem leito
61	6,31	0,3661	1,1426	2,9559	0,3605	115	146,0835	159,8	13,82		sem leito
62	6,57	0,4082	1,2704	3,2929	0,4016	126	148,1723	161,6	13,38		sem leito
63	1,80	0,0654	0,2021	0,4847	0,0591	162	155,0083	176	19,20		com leito
64	2,03	0,0615	0,2134	0,5081	0,0620	135	149,8813	170,6	19,55		crítica
65	2,31	0,0707	0,2404	0,5809	0,0708	140	150,8307	171,4	19,32		sem leito
66	2,43	0,0754	0,2628	0,6345	0,0774	130	148,9318	169,4	19,45		sem leito
67	2,70	0,0871	0,299	0,7273	0,0887	127	148,3622	169	19,66		sem leito
68	2,92	0,098	0,3403	0,8245	0,1005	125	147,9824	168,6	19,69		sem leito
69	3,17	0,1092	0,3802	0,926	0,1129	130	148,9318	169,6	19,62		sem leito
70	3,62	0,136	0,488	1,1486	0,1401	113	145,7037	165,7	19,43	18,86	sem leito
71	4,12	0,1649	0,5639	1,3898	0,1695	110	145,1341	164,2	18,69		sem leito
72	4,50	0,1987	0,6664	1,6615	0,2026	185	159,3757	180,6	18,92		sem leito
73	5,00	0,2329	0,7678	1,9336	0,2358	130	148,9318	167,8	18,10		sem leito
74	5,50	0,2787	0,895	2,2922	0,2795	164	153,4892	172,8	17,99		sem leito
75	5,76	0,3144	1,0023	2,5776	0,3143	178	158,0465	177,2	17,40		sem leito
76	6,30	0,3607	1,1346	2,9386	0,3584	183	158,9959	179	17,99		sem leito
77	6,77	0,4048	1,2636	3,2992	0,4023	212	164,5027	185	17,84		sem leito
78	1,77	0,0674	0,2049	0,4971	0,0606	175	157,4768	184	23,20		com leito
79	2,09	0,0651	0,2247	0,5431	0,0662	214	164,8824	190,6	21,72		crítica
80	2,44	0,0784	0,2699	0,6545	0,0798	173	157,097	181,2	21,41		sem leito
81	2,68	0,0904	0,306	0,7526	0,0918	230	167,9206	194,2	21,78		sem leito
82	2,95	0,1021	0,3474	0,8539	0,1041	177	157,8566	182,4	21,66		sem leito
83	3,17	0,1146	0,3872	0,9566	0,1167	213	164,6926	190,6	21,88		sem leito
84	3,66	0,1416	0,4738	1,1763	0,1435	150	152,7296	175,8	21,12	21,29	sem leito
85	4,13	0,1707	0,5652	1,4166	0,1728	164	155,388	179	21,23		sem leito
86	4,50	0,2038	0,6664	1,6829	0,2052	133	149,5015	172	21,06		sem leito
87	4,91	0,2379	0,7677	1,9559	0,2385	70	137,5386	158	20,85		sem leito
88	5,44	0,2843	0,9057	2,3227	0,2833	188	159,9453	184	21,04		sem leito
89	5,94	0,3253	1,0258	2,6403	0,3220	170	156,5274	180,6	21,46		sem leito
90	6,23	0,3681	1,1482	2,9676	0,3619	178	158,0465	180,6	20,10		sem leito
91	6,58	0,409	1,2701	3,2994	0,4024	137	150,2611	171	19,52		sem leito

Tabela A3 – Ensaios com variação decrescente de velocidades para a mistura água-areia
Concentrações médias do sólido expressas em volume: 7,15%, 9,89% e 13,24%

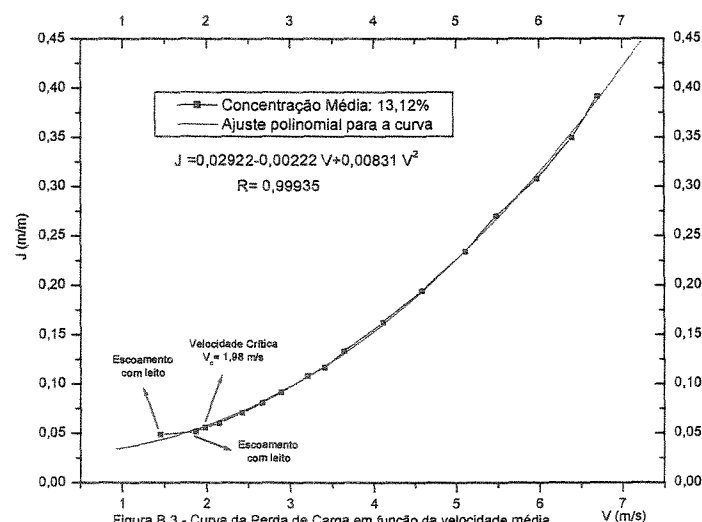
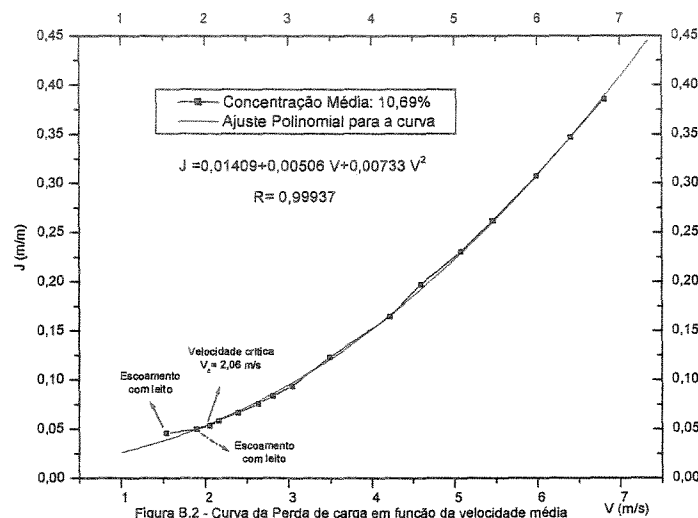
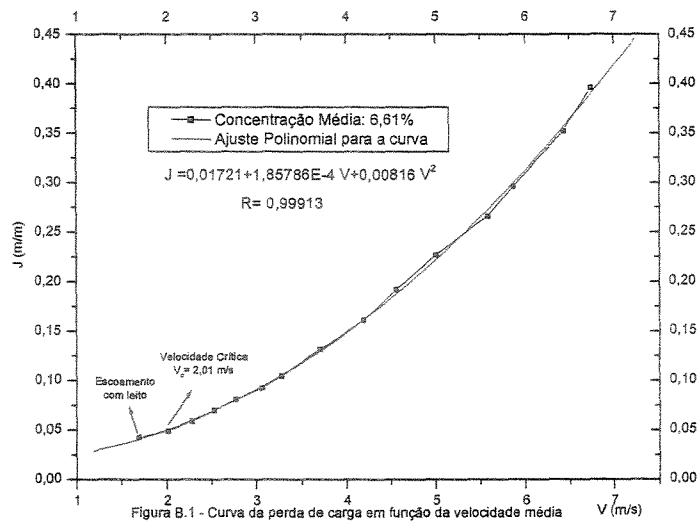
Areia - Variação Decrescente de Velocidade											
Ensaio	Velocidade (m/s)	J 1m (m/m)	J 3m (m/3m)	J 8,2 m (m/8,2m)	J Utilizado (m/m)	Leitura do Volume	Volume (L)	Massa Real (Kg)	Concentração (%)	Média de Concentração (%)	Situação do leito
92	6,62	0,4071	1,2251	3,321	0,4050	120	147,033	154,2	7,48	7,15	sem leito
93	6,35	0,3585	1,0898	2,9387	0,3584	133	149,5015	155,6	6,31		sem leito
94	6,01	0,3157	0,9568	2,5786	0,3145	110	145,1341	151,6	6,87		sem leito
95	5,57	0,2766	0,842	2,254	0,2749	125	147,9824	154,4	6,69		sem leito
96	5,06	0,2371	0,7359	1,9331	0,2357	132	149,3116	154	4,90		sem leito
97	4,70	0,2025	0,6281	1,6437	0,2005	89	141,1464	147,8	7,25		sem leito
98	4,20	0,1681	0,5232	1,3569	0,1655	146	151,97	158,6	6,73		sem leito
99	3,77	0,1367	0,4345	1,1177	0,1363	139	150,6408	158	7,50		sem leito
100	3,32	0,1085	0,3486	0,8837	0,1078	118	146,6532	153	6,68		sem leito
101	2,86	0,0842	0,2693	0,6794	0,0829	147	152,1599	159,4	7,31		sem leito
102	2,36	0,0626	0,205	0,5068	0,0618	170	156,5274	163,8	7,15	sem leito	
103	2,09	0,0534	0,1755	0,4252	0,0519	197	161,6543	168,8	6,81	9,89	crítica
104	1,59	0,0459	0,1469	0,3518	0,0429	142	151,2105	156,6	5,54		leito
105	1,07	0,0416	0,1345	0,3188	0,0389	179	158,2364	160,6	2,37		leito
106	6,31	0,3635	1,1272	2,9598	0,3610	62	136,0195	144,2	9,13		sem leito
107	6,03	0,3178	0,9831	2,5816	0,3148	104	143,9947	154,4	10,85		sem leito
108	5,57	0,2798	0,8727	2,2825	0,2784	110	145,1341	154,6	9,86		sem leito
109	5,14	0,2448	0,7571	1,9788	0,2413	72	137,9183	146,4	9,33		sem leito
110	4,76	0,2075	0,6468	1,688	0,2059	99	143,0453	151,2	8,68		sem leito
111	4,41	0,1698	0,5958	1,5068	0,1638	85	140,3869	149,8	10,12		sem leito
112	4,04	0,1613	0,4958	1,2793	0,1560	79	139,2475	148,4	9,93		sem leito
113	3,55	0,1324	0,4075	1,051	0,1282	90	141,3363	150,6	9,90	sem leito	
114	3,13	0,0961	0,3285	0,826	0,1007	110	145,1341	155,6	10,83	sem leito	
115	2,73	0,086	0,2626	0,6529	0,0796	119	146,8431	157,6	10,99	sem leito	
116	2,25	0,0631	0,2022	0,5	0,0610	84	140,197	150,4	10,92	13,24	crítico
117	1,84	0,0474	0,1591	0,3881	0,0471	104	143,9947	154,2	10,65		leito
118	1,39	0,0528	0,153	0,3703	0,0452	130	148,9318	157,2	8,47		leito (1/4 do tubo)
119	0,65	0,0422	0,1513	0,3614	0,0441	126	148,1723	150	1,96		leito (meio tubo)
120	6,69	0,4088	1,2473	3,3227	0,4052	155	153,679	166,8	12,66		sem leito
121	6,27	0,3652	1,1208	2,9656	0,3617	140	150,8307	163,8	12,75		sem leito
122	5,95	0,3189	0,9858	2,5973	0,3167	145	151,7802	165,6	13,43		sem leito
123	5,47	0,2764	0,8649	2,2639	0,2761	100	143,2352	155,8	12,98		sem leito
124	5,00	0,2401	0,7489	1,9568	0,2386	131	149,1217	162,8	13,52		sem leito
125	4,62	0,2042	0,6398	1,662	0,2027	164	155,388	169,4	13,32		sem leito
126	4,18	0,1709	0,5417	1,397	0,1704	145	151,7802	165,4	13,26	sem leito	
127	3,78	0,1425	0,45	1,1518	0,1405	175	157,4768	171,8	13,42	sem leito	
128	3,33	0,1158	0,3618	0,9258	0,1129	173	157,097	170,2	12,39	sem leito	
129	3,09	0,1028	0,3234	0,8237	0,1005	98	142,8554	156,2	13,75	sem leito	
130	2,86	0,0904	0,2896	0,7365	0,0898	163	155,1981	169	13,15	sem leito	
131	2,61	0,0795	0,2559	0,6401	0,0781	171	156,7173	171,6	13,96	sem leito	
132	2,34	0,0678	0,2223	0,553	0,0674	202	162,6038	178	13,92	sem leito	
133	2,05	0,0566	0,1928	0,4738	0,0578	190	160,3251	174,6	13,16	crítica	
134	1,80	0,0572	0,1805	0,4452	0,0543	215	165,0723	179,4	12,86	com leito	

Tabela A4 – Ensaios com variação decrescente de velocidades para a mistura água-areia
Concentrações médias do sólido expressas em volume: 16,09%, 18,33% e 21,10%

Areia - Variação Decrescente de Velocidade											
Ensaio	Velocidade (m/s)	J 1m (m/m)	J 3m (m/3m)	J 8,2 m (m/8,2m)	J Utilizado (m/m)	Leitura do Volume	Volume (L)	Massa Real (Kg)	Concentração (%)	Média de Concentração (%)	Situação do leito
135	6,36	0,3635	1,1272	2,9598	0,3610	175	157,4768	174,8	15,95	16,09	sem leito
136	5,99	0,3178	0,9831	2,5816	0,3148	110	145,1341	166,2	20,40		sem leito
137	5,67	0,2798	0,8727	2,2825	0,2784	91	141,5262	159	17,69		sem leito
138	5,16	0,2448	0,7571	1,9788	0,2413	90	141,3363	158,6	15,69		sem leito
139	4,88	0,2075	0,6468	1,688	0,2059	85	140,3869	155,4	15,55		sem leito
140	4,43	0,1698	0,5958	1,5068	0,1838	125	147,9824	163,8	15,54		sem leito
141	3,99	0,1613	0,4958	1,2793	0,1560	170	156,5274	173,2	15,50		sem leito
142	3,55	0,1324	0,4075	1,051	0,1282	105	144,1846	159,2	15,18		sem leito
143	3,10	0,0961	0,3285	0,826	0,1007	142	151,2105	168,2	16,26		sem leito
144	2,62	0,086	0,2626	0,6529	0,0796	143	151,4004	166,4	14,51		sem leito
145	2,21	0,0631	0,2022	0,5	0,0610	118	146,6532	163,4	16,50	18,33	crítico
146	1,95	0,0474	0,1591	0,3861	0,0471	155	153,679	170,4	15,80		com leito
147	1,69	0,0528	0,153	0,3703	0,0452	110	145,1341	160,4	15,32		com leito
148	1,32	0,0422	0,1513	0,3614	0,0441	122	147,4127	162,8	15,21		com leito (1/4 tubo)
149	6,54	0,4079	1,2572	3,3181	0,4046	226	167,1611	189,2	18,75		sem leito
150	6,35	0,3643	1,1304	2,9503	0,3598	108	144,7543	162	17,14		sem leito
151	5,88	0,3216	0,9949	2,6132	0,3187	155	153,679	172,2	17,31		sem leito
152	5,54	0,2811	0,8771	2,2921	0,2795	133	149,5015	168,6	18,23		sem leito
153	5,07	0,242	0,7612	1,9819	0,2417	124	147,7925	166,6	18,17		sem leito
154	4,64	0,2073	0,6547	1,698	0,2071	167	155,9577	176,4	18,65		sem leito
155	4,23	0,1745	0,5581	1,4297	0,1744	167	155,9577	176,2	18,49	21,1	sem leito
156	3,77	0,1437	0,4669	1,1895	0,1451	212	164,5027	184,4	17,37		sem leito
157	3,32	0,1159	0,381	0,9664	0,1179	218	165,642	187,4	18,69		sem leito
158	2,82	0,0913	0,3064	0,7697	0,0939	180	158,4262	179,2	18,66		sem leito
159	2,62	0,0817	0,2736	0,6845	0,0835	214	164,8824	186,4	18,58		sem leito
160	2,35	0,0719	0,2384	0,5954	0,0726	230	167,9206	190	18,71		sem leito
161	2,06	0,0631	0,2094	0,5213	0,0636	206	163,3633	185	18,83		crítica
162	1,81	0,0656	0,2005	0,5014	0,0611	218	165,642	187,8	18,99		com leito
163	6,63	0,4093	1,3005	3,3553	0,4092	127	148,3622	167,2	18,14		sem leito
164	6,45	0,3666	1,1614	3,0014	0,3660	168	156,1476	178	19,76	21,1	sem leito
165	5,77	0,3239	1,0213	2,6538	0,3236	146	151,97	173,2	19,73		sem leito
166	5,44	0,2826	0,8937	2,3187	0,2828	124	147,7925	169	20,20		sem leito
167	5,01	0,2435	0,7876	2,0109	0,2452	138	150,4509	173	20,98		sem leito
168	4,64	0,2052	0,6771	1,7131	0,2089	112	145,5139	167,2	20,88		sem leito
169	4,18	0,1712	0,5709	1,4388	0,1755	110	145,1341	166,6	20,74		sem leito
170	3,71	0,1404	0,4772	1,1937	0,1458	190	160,3251	185	21,47		sem leito
171	3,24	0,1139	0,3919	0,9739	0,1188	197	161,6543	187,6	22,26		sem leito
172	2,77	0,0901	0,3146	0,7735	0,0943	207	163,5532	189,4	21,97		sem leito
173	2,55	0,0792	0,2816	0,6875	0,0838	215	165,0723	191,6	22,29	21,1	sem leito
174	2,29	0,0698	0,2466	0,5982	0,0730	261	173,8072	202,2	22,60		sem leito
175	2,08	0,0619	0,2215	0,5375	0,0655	246	170,9589	198,6	22,40		crítica
176	1,80	0,0627	0,2136	0,5166	0,0630	243	170,3892	197,4	22,03		com leito

ANEXO B

Curvas de Perda de Carga em função da velocidade média do escoamento. Mistura água-areia



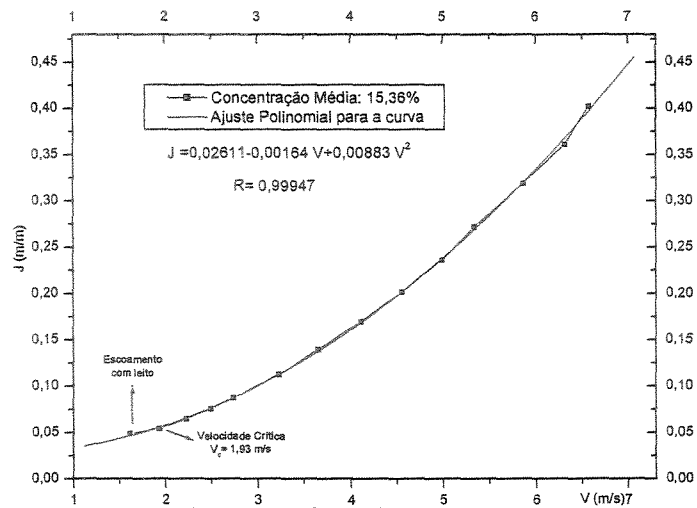


Figura B.4 - Curva da Perda de Carga em Função da Velocidade média
Fase Sólida com 15,36% de concentração em volume
Variação crescente de velocidade

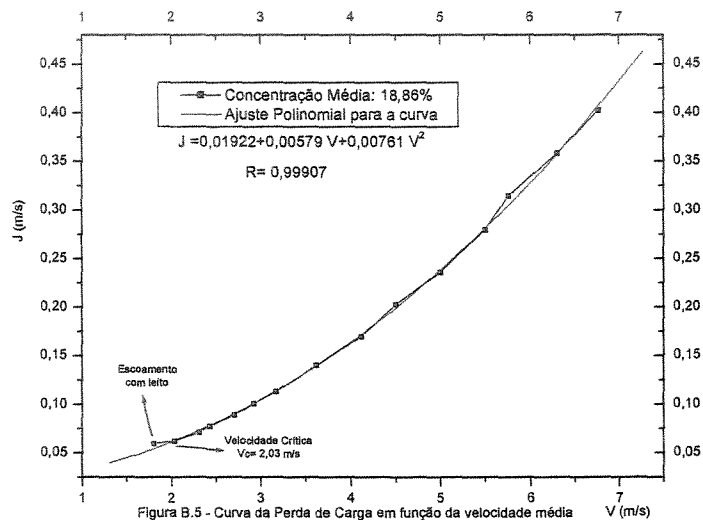


Figura B.5 - Curva da Perda de Carga em função da velocidade média
Fase sólida: Areia com 18,86% de concentração em volume
Variação crescente de velocidade

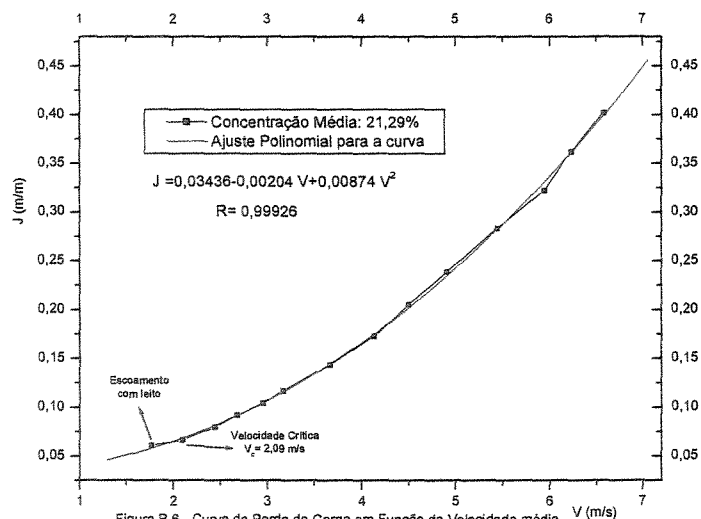
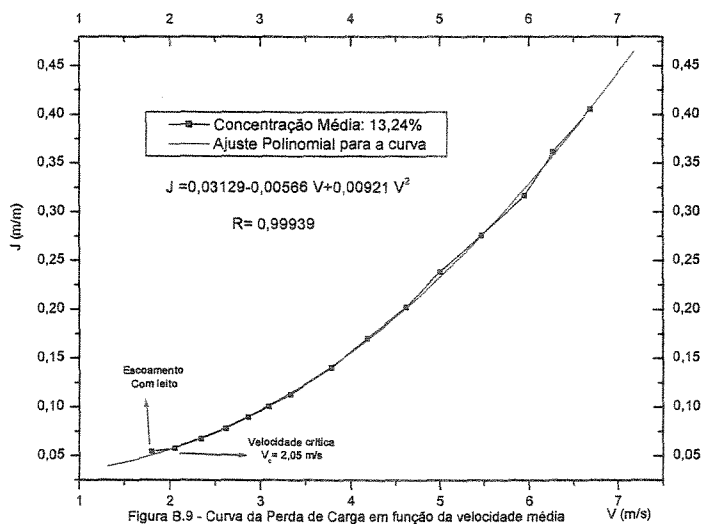
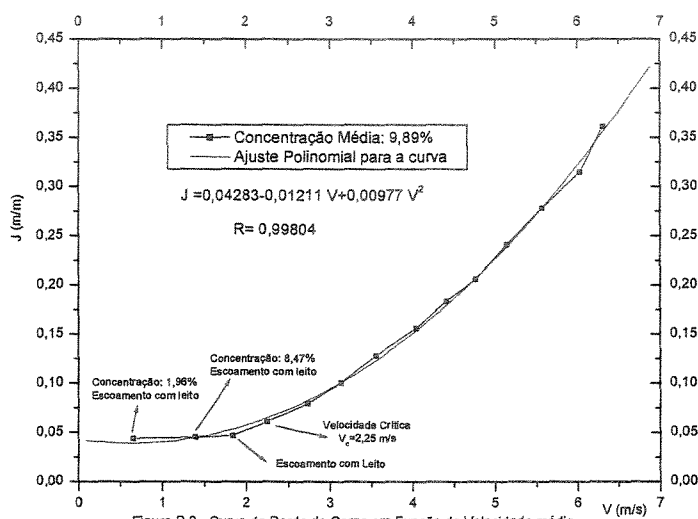
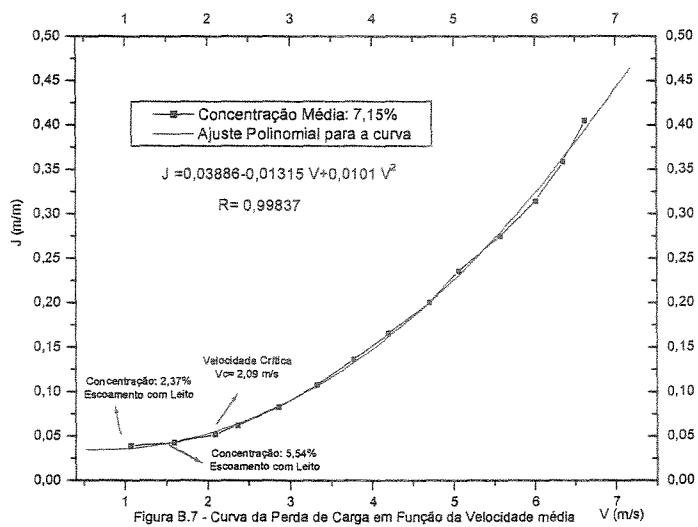


Figura B.6 - Curva da Perda de Carga em Função da Velocidade média
Fase Sólida com 21,29% de concentração em volume
Variação crescente de velocidade



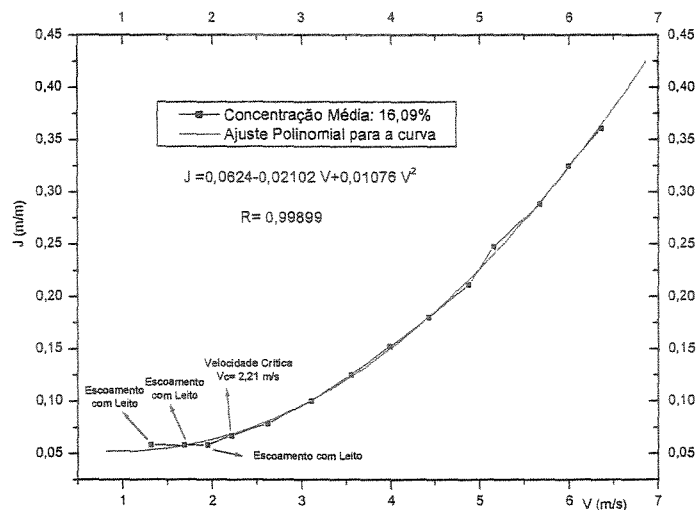


Figura 8.10 - Curva da Perda de Carga em Função da Velocidade média
Fase sólida: Areia com 16,09% de Concentração em volume
Variação decrescente de velocidade

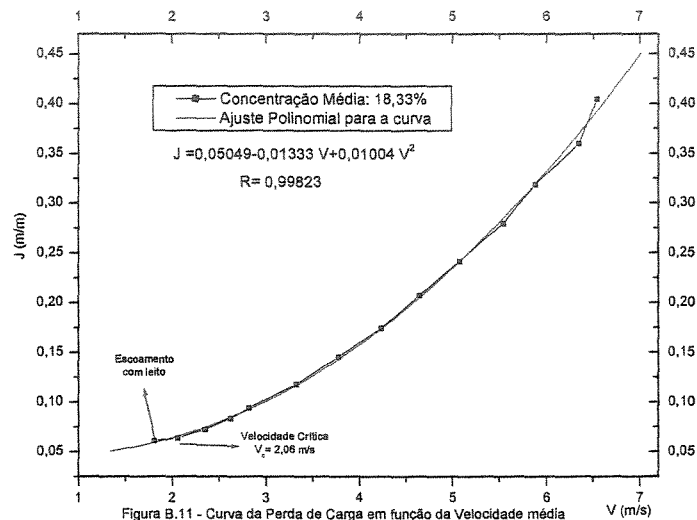


Figura 8.11 - Curva da Perda de Carga em função da Velocidade média
Fase sólida: Areia com 18,33% de concentração em volume
Variação decrescente de velocidade

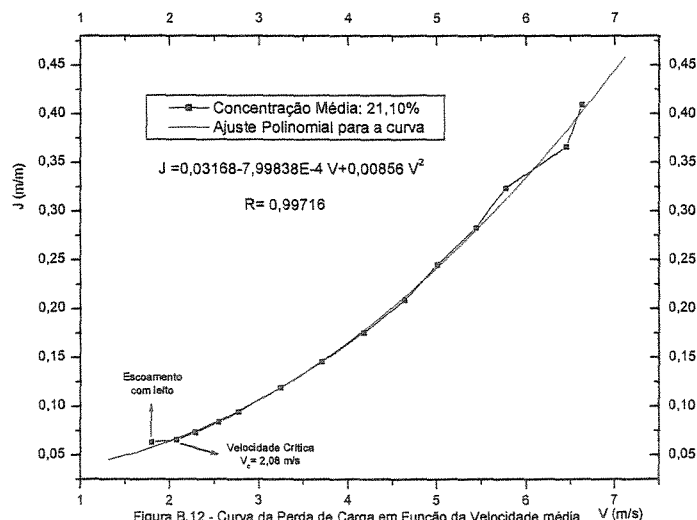


Figura 8.12 - Curva da Perda de Carga em Função da Velocidade média
Fase sólida: Areia com 21,10% de concentração em volume
Variação decrescente de velocidade

ANEXO C

Tabelas com planilhas de cálculos de J_l , J_m , Φ e K_D para a mistura água-areia.

Tabela C.1 – Planilha de cálculos dos parâmetros J_l , J_m e Φ
para cada concentração da mistura água-areia
Variação crescente de velocidades

Veloc. (m/s)	J_l (m/m)	Concentração 6,61%		Concentração 10,69%		Concentração 13,12%	
		J_m (m/m)	Φ	J_m (m/m)	Φ	J_m (m/m)	Φ
1,5	0,0235	0,0358	5,6354	0,0382	4,2390	0,0446	5,1197
2,0	0,0415	0,0502	2,2716	0,0535	1,9810	0,0580	2,2831
2,5	0,0629	0,0687	0,9882	0,0726	1,0454	0,0756	1,1558
3,0	0,0878	0,0912	0,4152	0,0952	0,5756	0,0974	0,6208
3,5	0,1162	0,1178	0,1473	0,1216	0,3143	0,1232	0,3454
4,0	0,1481	0,1485	0,0278	0,1516	0,1600	0,1533	0,1997
4,5	0,1835	0,1833	-0,0137	0,1853	0,0658	0,1875	0,1243
5,0	0,2224	0,2221	-0,0126	0,2226	0,0074	0,2259	0,0893
5,5	0,2648	0,2651	0,0123	0,2637	-0,0288	0,2684	0,0782
6,0	0,3106	0,3121	0,0504	0,3083	-0,0504	0,3151	0,0816
6,5	0,3600	0,3632	0,0956	0,3567	-0,0626	0,3659	0,0939

Veloc. (m/s)	J_l (m/m)	Concentração 15,36%		Concentração 18,86%		Concentração 21,29%	
		J_m (m/m)	Φ	J_m (m/m)	Φ	J_m (m/m)	Φ
1,5	0,0235	0,0435	4,6443	0,0450	4,1491	0,0510	4,4350
2,0	0,0415	0,0582	2,1991	0,0612	2,1650	0,0652	2,1802
2,5	0,0629	0,0772	1,2428	0,0813	1,3254	0,0839	1,2690
3,0	0,0878	0,1007	0,7994	0,1051	0,8925	0,1069	0,8264
3,5	0,1162	0,1285	0,5789	0,1327	0,6438	0,1343	0,5909
4,0	0,1481	0,1608	0,4688	0,1641	0,4908	0,1660	0,4599
4,5	0,1835	0,1975	0,4176	0,1994	0,3924	0,2022	0,3864
5,0	0,2224	0,2387	0,3997	0,2384	0,3271	0,2427	0,3465
5,5	0,2648	0,2842	0,4012	0,2813	0,2830	0,2875	0,3269
6,0	0,3106	0,3342	0,4140	0,3279	0,2528	0,3368	0,3200
6,5	0,3600	0,3885	0,4334	0,3784	0,2321	0,3904	0,3211

Tabela C.2- Planilha de cálculos dos parâmetros JI, Jm e Φ
para cada concentração da mistura água-areia
Variação decrescente de velocidades

Veloc. (m/s)	JI (m/m)	Concentração 7,15%		Concentração 9,89%		Concentração 13,24%	
		Jm (m/m)	Φ	Jm (m/m)	Φ	Jm (m/m)	Φ
1,5	0,0235	0,0419	8,3854	0,0466	6,6926	0,0435	4,8608
2,0	0,0415	0,0530	2,9824	0,0577	2,6643	0,0568	2,1162
2,5	0,0629	0,0691	1,0627	0,0736	1,1607	0,0747	1,0735
3,0	0,0878	0,0903	0,3052	0,0944	0,5127	0,0972	0,6110
3,5	0,1162	0,1166	0,0306	0,1201	0,2284	0,1243	0,3973
4,0	0,1481	0,1479	-0,0196	0,1507	0,1186	0,1560	0,3043
4,5	0,1835	0,1842	0,0405	0,1862	0,0986	0,1923	0,2744
5,0	0,2224	0,2256	0,1554	0,2265	0,1265	0,2332	0,2788
5,5	0,2648	0,2721	0,2964	0,2718	0,1800	0,2788	0,3023
6,0	0,3106	0,3236	0,4481	0,3219	0,2469	0,3289	0,3363
6,5	0,3600	0,3801	0,6019	0,3769	0,3201	0,3836	0,3757

Veloc. (m/s)	JI (m/m)	Concentração 16,09%		Concentração 18,33%		Concentração 21,10%	
		Jm (m/m)	Φ	Jm (m/m)	Φ	Jm (m/m)	Φ
1,5	0,0235	0,0551	7,3310	0,0531	5,7042	0,0497	4,2370
2,0	0,0415	0,0634	2,8913	0,0640	2,4661	0,0643	2,0959
2,5	0,0629	0,0771	1,2343	0,0799	1,2285	0,0832	1,2264
3,0	0,0878	0,0962	0,5205	0,1009	0,6743	0,1063	0,8013
3,5	0,1162	0,1206	0,2074	0,1268	0,4140	0,1337	0,5730
4,0	0,1481	0,1505	0,0867	0,1578	0,2968	0,1654	0,4445
4,5	0,1835	0,1857	0,0649	0,1938	0,2548	0,2014	0,3710
5,0	0,2224	0,2263	0,0959	0,2348	0,2540	0,2417	0,3298
5,5	0,2648	0,2723	0,1551	0,2809	0,2764	0,2862	0,3082
6,0	0,3106	0,3236	0,2290	0,3320	0,3117	0,3350	0,2989
6,5	0,3600	0,3804	0,3098	0,3880	0,3539	0,3881	0,2976

Tabela C.3 – Planilha de cálculos de K_D
Variação crescente de velocidades

Veloc. (m/s)	K_D 6,61%	K_D 10,69%	K_D 13,12%	K_D 15,36%	K_D 18,86%	K_D 21,29%
1,5	35,64	26,81	32,38	29,37	26,24	28,05
2,0	34,06	29,70	34,23	32,97	32,46	32,69
2,5	28,94	30,61	33,84	36,39	38,81	37,16
3,0	21,01	29,12	31,41	40,45	45,16	41,81
3,5	11,83	25,25	27,75	46,52	51,73	47,47
4,0	3,34	19,19	23,95	56,22	58,87	55,16
4,5	-2,34	11,24	21,23	71,31	67,01	65,99
5,0	-2,96	1,72	20,91	93,64	76,63	81,17
5,5	3,83	-8,96	24,37	125,08	88,22	101,92
6,0	20,41	-20,42	33,02	167,57	102,32	129,52
6,5	49,21	-32,21	48,32	223,06	119,45	165,23

Tabela C.4– Planilha de cálculos de K_D
Variação decrescente de velocidades

Veloc. (m/s)	K_D 6,61%	K_D 10,69%	K_D 13,12%	K_D 15,36%	K_D 18,86%	K_D 21,29%
1,5	53,04	42,33	30,74	46,37	36,08	26,80
2,0	44,71	39,94	31,73	43,35	36,97	31,42
2,5	31,12	33,99	31,43	36,14	35,97	35,91
3,0	15,44	25,94	30,92	26,33	34,12	40,54
3,5	2,46	18,35	31,92	16,67	33,26	46,04
4,0	-2,35	14,23	36,50	10,40	35,59	53,31
4,5	6,91	16,84	46,86	11,09	43,50	63,36
5,0	36,39	29,63	65,32	22,46	59,50	77,25
5,5	92,41	56,13	94,26	48,35	86,18	96,08
6,0	181,37	99,95	136,12	92,69	126,17	121,00
6,5	309,78	164,75	193,37	159,46	182,15	153,14

ANEXO D

Tabelas com planilhas de cálculos dos ensaios com mistura água-calcário

Tabela D.1– Ensaios com variação decrescente para a mistura água-calcário

Ensaio	Velocidade (m/s)	J 1m (m/m)	J 3m (m/3m)	J 8,2 m (m/8,2m)	J Utilizado (m/m)	Leitura do Volume	Volume (L)	Massa Real (Kg)	Concentração (%)	Média de Concentração (%)
1	2,16	0,0837	0,1755	0,5344	0,0652	53	134,31	142,6	9,29	9,29
2	2,58	0,1046	0,2095	0,6849	0,0835	104	143,99	153,4	9,80	
3	3,08	0,0955	0,3107	0,8545	0,1042	46	132,98	141,4	9,52	
4	3,43	0,1276	0,3775	1,0479	0,1278	82	139,82	147,6	8,43	
5	3,93	0,1772	0,4216	1,2851	0,1567	72	137,92	147,2	10,08	
6	4,23	0,2322	0,4706	1,5391	0,1877	83	140,01	148,4	9,04	
7	4,72	0,3039	0,5521	1,8562	0,2264	84	140,20	148,4	8,84	
8	2,02	0,0471	0,2739	0,5782	0,0705	68	137,16	153	16,55	17,48
9	2,59	0,0661	0,3053	0,73	0,0890	90	141,34	159	17,76	
10	3,00	0,0906	0,3579	0,9161	0,1117	96	142,48	160,2	17,99	
11	3,41	0,0964	0,4113	1,0828	0,1333	106	144,37	163,2	18,44	
12	3,88	0,1307	0,4804	1,3237	0,1614	114	145,89	162,8	16,60	
13	4,31	0,1801	0,536	1,5975	0,1948	100	143,24	161,2	17,82	
14	1,41	0,0512	0,15	0,3708	0,0452	67	136,97	152,8	16,56	14,68
15	2,36	0,0622	0,178	0,4895	0,0573	64	136,40	151,2	15,65	
16	2,04	0,0725	0,1997	0,5399	0,0658	95	142,29	157,6	15,54	
17	2,25	0,0875	0,2238	0,6284	0,0766	79	139,25	152,8	14,18	
18	2,68	0,1016	0,2627	0,7236	0,0882	74	138,30	154,4	16,67	
19	2,99	0,1188	0,2946	0,8219	0,1002	84	140,20	154	14,33	
20	3,16	0,1386	0,3264	0,9291	0,1133	82	136,02	150,8	15,67	
21	3,25	0,1536	0,351	1,0272	0,1253	95	142,29	156,4	14,43	
22	3,75	0,1684	0,3834	1,1418	0,1392	106	144,37	158,2	13,97	
23	3,81	0,1888	0,4163	1,257	0,1533	85	140,39	153,8	13,94	
24	3,98	0,2113	0,4489	1,3844	0,1688	96	142,48	156	13,86	
25	4,19	0,2286	0,4893	1,4916	0,1819	92	141,72	155,2	13,89	
26	4,46	0,2371	0,5464	1,6064	0,1959	69	137,35	150,4	13,67	
27	4,76	0,2905	0,6981	2,0065	0,2447	155	153,68	169,4	14,84	
28	5,19	0,3056	0,7738	2,1652	0,2640	41	132,03	144,6	13,90	
29	5,22	0,3234	0,8446	2,3208	0,2830	89	141,15	154,2	13,53	
30	1,16	0,0176	0,1385	0,3318	0,0405	92	141,72	156,4	15,01	18,29
31	1,63	0,0236	0,1478	0,3804	0,0464	99	143,05	161	17,83	
32	1,60	0,0317	0,1747	0,4475	0,0546	88	140,96	157,8	17,07	
33	1,96	0,0373	0,2231	0,5163	0,0630	102	143,61	162,2	18,32	
34	2,28	0,055	0,2304	0,5972	0,0728	106	144,37	163,6	18,79	
35	2,12	0,055	0,2524	0,6623	0,0808	95	142,29	160,8	18,41	
36	2,55	0,0784	0,2822	0,7704	0,0940	104	143,99	162	17,77	
37	2,88	0,0946	0,3162	0,8675	0,1058	84	140,20	157,6	17,65	
38	3,24	0,0903	0,336	0,9189	0,1121	145	151,78	172,4	19,12	
39	3,40	0,1	0,3825	1,0244	0,1249	78	139,06	162,4	22,98	
40	3,61	0,1182	0,4598	1,137	0,1387	120	147,03	166,4	18,61	
41	3,75	0,1266	0,484	1,239	0,1511	110	145,13	163,4	17,87	
42	4,24	0,1474	0,5257	1,3897	0,1695	122	147,41	166	17,90	
43	4,29	0,1748	0,5685	1,5209	0,1855	122	147,41	166,8	18,58	
44	4,34	0,1638	0,6583	1,6552	0,2019	94	142,10	160,2	18,07	
45	4,49	0,1783	0,7116	1,7986	0,2193	120	147,03	166,4	18,61	
46	5,03	0,1943	0,7934	1,9522	0,2381	130	148,93	167,6	17,81	
47	5,13	0,2289	0,8915	2,2234	0,2711	124	147,79	167,6	18,90	

Tabela D.2– Ensaios com variação decrescente para a mistura água calcário

Ensaio	Velocidade (m/s)	J 1m (m/m)	J 3m (m/3m)	J 8,2 m (m/8,2m)	J Utilizado (m/m)	Leitura do Volume	Volume (L)	Massa Real (Kg)	Concentração (%)	Média de Concentração (%)
48	5,43	0,2782	1,0622	2,6509	0,3233	80	139,44	162,6	22,78	22,02
49	5,01	0,2676	0,9818	2,4978	0,3046	74	138,30	160,2	21,86	
50	5,13	0,2502	0,8867	2,3201	0,2829	85	140,39	163	22,18	
51	4,78	0,228	0,8064	2,1271	0,2594	46	132,98	153,6	21,46	
52	4,77	0,2046	0,7474	1,9777	0,2412	100	143,24	165,8	21,76	
53	4,69	0,1826	0,6963	1,8295	0,2231	105	144,18	168,4	22,99	
54	4,34	0,1641	0,6306	1,6595	0,2024	96	142,48	165,4	22,16	
55	4,04	0,1451	0,5947	1,5393	0,1877	83	140,01	163,2	22,72	
56	3,89	0,1268	0,5399	1,3984	0,1705	103	143,80	167,8	22,86	
57	3,73	0,1142	0,492	1,2702	0,1549	70	137,54	158,8	21,41	
58	3,47	0,099	0,4413	1,1477	0,1400	130	148,93	173,2	22,40	
59	3,39	0,086	0,3818	1,0253	0,1250	108	144,75	168	22,12	
60	3,11	0,0739	0,3468	0,9091	0,1109	92	141,72	164,6	22,23	
61	2,87	0,0623	0,3022	0,7943	0,0969	77	138,87	160,6	21,63	
62	2,73	0,054	0,2647	0,6948	0,0847	104	143,99	167,4	22,35	
63	2,44	0,0431	0,2289	0,5969	0,0728	62	136,02	156,8	21,19	
64	2,20	0,0382	0,1953	0,5111	0,0623	93	141,91	163,8	21,37	
65	1,94	0,0299	0,1618	0,4216	0,0514	74	138,30	160,4	22,03	
66	1,48	0,016	0,1144	0,2885	0,0352	74	138,30	159	20,82	
67	5,36	0,289	1,0826	2,7521	0,3356	97	142,67	170	25,71	26,29
68	5,00	0,2764	1,0178	2,5886	0,3157	59	135,45	161	25,37	
69	4,89	0,2542	0,9385	2,4197	0,2951	95	142,29	170,4	26,38	
70	4,92	0,2332	0,8795	2,25	0,2744	121	147,22	176,2	26,29	
71	4,78	0,2077	0,812	2,0817	0,2539	111	145,32	174,6	26,81	
72	4,62	0,1902	0,747	1,9287	0,2352	157	154,06	184	26,02	
73	4,51	0,1751	0,6878	1,7839	0,2175	151	152,92	183	26,28	
74	4,25	0,1547	0,6742	1,6511	0,2014	122	147,41	176,8	26,57	
75	3,88	0,143	0,6208	1,5048	0,1835	81	139,63	166	25,40	
76	3,84	0,1336	0,5773	1,3762	0,1678	69	137,35	163,4	25,49	
77	3,44	0,1204	0,5291	1,2362	0,1508	89	141,15	169,6	26,82	
78	3,43	0,1063	0,4826	1,1206	0,1367	115	146,08	176,6	27,63	
79	3,12	0,0855	0,4241	0,9922	0,1210	107	144,56	172,4	25,81	
80	2,93	0,0702	0,3711	0,8701	0,1061	105	144,18	173,4	26,94	
81	2,69	0,0528	0,3102	0,7491	0,0914	96	142,48	170,8	26,51	
82	2,47	0,0391	0,2559	0,6379	0,0778	93	141,91	169,8	26,26	
83	2,02	0,0208	0,1862	0,465	0,0567	60	135,64	163,4	27,16	
84	1,67	0,0082	0,1329	0,3356	0,0409	51	133,93	160,9	26,80	
85	1,24	0,0041	0,1081	0,2761	0,0337	87	140,77	168,2	26,08	
86	1,25	0,0057	0,1034	0,2693	0,0328	76	138,68	165	25,51	

ANEXO E

Curvas de Perda de Carga em função da velocidade média do escoamento. Mistura água-calcário

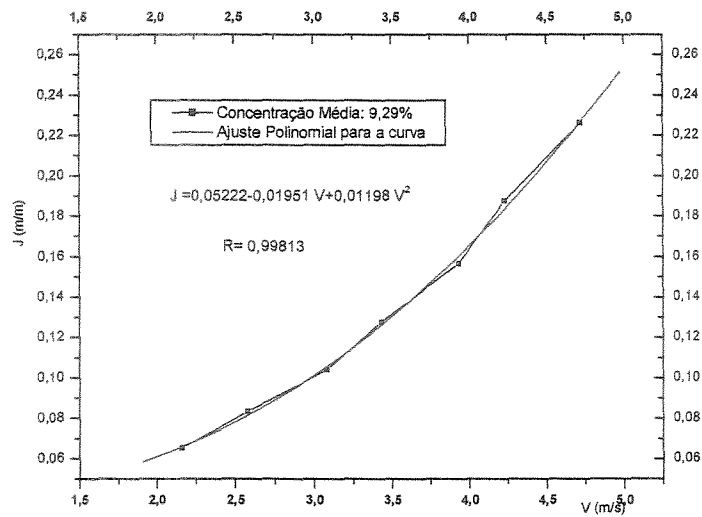


Figura E.1 - Curva da Perda de Carga em Função da Velocidade média
Fase sólida: calcário com 9,29% de concentração em volume

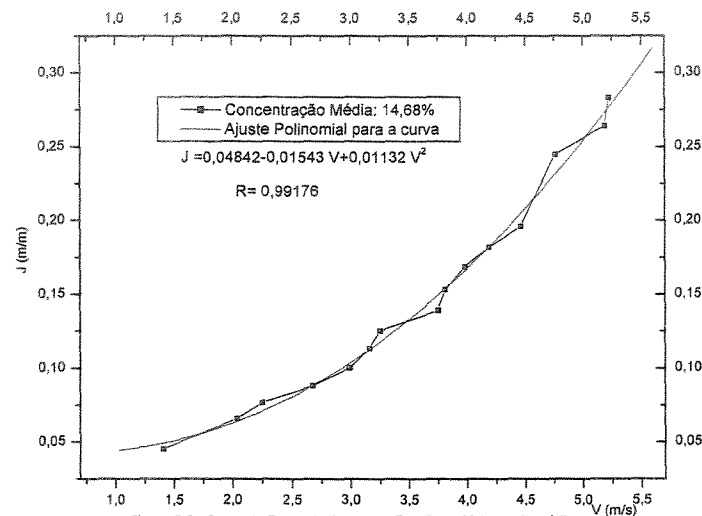


Figura E.2 - Curva da Perda de Carga em Função da Velocidade média
Fase Sólida: Calcário com 14,68% de concentração em volume

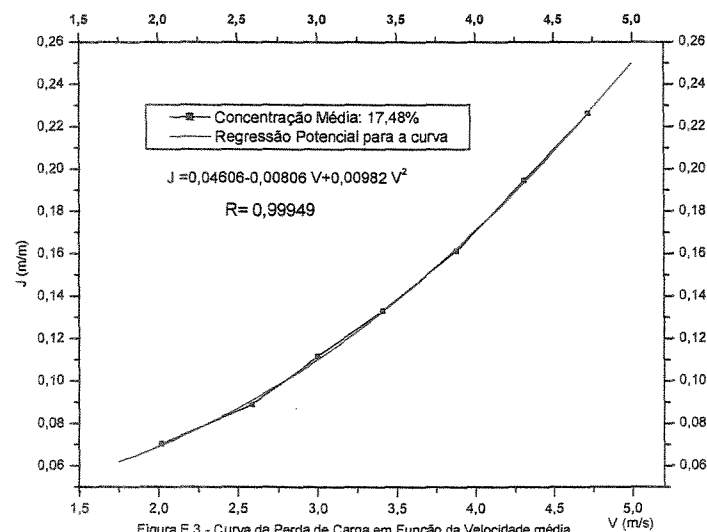


Figura E.3 - Curva da Perda de Carga em Função da Velocidade média
Fase sólida: Calcário com 17,48% de concentração em volume

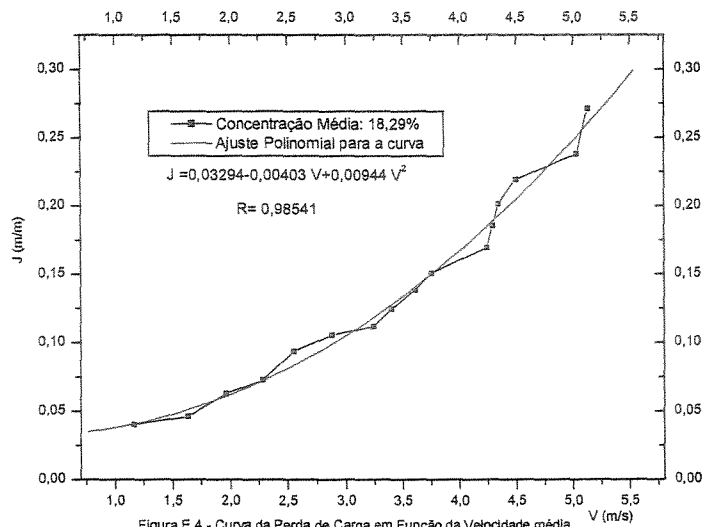


Figura E.4 - Curva da Perda de Carga em Função da Velocidade média
Fase sólida: Calcário com 18,29% de concentração em volume

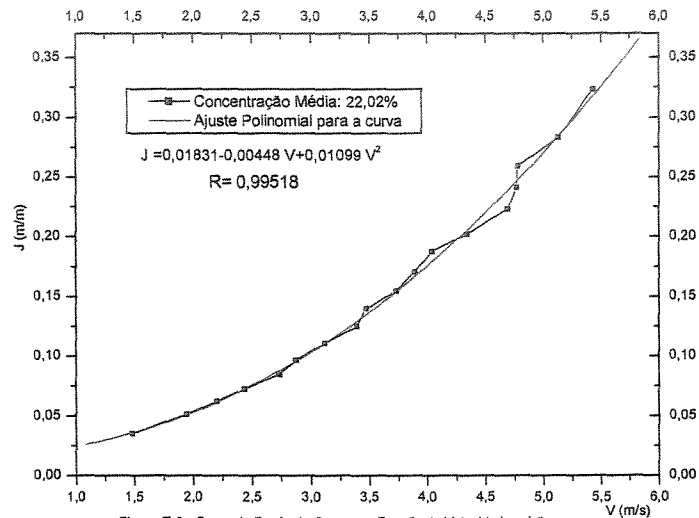


Figura E.5 - Curva da Perda de Carga em Função da Velocidade média
Fase Sólida: Calcário com 22,02% de concentração em volume

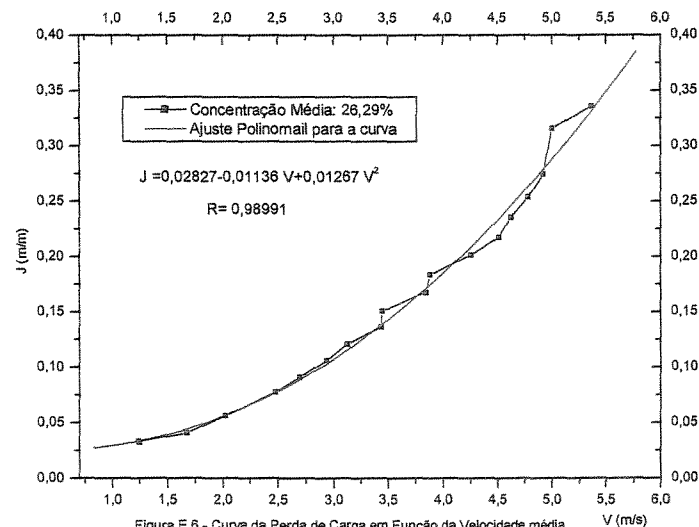


Figura E.6 - Curva da Perda de Carga em Função da Velocidade média
Fase Sólida: Calcário com 26,29% de concentração em volume