



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

**INFLUÊNCIA DE POLÍMERO REDUTOR DE ARRASTE NO
ESCOAMENTO BIFÁSICO (SÓLIDO-LÍQUIDO) EM CONDUTOS
FORÇADOS**

Volume 1

MARIA YAECO UEJIMA SATTO

ORIENTADOR: PROF.DR. EVALDO MIRANDA COIADO

Campinas – S.P.

1998



6756086



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

**INFLUÊNCIA DE POLÍMERO REDUTOR DE ARRASTE NO
ESCOAMENTO BIFÁSICO (SÓLIDO-LÍQUIDO) EM CONDUTOS
FORÇADOS**

**Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia Civil da Universidade
Estadual de Campinas para obtenção
do título de Doutor em Engenharia
Civil - Área de Concentração:
Recursos Hídricos**

Autora: Maria Yaeco Uejima Satto

Orientador: Prof. Dr. Evaldo Miranda Coiado

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação/tese.	
	<u>21/2/98</u>
Prof. Dr.	
Matrícula:	<u>051861</u>

**Campinas – SP
1998**

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

Sa83i Satto, Maria Yaeco Uejima
 Influência de polímero redutor de arraste no
 escoamento bifásico (sólido-líquido) em condutos
 forçados. / Maria Yaeco Uejima Satto.--Campinas, SP:
 [s.n.], 1998.
 2v.

 Orientador: Evaldo Miranda Coiado.
 Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

 1. Escoamento bifásico. 2. Tubos - Dinâmica dos
fluidos. 3. Polímeros solúveis em água. 4. Transporte de
sedimentos - Velocidade. I. Coiado, Evaldo Miranda. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Civil. III. Título.

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

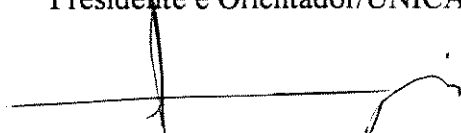
**INFLUÊNCIA DE POLÍMERO REDUTOR DE ARRASTE
NO ESCOAMENTO BIFÁSICO (SÓLIDO-LÍQUIDO) EM
CONDUTOS FORÇADOS**

MARIA YAECO UEJIMA SATTO

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. Evaldo Miranda Coiado
Presidente e Orientador/UNICAMP



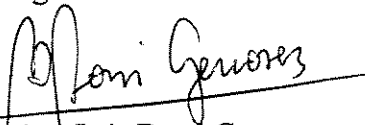
Prof. Dr. Fazal Hussain Chaudhry
Escola de Engenharia São Carlos/USP



Prof. Dr. Antonio A. dos Santos Nogueira
Escola Politécnica/USP



Prof. Dr. José Geraldo Pena de Andrade
Faculdade de Engenharia Civil/UNICAMP



Profa. Dra. Ana Inés Borri Genovez
Faculdade de Engenharia Civil/UNICAMP

Campinas, 16 de Dezembro de 1998

DEDICATÓRIA

Este trabalho agradeço e dedico:

À meus Pais, pelos inesquecíveis exemplos de trabalho, dedicação, ternura, persistência e compreensão.

Ao Julio pelo apoio, companhia, carinho, e compreensão sempre presentes.

Aos queridos e maravilhosos filhos: Raquel, Telma e Wiliam.

AGRADECIMENTOS

À finalização do trabalho de doutorado, expresso os meus sinceros agradecimentos à todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a sua concretização. Com carinho, MUITO OBRIGADO.

Ao professor Dr. EVALDO MIRANDA COIADO, nossos especiais e sinceros agradecimentos pelo constante incentivo e apoio, os quais foram muito importantes e construtivos. Nosso MUITO OBRIGADO.

À **FAPESP** -FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO, pelos recursos concedidos para a realização desta pesquisa, e pelas avaliações do projeto de pesquisa de doutoramento. MUITO OBRIGADO.

À Diretoria da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, pela infraestrutura concedida. MUITO OBRIGADO.

Ao Departamento de Recursos Hídricos da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP pelo apoio em infra-estrutura.e pelos cursos de pós-graduação. MUITO OBRIGADO.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, pela contribuição aos conhecimentos adquiridos durante todo o período do doutorado. MUITO OBRIGADO.

Aos amigos da Faculdade de Engenharia Civil e a todos que encontrei ao longo da jornada da vida pelo apoio e pela contribuição de forma direta ou indireta. MUITO OBRIGADO.

Aos técnicos do Laboratório de Hidráulica, FEC – UNICAMP, Carlão, Marcelo e Thiago, pela dedicação técnica prestada à montagem da bancada de ensaios, à manutenção dos equipamentos e à realização de medições experimentais. MUITO OBRIGADO.

À Diretoria do Instituto de Química da UNICAMP, pela utilização de equipamentos de medição das propriedades reológicas do polímero. MUITO OBRIGADO.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia Civil e das Bibliotecas da UNICAMP pelo trabalho de apoio, muito importante, que possibilitou o desenvolvimento da pesquisa. MUITO OBRIGADO.

Aos amigos e colegas integrantes da pós-graduação pelos momentos inesquecíveis de verdadeiro profissionalismo e amizade. MUITO OBRIGADO.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE FOTOS.....	xxxvi
LISTA DE TABELAS.....	xxxvii
RESUMO.....	xlii
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - OBJETIVOS.....	3
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 - Transporte de sedimentos.....	5
3.1.1 - Fluxo horizontal de suspensões sólido-líquido em dutos sob pressão	5
3.1.2 - Conceitos básicos de hidrotransporte de sólidos.....	6
3.1.3 - Escoamentos padrões no transporte de sedimentos.....	12
3.1.4 - Definições de velocidade crítica (ou velocidade mínima de transporte) e de velocidade limite de sedimentação (ou velocidade crítica de sedimentação.....	16
3.1.5 - Correlações e pesquisas diversas sobre velocidade crítica de sedimentação.....	21
3.1.6 - Distribuições de velocidade e concentração	44
3.2 - Transporte de suspensões de polímeros	48
3.2.1 - O fenômeno de redução de arraste	48
3.2.2 - A assíntota de máxima redução de VIRK, P.S. (1967) e o perfil limite máximo.....	49

3.2.3 - Pesquisas gerais sobre o transporte hidráulico de suspensões de polímeros.....	58
3.3 - Modelos reológicos	66
4 - MATERIAL E MÉTODO.....	72
4.1 - Bancada de ensaio	72
4.1.1 - Bomba principal	72
4.1.2 - Bomba misturadora 1.....	79
4.1.3 - Bomba misturadora 2.....	79
4.1.4 - Bomba Misturadora 3.....	79
4.1.5 - Bomba de retorno.....	80
4.1.6 - Canalização de sucção.....	80
4.1.7 - Canalização de recalque.....	80
4.1.8 - Desviador rotacional de fluxo	81
4.1.9 - Seção de medidas de concentração e velocidade	81
4.1.10 - Reservatório principal	83
4.1.11 - Sistema de medidas gravimétricas.....	83
4.1.12 - Tanque de descarga ou de retorno.....	83
4.1.13 - Transdutores de pressão.....	84
4.1.14 - Medidor de vazão eletromagnético.....	84
4.2 - Procedimento Experimental.....	85
4.2.1 - Medidas da vazão e da concentração média do sólido na mistura.....	85
4.2.2 - Medidas de perda de carga	85
4.2.3 - Medidas de velocidade e concentração pontual	86
4.2.4 - Determinação da velocidade crítica	87
4.2.5 - O preparo das soluções de água e polímero.....	87
4.2.6 - A água utilizada.....	88
4.2.7 - O polímero e as concentrações utilizadas.....	88
4.2.8 - As areias utilizadas e o preparo das misturas sólido- líquidas água e areia.....	88
4.2.9 - Preparo das misturas de água, areia e polímero.....	89
4.2.10 - Troca de solução polimérica.....	89
4.3 - Metodologia de cálculos.....	90
4.3.1 - Cálculo da concentração média do sólido na mistura.....	90
4.3.2- Cálculo da concentração pontual	90

4.3.3 – Erros nas medidas.....	91
4.3.3.1 - Erro na concentração média de sólidos presente no fluxo.....	92
4.3.3.2. - Erro relativo na concentração pontual.....	95
4.3.3.3 - Erro relativo na velocidade pontual.....	96
4.3.3.4 - Erro relativo na velocidade média.....	97
4.3.3.5 - Erro relativo na perda de carga unitária.....	98
4.4 - Viscosidade e densidade da água e suspensões de polímero	98
4.5 - Ensaio de água e de água e areia.....	99
4.6 – Denominações de todos os ensaios.....	100
4.7 - Ensaio de soluções de polímero e de suspensões de polímero e areia.....	101
4.8 – Os experimentos com polímero.....	102
4.9 - A medição para suspensões de polímero com areia BC	103
 5 –RESULTADOS E CONCLUSÕES	 105
 5.1 - Ensaio com água.....	 105
5.1.1– Perda de Carga da água e o desgaste da tubulação devido aos diversos ensaios com misturas sólido-líquido.....	105
5.2 - Ensaio de água e areias.....	113
5.2.1 – Perda de Carga de Água e AreiaBC.....	113
5.2.2 – Perda de Carga de Água + Areia A.....	118
5.3 – Ensaio com soluções de polímero.....	124
5.3 1 - Ensaio com solução de polímero.....	124
5.3 1 1 – Perdas de Carga e degradação de soluções de polímero.....	124
5.3.1.2 - Distribuição de velocidade de solução de NALCO 4045.....	132
5.3.2 – Ensaio de soluções de polímero com areia BC.....	135
5.3.2.1– Perda de Carga de fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC.....	135
5.3.2 2– Distribuição de velocidade de solução de polímero e areia BC.....	155
5.4 – Perda de Carga, Velocidade Crítica de Sedimentação e Velocidade Crítica de misturas sólido-líquido.....	161
5.4.1 – Ensaio com água limpa.....	161
5.4.2– Ensaio com mistura de água + areia A.....	161

5.4.3 – Ensaio com mistura de água + areia BC.....	167
5.4.4 – Influência do tamanho do grão do sólido na perda de carga, na velocidade crítica de sedimentação, e na velocidade crítica.....	175
5.4.5 – Ensaio com soluções de polímero.....	179
5.4.6 – Ensaio com soluções de água – polímero - areia BC.....	184
5.4.6.1 – Concentrações: areia a 2%, e polímero a 100ppm e 400ppm.	184
5.4.6.2 – Concentrações: areia a 5%, e polímero a 100ppm, 200 e 400ppm.....	188
5.4.6.3 – Concentrações: areia BC a 10%, e polímero a 100ppm, 200 e 400ppm.....	192
5.4.6.4 – Concentrações: areia a 15%, e polímero a 100ppm, 200 e 400ppm.....	197
5.4.6.5 – Concentrações: areia a 7,2% e 14%, e polímero a 1.200ppm.....	201
5.4.6.6 – Concentrações: areia a 8,1% e polímero a 600 ppm.....	209
5.4.6.7 – Velocidade crítica de sedimentação – escoamento de misturas com polímero.....	212
5.4.6.8 – Velocidade crítica– escoamento de misturas com polímero.....	221
5.4.6.9 – Influência do polímero na velocidade crítica de sedimentação e na correspondente perda de carga unitária.....	225
5.4.6.10 – Influência do polímero na velocidade crítica e na correspondente perda de carga unitária.....	229
5.5 – Velocidade crítica de sedimentação.....	233
5.5.1 – Correlações de velocidade crítica de sedimentação.....	233
5.5.2 Dificuldade na padronização da velocidade crítica de sedimentação.....	241
5.5.3 Conclusões sobre efeito de solução polimérica sobre a velocidade crítica de sedimentação.....	243
5.5.3.1 – Efeito da adição de polímero sobre a velocidade crítica de sedimentação....	243

5.5.3.1.1 – Descrição das conclusões do efeito do polímero sobre a velocidade crítica de sedimentação.....	244
5.5.3.1.2 – Conclusões finais sobre a adição de polímero à velocidade crítica de sedimentação.....	246
5.5.4 – Conclusões sobre o escoamento de areia e água.....	250
5.5.4.1 – Programa de Soliman, R. H. e Collier, P. B.....	250
5.6 – Fator de atrito de Fanning.....	254
5.6.1 – Escoamento de água.....	254
5.6.2 – Escoamento de Água + Areia BC.....	256
5.6.3 – Escoamento de Água + Areia A.....	256
5.6.4 – Escoamento de soluções de polímero e de soluções de polímero com areia BC.....	258
5.7 - Distribuição vertical pontual de velocidades na seção do tubo.....	260
5.8 – Perfil adimensional de velocidades pontuais.....	266
5.8.1 - Escoamento de água e areia BC.....	266
5.8.2 – Escoamento de água e areia A.....	274
5.8.3 – Escoamento de água e areias BC e A, e escoamento de areia BC em solução de polímero.....	275
5.8.4 – Distribuição de velocidade de Einstein.....	280
5.9 - Distribuição vertical de concentração por amostragem isocinética.....	283
5.10 – Lei da Diferença de velocidade (“Law of Deficiency”)	303
5.10.1 - Lei da Diferença de velocidade (“Law of Deficiency”) para escoamento de água.....	303
5.10.2 – Lei da diferença de velocidade ou “Law of Deficiency” para Água + Areia BC.....	304
5.10.3 – Lei da diferença de velocidades ou “Law of Deficiency” para Água + Areia A.....	308
6 - CONCLUSÕES.....	310
7 - RECOMENDAÇÕES OU SUGESTÕES.....	335

ANEXO 1 - Programa Fortran para Cálculo de Velocidade Crítica de Sedimentação.	337
ANEXO 2 - Perfil Adimensional de Velocidade Para Água e Areias BC e A.	344
ANEXO 3 - Distribuição Vertical de Velocidade para Água e areia BC.	352
ANEXO 4 - Distribuição Vertical de Concentração Pontual.	356
ANEXO 5 - Reologia das Suspensões de Polímero.	365
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	369
ABSTRACT	378

LISTA DE SÍMBOLOS

C	$= \phi$ = Concentração volumétrica
c_1	= Coeficiente de YU, LI-REN
C_c	= Coeficiente de correlação
C_d	$= C_D$ = Coeficiente de arraste
C_f	= Concentração total de sólidos "in situ"
$C_i(\%)$	= Concentração volumétrica expressa em porcentagem
C_p	= Concentração de polímero (ppm)
C_v	= Concentração volumétrica na entrada
C_{vl}	= Concentração volumétrica de sólidos no fluxo
C_w	= Concentração em peso
d	= diâmetro da partícula (L)
D	= Diâmetro do duto (L)
d_{50}	= Diâmetro da partícula sólida tal que 50% da amostra tem diâmetro inferior a ela (L)
d_{65}	= Diâmetro da partícula sólida tal que 65% da amostra tem diâmetro inferior a ela (L)
d_{85}	= Diâmetro da partícula sólida tal que 85% da amostra tem diâmetro inferior a ela (L)
d_{rm}	$= W/vol.\gamma_a$ = Densidade relativa da mistura
d_{rs}	$= s$ = Densidade relativa do sólido
E_m	= Coeficiente de transferência de momento
E_s	= Coeficiente de transferência de massa para partículas ou de difusão de sólidos
f	= Fator de atrito de Fanning
f_f	= Fator de atrito de Fanning
f_D	= Fator de atrito de Darcy
f	= função
F_D	= Força de arraste (ML/T^2)
F_L	= Constante de correlação de DURAND
g	= Aceleração da gravidade (L/T^2)
ID	= diâmetro interno do tubo (L)
J	= Perda de carga unitária (L/L)

$J^* = ((J_{cp} - 0,0636)/0,0636).100$ = Diferença relativa percentual entre perda de carga da velocidade crítica de sedimentação com e sem polímero. (m/m)

J_{cp} = Perda de carga unitária da velocidade crítica de sedimentação em presença de polímero (m/m).

J_{H_2O} = Perda de Carga unitária da água limpa (L/L)

$J_{C_i\%}$ = Perda de carga unitária para $C_i(\%)$ de areia (L/L)

$J_{2\%}$ = Perda de carga unitária para fluxo de 2% de areia (L/L)

$J_{5\%}$ = Perda de carga unitária para fluxo de 5% de areia (L/L)

$J_{10\%}$ = Perda de carga unitária para fluxo de 10% de areia (L/L)

$J_{15\%}$ = Perda de carga unitária para fluxo de 15% de areia (L/L)

K = Constante

$K_p = 5,5$ para água na equação 3.4

K_1 = Coeficiente de correção do tubo de Pitot

kks = constante de Von Karman

kls = constante da equação da subcamada viscosa (ou laminar), $u^+ = kls.y^+$, no transporte de sedimentos.

l = Comprimento de mistura (L)

l' = Coeficiente de mistura de YU, LI-REN (L)

l_e = Comprimento médio do vórtice (L)

M = Peso Molecular

$N_{Re} = \rho D ((gd(s-1))^{1/2} / \mu$ = Número de Reynolds da partícula de OROSKAR & TURIAN

OD = diâmetro externo (L)

ppm = partes por milhão

Q = Vazão (L^3/T)

r^2 = coeficiente de correlação

R = Raio do duto (L)

R^+ = Espessura adimensional do centro turbulento

$R^2 = C_c$ = Coeficiente de correlação

Re = Número de Reynolds = $\rho v_m D / \mu$

Re' = Número de Reynods generalizado

R_h = Raio hidráulico (L)

Re_p = $\rho U d / \mu$ = Número de Reynolds da Partícula

s = ρ_s / ρ = Densidade relativa do sólido

S^+ = Deslizamento efetivo

t = Tempo de duração do desvio do fluxo (T)

T = Temperatura (°C)

u = Velocidade média local (L/T)

u' = Flutuação turbulenta na direção x (L/T)

u^* = Velocidade de atrito referente ao escoamento médio (L/T)

u_0^* = Velocidade de atrito na condição de deposição para infinita diluição (L/T)

u_c^* = Velocidade de atrito na condição de mínima velocidade de transporte, a uma dada concentração (L/T)

v' = Flutuação turbulenta na direção y (L/T)

V_C = Velocidade crítica ou velocidade de mínima energia de transporte (L/T)

$V_{CS} = V_D = V_{M2} = V_L = v_{cs}$ = Velocidade limite de sedimentação = Velocidade crítica de sedimentação = Velocidade limite de deposição (L/T)

V_L = Velocidade do líquido (L/T)

V^* = Diferença relativa percentual entre V_{cs} com e sem polímero

$V^* = ((V_{cp} - 1,88) / 1,88) \cdot 100$ = Diferença relativa percentual na velocidade crítica de sedimentação devido à presença de polímero. (m/s)

V_{cp} = Velocidade crítica de sedimentação com polímero (m/s)

$V_m = U$ = velocidade média do fluxo (L/T)

vol = Volume armazenado no tanque volumétrico (L³)

$V_S = w = v_s$ = Velocidade de sedimentação ou velocidade terminal (L/T)

w = Velocidade terminal ou velocidade de sedimentação (L/T)

W = Peso da mistura no tanque volumétrico (ML/T²)

wppm = partes por milhão em peso

x_1 = Fator de energia turbulenta de OROSKAR & TURIAN

x_n = Comprimento de mistura no centro turbulento

x_p = Comprimento de mistura na região da subcamada elástica

x_v = Comprimento de mistura na subcamada viscosa

y = Distância 0 na parede e R no centro do duto (L)

y_m = Distância do fundo do canal até a superfície do líquido (L)

$y_n^+ = y_e^+$ = espessura adimensional da subcamada elástica

y_v^+ = Espessura adimensional da subcamada viscosa

ϕ = Concentração volumétrica

ρ = massa específica (M/L^3)

γ_a = peso específico da água (M/T^2L^2)

ε = rugosidade absoluta (L)

τ = Tensão de cisalhamento na parede (M/T^2L)

μ = Viscosidade dinâmica (M/LT)

Δ = Variável de correção de YU, LI-REN

$\Omega = du/dy$ = Gradiente de velocidade (T^{-2})

ρ_{fh} = Densidade hipotética de mistura contendo partículas menores que 74 microns de concentração C_f (M/T^2L^2)

$\bar{u} = u_m$ = Velocidade média do fluxo (L/T)

ν_w = Viscosidade cinemática da água (L^2/T)

τ_y = Tensão de cisalhamento na seção de altura y (M/T^2L)

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Quadro de definição para o sistema de coordenadas polares.....	12
Figura 3.2- Escoamentos padrões de partículas de areia em duto horizontal	14
Figura 3.3- Típica relação entre gradiente de pressão e velocidade.....	16
Figura 3.3a - Perda de carga de mistura água e areia ($d=0,42$ mm) em tubo de D = 150 mm. De DURAND (1953).....	17
Figura 3.3b - Perda de carga de mistura água e areia ($d=2,04$ mm) em tubo de D = 150 mm. De DURAND (1953).....	17
Figura 3.4- Valor de F_L da Correlação de Durand para grãos uniformes.....	23
Figura 3.4b - Velocidade Limite de Sedimentação para material não uniforme de DURAND & CONDOLIOS apud VANONI (1977).	24
Figura 3.5- Relação entre $V_{M2}/V_{M2,max}$ em função da concentração de entrada . Obtidos dos experimentos de SINCLAIR(1962).....	25
Figura 3.6- Correlação de velocidade crítica de CONDOLIOS & CHAPUS(1963).....	26
Figura 3.7a - Diagrama generalizado de fases para transporte de suspensões.....	30
Figura 3.7b - Classificação dos regimes de escoamento por correlação com a velocidade mínima de transporte. Válida para $(s-1)=1,65$	31
Figura 3.8 - Velocidade crítica V_D de suspensões de carvão e ferro. De WASP et al (1977).....	37

Figura 3.9 - Resultados experimentais de velocidade crítica em dutos de 2 polegadas em função da concentração, de WANI (1986) apud CHIEN SZE-FOO (1994).....	37
Figura 3.10 - Resultados experimentais de velocidade crítica em duto de 2 polegadas, destacando o efeito da densidade do fluido, de WANI (1986) apud CHIEN SZE-FOO (1994).....	38
Figura 3.10a - Velocidade Crítica de várias correlações apud CHIEN (1994).....	38
Figura 3.10b – Regimes de escoamento de acordo com Turian et al (1977).....	39
Figura 3.11 - Evidência de uma assíntota de máxima redução de arraste. Segundo VIRK (1970) para diversas pesquisas, relacionadas na Tabela 3.1.....	52
Figura 3.12 - Esquema do modelo de três camadas no fluxo médio proposto por VIRK para o fenômeno TOMS.....	54
Figura 3.13 - Perfis de velocidade média durante redução de arraste. Condições experimentais estão resumidas na Tabela 3.2. Segundo VIRK (1970).....	57
Figura 3.14 - Perda de carga para areia de quartzo ($C \approx 20\%$) para "guar gum" e complexo sabão. ΔH medido em cm de água em 68 diâmetros do duto.....	58
Figura 3.15 - Perda de carga para a areia de baquelite ($C \approx 20\%$) para "guar gum" e complexo sabão. ΔH medido em cm de água em 68 diâmetros do duto.....	59
Figura 3.16 - Viscosidade versus τ , para 45% "lignite" em metanol, $C=0,43$	69
Figura 3.17 - Viscosidade versus τ , para 60% "lignite" em metanol, $C=0,58$	70

Figura 4.1. – Bancada de ensaios.....	73
Figura 4.2 Foto da vista geral da Bancada de ensaios.....	74
Figura 5.1.1 – Perda de carga de fluxo de água em tubo novo(Água 1), no tubo após ensaios com areia BC(Água 2) e após ensaios com areia A (Água 3).....	105
Figura 5.1.1.2 – $J = f(v)$ para os ensaios Água 3, Água 4 e Água 5.....	107
Figura 5.1.2 – Perfil adimensional –Modelo Newtoniano de duas camadas para Água 1.....	108
Figura 5.1.3 – Perfil adimensional Ensaio água 1.....	108
Figura 5.1.4 – Perfil adimensional de velocidades – Ensaio Água 1.....	108
Figura 5.1.5 – Perfil adimensional de velocidades – Ensaio Água 1.....	109
Figura 5.1.6 – Perfil adimensional de velocidades – Ensaio Água 1.....	109
Figura 5.1.7 - Perfil adimensional de velocidades – Ensaio Água 2.....	109
Figura 5.1.8 – Perfil adimensional de velocidade – Água 2.....	110
Figura 5.1.9 – Perfil adimensional de velocidade – Água 2.....	110
Figura 5.1.10 – Perfil adimensional de velocidade – Água 2.....	110
Figura 5.1.11 – Perfil adimensional de velocidade – Água 3.....	111

Figura 5.1.12 – Perfil adimensional de velocidade – Água 3.....	111
Figura 5.1.13 – Perfil adimensional de velocidade – Água 3.....	111
Figura 5.1.14 – Perfil adimensional de velocidade – Água 3.....	112
Figura 5.2.1.1 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo para 2% de areia BC.....	115
Figura 5.2.1.2 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo para 5% de areia BC.....	116
Figura 5.2.1.3 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo para 10% de areia BC.....	116
Figura 5.2.1.4 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo para 15% de areia BC.....	117
Figura 5.2.1.5 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo para 15% de areia BC.....	117
Figura 5.2.1.6 – Curva de $J = f(v)$ de velocidade crítica de sedimentação para diversas concentrações de areia BC.....	118
Figura 5.2.2.1 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo de água e areia A em concentração de 2%.....	120
Figura 5.2.2.2 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo de água e areia A em concentração de 5%.....	121
Figura 5.2.2.3 – Perda de carga unitária em função de velocidade média	

do fluxo de água e areia A em concentração de 10%.....122

Figura 5.2.2.4 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo de água e areia A em concentração de 2%, 5% e 10%. Indicação da curva de velocidade crítica de sedimentação e das curvas de ajuste.....123

Figura 5.2.2.5 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo de água e areia A na condição crítica de sedimentação.....123

Figura 5.3.1.1.1 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo, em testes de diminuição da rotação do motor, para 100 ppm, 200 ppm e 400 ppm de polímero.....125

Figura 5.3.1.1.2 – Degradação da solução à 400 ppm de polímero em função de horas de repouso e de bombeamento.....126

Figura 5.3.1.1.3 – $J = f(v)$ em testes de aumento de rotação do motor para soluções frescas de 100, 200, 400 e 1200 ppm de polímero.....127

Figura 5.3.1.1.4 - $J = f(v)$ para testes, com solução fresca à 100 ppm de polímero, de aumento e de diminuição da rotação do motor.....128

Figura 5.3.1.1.5 - $J = f(v)$ para testes, com solução fresca à 200 ppm de polímero, de aumento e de diminuição da rotação do motor.....128

Figura 5.3.1.1.6 - $J = f(v)$ para testes, com solução fresca à 400 ppm de polímero, de aumento e de diminuição da rotação do motor.....128

Figura 5.3.1.1.7 – $J = f(v)$ para solução única de 100 ppm em teste de aumento seguido de diminuição da rotação do motor.....129

Figura 5.3.1.1.8 – $J = f(v)$ para solução única de 200 ppm em teste de aumento seguido de diminuição da rotação do motor.....	130
Figura 5.3.1.1.9 – $J = f(v)$ para solução única de 400 ppm em teste de aumento seguido de diminuição da rotação do motor.....	130
Figura 5.3.1.1.10 – $J = f(v)$ para solução única de 600 ppm em teste de aumento seguido de diminuição da rotação do motor.....	131
Figura 5.3.1.1.11 – $J = f(v)$ para solução única de 1200 ppm em teste de aumento seguido de diminuição da rotação do motor.....	131
Figura 5.3.1.2.1 – Perfil adimensional obtido de tubo de Pitot sem fator de correção para 100 ppm de polímero.....	132
Figura 5.3.1.2.2 – Perfil adimensional de velocidades obtido de tubo de Pitot, sem fator de correção nos valores de velocidade. Obtido para 100, 200, 400 e 1200 ppm de polímero.....	133
Figura 5.3.1.2.3 – Perfil adimensional de velocidades obtido de tubo de Pitot, sem fator de correção para observação da degradação da solução à 400 ppm em função de horas de repouso.....	133
Figura 5.3.2.1.1 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 100 ppm com cerca de 5% de areia BC.....	136
Figura 5.3.2.1.2 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 200 ppm com cerca de 5% de areia BC.....	136
Figura 5.3.2.1.3 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 400 ppm com cerca de 5% de areia BC.....	137

Figura 5.3.2.1.4 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 100 ppm com cerca de 10% de areia BC.....	137
Figura 5.3.2.1.4 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 100 ppm com cerca de 10% de areia BC.....	137
Figura 5.3.2.1.6 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 400 ppm com cerca de 10% de areia BC.....	138
Figura 5.3.2.1.7 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 600 ppm com cerca de 10% de areia BC.....	138
Figura 5.3.2.1.8 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 800 ppm com cerca de 10% de areia BC.....	138
Figura 5.3.2.1.9 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 1200 ppm com cerca de 10% de areia BC.....	139
Figura 5.3.2.1.10 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 100 ppm com cerca de 15% de areia BC.....	139
Figura 5.3.2.1.11 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 200 ppm com cerca de 15% de areia BC.....	139
Figura 5.3.2.1.12 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 400 ppm com cerca de 15% de areia BC.....	140
Figura 5.3.2.1.13 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 800 ppm com cerca de 15% de areia BC.....	140

Figura 5.3.2.1.14 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 1200 ppm com cerca de 15% de areia BC.....	140
Figura 5.3.2.1.15 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução degradada após 30 minutos em turbulência à 1200 ppm com cerca de 15% de areia BC.....	141
Figura 5.3.2.1.16 – $J = f(v)$ para a condição crítica de sedimentação para soluções de polímero em cerca de 5% de areia BC.....	144
Figura 5.3.2.1.17 – $J = f(v)$ para cerca de 5% de areia BC em 100, 200 e 400 ppm de polímero.....	144
Figura 5.3.2.1.18 – $J = f(v)$ para a condição crítica de sedimentação para soluções de polímero em cerca de 10% de areia BC.....	144
Figura 5.3.2.1.19 – $J = f(v)$ para cerca de 10% de areia BC em 100, 200, 400, 600, 800 e 1200 ppm de polímero.....	145
Figura 5.3.2.1.20 – $J = f(v)$ para a condição crítica de sedimentação para soluções de polímero em cerca de 15% de areia BC.....	145
Figura 5.3.2.1.21 – $J = f(v)$ para cerca de 15% de areia BC em 100, 200, 400, 800 e 1200 ppm de polímero.....	146
Figura 5.3.2.1.22 – $J = f(v)$ para a condição crítica de sedimentação para soluções de 100 ppm polímero em três concentrações de areia BC.....	146
Figura 5.3.2.1.23 – $J = f(v)$ para a condição crítica de sedimentação para soluções de 200 ppm polímero em três concentrações de areia BC.....	147

Figura 5.3.2.1.24 – $J = f(v)$ para a condição crítica de sedimentação para soluções de 400 ppm polímero em duas concentrações de areia BC.....	147
Figura 5.3.2.1.25 – $J = f(v)$ para a condição crítica de sedimentação para soluções de 1200 ppm polímero em duas concentrações de areia BC.....	147
Figura 5.3.2.1.26 – $J = f(v)$ para cerca de 5%, 10%, e 15% de areia BC em 100 ppm de polímero.....	148
Figura 5.3.2.1.27 – $J = f(v)$ para cerca de 5%, 10%, e 15% de areia BC em 200 ppm de polímero.....	148
Figura 5.3.2.1.28 – $J = f(v)$ para cerca de 5%, 10%, e 15% de areia em 400 ppm de polímero.....	149
Figura 5.3.2.1.29 – $J = f(v)$ para cerca de 10%, e 15% de areia BC em 1200 ppm de polímero.....	149
Figura 5.3.2.1.30 – $J = f(v)$ na degradação de 200 ppm com cerca de 5% de areia BC, após 16 horas em repouso.....	152
Figura 5.3.2.1.31 – $J = f(v)$ na degradação de 400 ppm com cerca de 5% de areia BC, após 69,5 horas em repouso.....	152
Figura 5.3.2.1.32 – $J = f(v)$ na degradação de 400 ppm com cerca de 10% de areia BC, após 22 horas em repouso.....	152
Figura 5.3.2.1.33 – $J = f(v)$ na degradação de 400 ppm com cerca de 15% de areia BC, após 65,5 horas em repouso.....	153

Figura 5.3.2.1.34 – $J = f(v)$ na degradação de 1200 ppm com cerca de 15% de areia BC, após 30 minutos em bombeamento.....	153
Figura 5.3.2.1.35 – $J = f(v)$ na degradação de 1200 ppm com cerca de 15% de areia BC, após 16 e 42 horas em repouso.....	154
Figura 5.3.2.1.36 – $J = f(v)$ na degradação de 1200 ppm com cerca de 15% de areia BC, após 59 horas em repouso e 1,5 h em bombeamento e após 82,5 h em repouso e 1,5 h em bombeamento.....	154
Figura 5.3.2.1.37 – $J = f(v)$ na degradação de uma mesma solução de 1200 ppm de polímero com cerca de 15% de areia BC. Composição das Figuras 5.3.2.1.34, 5.3.2.1.35 e 5.3.2.1.36.....	155
Figura 5.3.2.1.38 – $u^+ = f(y^+)$ para fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC, medidas experimentalmente com tubo de Pitot.....	157
Figura 5.3.2.1.39 – $u^+ = f(y^+)$ para fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC, medidas experimentalmente com tubo de Pitot.....	158
Figura 5.3.2.1.40 – $u^+ = f(y^+)$ para fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC, medidas experimentalmente com tubo de Pitot.....	158
Figura 5.3.2.1.41 – $u^+ = f(y^+)$ para fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC, medidas experimentalmente com tubo de Pitot.....	158
Figura 5.3.2.1.42 – $u^+ = f(y^+)$ para fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC, medidas experimentalmente com tubo de Pitot.....	159
Figura 5.3.2.1.43 – $u^+ = f(y^+)$ para fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC, medidas experimentalmente com tubo de Pitot.....	160

Figura 5.3.2.1.44 – $u^+ = f(y^+)$ para fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC, medidas experimentalmente com tubo de Pitot.....	160
Figura 5.4.2.1 – Acréscimos percentuais relativos da perda de carga ao elevar a concentração da mistura.....	164
Figura 5.4.2.2 – Perda de carga em função da velocidade média e da concentração média do sólido na mistura. Curvas ajustadas.....	165
Figura 5.4.2.3: Perda de carga em função da velocidade crítica de sedimentação para a areia A.....	165
Figura 5.4.2.4: Velocidade crítica de sedimentação em função da concentração do sólido da mistura (areia A).....	166
Figura 5.4.2.5: Perda de carga em função da velocidade crítica para a areia A.....	166
Figura 5.4.2.6: Velocidade crítica em função da conc. do sólido da mistura (areia A).....	167
Figura 5.4.3.1: Perda de carga em função da velocidade crítica de sedimentação (AREIA A).....	171
Figura 5.4.3.2: Perda de carga, referente à velocidade crítica de	

sedimentação, em função da concentração (AREIA BC).....	171
Figura 5.4.3.3: Perda de carga em função da velocidade. crítica de (AREIA BC).....	172
Figura 5.4.3.4: Perda de carga, referente à velocidade crítica, em função da concentração (AREIA BC).....	172
Figura 5.4.3.5: Velocidade crítica de sedimentação em função da concentração do sólido na mistura (AREIA BC).....	173
Figura 5.4.3.6: Velocidade crítica de em função da concentração do sólido na mistura (AREIA BC).....	173
Figura 5.4.3.7: Perda de carga em função da velocidade e da concentração do sólido da mistura (AREIA BC).....	174
Figura 5.4.3.8 – Acréscimos percentuais relativos da perda de carga ao elevar a concentração da mistura.....	174
Figura 5.4.4.1: Comparação .entre as perdas. de carga. Provocadas. por escoamentos de misturas constituídas pelas areias A ($d_{50}=1,30\text{mm}$)e AB ($d_{50} =$ $0,20\text{mm}$) mantendo-se a mesma concentração de 2% em volume da mistura.....	176

Figura 5.4.4.2: Comparação. entre .as. perdas. de. carga. provocadas. por escoamentos de misturas constituídas pelas areias A ($d_{50}=1,30\text{mm}$) e AB ($d_{50}=0,20\text{mm}$) mantendo-se a mesma concentração de 5% em volume da mistura.....	177
Figura 5.4.4.3: Comparação. entre. as. perdas. de. carga .provocadas. por escoamentos de misturas constituídas pelas areias A ($d_{50}=1,30\text{mm}$) e AB ($d_{50}=0,20\text{mm}$) mantendo-se a mesma concentração de 10% em volume da mistura.....	177
Figura 5.4.4.4: Relação. entre. as. perdas. de. carga.. provocadas ..por escoamentos de misturas constituídas pelas areias A ($d_{50}=1,30\text{mm}$) e AB ($d_{50}=0,20\text{mm}$) para as três concentrações.....	178
Figura 5.4.4.5: Influencia do tamanho do grão da fase sólida da mistura na velocidade crítica de sedimentação.....	178
Figura 5.4.4.6: Influencia do tamanho do grão da fase sólida da mistura na velocidade crítica.....	179
Figura 5.4.5.1: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento da solução de água-polímero de concentração igual a 100 ppm.....	182

Figura 5.4.5.2: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento da solução de água-polímero de concentração igual a 400 ppm.....	182
Figura 5.4.5.3: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento da solução de água-polímero de concentração igual a 600 ppm.....	183
Figura 5.4.5.4: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento da solução de água-polímero para as três concentrações de polímero.....	183
Figura 5.4.5.5: Valores médios das reduções da perda de carga expressas em diferenças percentuais relativas em função da concentração do polímero.....	184
Figura 5.4.6.1.1: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 2%), e polímero, (conc.. de 100 ppm).....	186
Figura 5.4.6.1.2: Perda de carga unitária em função da velocidade de fluxo de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 2%), e polímero, (C_p de 400 ppm). ..	187
Figura 5.4.6.1.3: Perda de carga unitária em função da velocidade de	

fluxo de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 2%), e
polímero, (C_p de 0, 100, e 400 ppm).....187

Figura 5.4.6.2.1: Perda de carga unitária em função da velocidade de
escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de
5%), e polímero, (conc.. de 100 ppm).....190

Figura 5.4.6.2.2: Perda de carga unitária em função da velocidade de
escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de
5%), e polímero, (conc.. de 200 ppm).....191

Figura 5.4.6.2.3: Perda de carga unitária em função da velocidade de
escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de
5%), e polímero, (conc.. de 400 ppm).....191

Figura 5.4.6.2.4: Perda de carga unitária em função da velocidade .
de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de
5%), e polímero, (concentração de 0, 100, 200, e 400 ppm).....192

Figura 5.4.6.3.1: Perda de carga unitária em função da velocidade
de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de
10%), e polímero, (conc.. de 100 ppm).....195

Figura 5.4.6.3.2: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 10%), e polímero, (conc.. de 200 ppm).....	195

Figura 5.4.6.3.3: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 10%), e polímero, (conc.. de 400 ppm).....	196

Figura 5.4.6.3.4: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 10%), e polímero, (concentração de 0, 100, 200, e 400 ppm).....	196

Figura 5.4.6.4.1: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 15%), e polímero, (conc.. de 100 ppm).....	199

Figura 5.4.6.4.2: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 15%), e polímero, (conc.. de 200 ppm).....	200

Figura 5.4.6.4.3: Perda de carga unitária em função da velocidade	

de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 15%), e polímero, (conc.. de 400 ppm).....	200

Figura 5.4.6.4.4: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 15%), e polímero, (concentração de 0, 100, 200, e 400 ppm).....	201

Figura 5.4.6.5.1: Perda de carga devido ao escoamento de mistura de água+areia BC de concentração igual a 7,2% em volume da mistura.....	205

Figura 5.4.6.5.2: Perda de carga devido ao escoamento de mistura de água+areia BC de concentração igual a 14% em volume da mistura.....	205

Figura 5.4.6.5.3: Comparação entre as perdas de carga devido ao escoamento de misturas de água-areia BC de concentrações 7,2%, e 14%, em volume da mistura, sem polímero.....	206

Figura 5.4.6.5.4: Perda de carga devido ao escoamento de solução de água+areia BC de concentração igual a 7,2% em volume da mistura, e polímero a 1200 ppm.....	206

Figura 5.4.6.5.5: Perda de carga devido ao escoamento de solução de água+areia BC de concentração igual a 14% em volume da mistura, e polímero a 1200 ppm.....	207

Figura 5.4.6.5.6: Comparação entre as perdas de carga devido ao escoamento de misturas de água-areia BC de concentrações 7,2%, e 14%, em volume da mistura com polímero a 1200 ppm.....207

Figura 5.4.6.5.7: Comparação entre as perdas de carga devido ao escoamento de mistura de água-areia BC de concentração 7,2%, em volume da mistura, sem e com polímero a 1200ppm.....208

Figura 5.4.6.5.8: Comparação entre as perdas de carga devido ao escoamento de mistura de água-areia BC de concentração 14%, em volume da mistura, sem e com polímero a 1200ppm.....208

Figura 5.4.6.6.1: Perda de carga devido ao escoamento de mistura de água+areia BC de concentração igual a 8,1% em volume da mistura.....211

Figura 5.4.6.6.2: Perda de carga devido ao escoamento de mistura de água+areia BC de concentração igual a 8,1% em volume da mistura, com polímero a 600 ppm.....211

Figura 5.4.6.6.3: Comparação entre as perdas de carga devido ao escoamento de mistura de água-areia BC de concentração 8,1%, em volume da mistura, sem e com polímero a 600ppm.....212

Figura 5.4.6.7.1: Velocidade crítica de sedimentação em função da concentração do sólido da mistura para a concentração do polímero de 100 ppm.....	216
Figura 5.4.6.7.2: Perda de carga, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, em função da concentração do sólido da mistura para a concentração do polímero de 100 ppm.....	217
Figura 5.4.6.7.3: Velocidade crítica de sedimentação em função da concentração do sólido da mistura para a concentração do polímero de 200 ppm.....	217
Figura 5.4.6.7.4: Perda de carga, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, em função da concentração do sólido da mistura para a concentração do polímero de 200 ppm.....	218
Figura 5.4.6.7.5: Velocidade crítica de sedimentação em função da concentração do sólido da mistura para a concentração do polímero de 400 ppm.....	218
Figura 5.4.6.7.6: Perda de carga, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, em função da concentração do sólido da mistura para a concentração do polímero de 400 ppm.....	219
Figura 5.4.6.7.7: Velocidade crítica de sedimentação em função da concentração do sólido da mistura para a concentrações do polímero de 600, e 800 ppm.....	219
Figura 5.4.6.7.8: Velocidade crítica de sedimentação em função das concentrações do sólido da mistura e do polímero.....	220
Figura 5.4.6.7.9: Perda de carga, referente à velocidade crítica de sedimentação, em função das concentrações do sólido da mistura e do polímero.....	220
Figura 5.4.6.8.1: Velocidade crítica em função das concentrações do sólido	

e do polímero.....	224
Figura 4.2.6.8.2: Perda de carga unitária, referente à velocidade crítica, em função das concentrações do sólido e do polímero.....	225
Figura 5.4.6.9.1: Velocidade crítica de sedimentação em função da concentração do sólido e da concentração do polímero.....	227
Figura 5.4.6.9.2: Perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, em função da concentração do sólido e da concentração do polímero.....	228
Figura 5.4.6.9.3: Reduções da perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, devido a adição do polímero.....	228
Figura 5.4.6.10.1: Velocidade crítica em função da concentração do sólido e da concentração do polímero.....	231
Figura 5.4.6.10.2: Perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica, em função da concentração do sólido e da concentração do polímero.....	231
Figura 5.4.6.10.3: Redução da perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica, em função da concentração do sólido e da concentração do polímero.....	232

Figura 5.5.1 – Velocidade crítica de sedimentação de água e areia BC, em função de concentração.....	233
Figura 5.5.2 - Velocidade crítica de sedimentação de água e areia A, em função de concentração.....	234
Figura 5.5.3 – Correlações de velocidade crítica de sedimentação de areia BC em comparação com valores experimentais	236
Figura 5.5.4 – Correlações de velocidade crítica de sedimentação de areia A em comparação com valores experimentais	236
Figura 5.5.5 – Comparação entre a velocidade crítica de sedimentação experimental de fluxo de areia BC em água, com a correlação de Oroskar & Turian para d_{90} e d_{99}	241
Figura 5.5.2.1 – Velocidade crítica de sedimentação por diminuição e por aumento da velocidade.....	242
Figura 5.5.3.1.1 – Perda de carga em função da velocidade de escoamento de mistura água-areia preparada à varias concentrações (areia BC com $d_{50}=0,20$ mm).....	248
Figura 5.5.3.1.2 – Perda de caga em função da velocidade de escoamento de mistura água-areia-polímero preparada à várias concentrações (areia BC com $d_{50}=0,20$ mm).....	248
Figura 5.5.3.1.3 – Perda de caga em função da velocidade de escoamento de mistura água-areia-polímero preparada à várias concentrações (areia BC com $d_{50}=0,20$ mm).....	249
Figura 5.5.3.1.4 – Reduções da velocidade crítica e da perda de carga devido à adição de polímero em escoamento de mistura (água - areia) à 10% em volume da mistura.....	249

Figura 5.5.3.1.5 – Reduções da velocidade crítica e da perda de carga devido à adição de polímero em escoamento de mistura (água - areia) à 15% em volume da mistura..... 250

Figura 5.2.1.5 – Valores de J (m/m) em função de velocidade média do fluxo e da concentração média (areia BC) ajustados aos valores interpolados e experimentais. Indicação do ajuste à velocidade crítica de sedimentação obtida experimentalmente.....252

Figura 5.5.4.1 – Valores de J (m/m) em função de velocidade média do fluxo e da concentração média (areia BC) obtidos do programa FORTRAN. Valores de velocidade crítica de sedimentação obtidos do programa. E funções polinomiais de ajuste.....252

Figura 5.2.2.4 – Valores de J (m/m) em função de velocidade média do fluxo e da concentração média (areia A) ajustados aos valores interpolados e experimentais. Indicação do ajuste à velocidade crítica de sedimentação obtida experimentalmente.....253

Figura 5.5.4.2 – Valores de J (m/m) em função de velocidade média do fluxo e da concentração média (areia A) obtidos do programa FORTRAN. Valores de velocidade crítica de sedimentação obtidos do programa. E funções polinomiais de ajuste.....253

Figura 5.6.1.1 - Fator de atrito de Fanning em função da velocidade para tubo novo (Água 1) e após ensaios com areia BC (Água 2) e areia A (Água 3).....255

Figura 5.6.1.2 - Equação do fator de atrito de Fanning para tubo novo (Água 1) e após ensaios com areia BC (Água 2) e areia A (Água 3).....255

Figura 5.6.2.1.- Fator de atrito de Fanning em função da velocidade para fluxo de areia BC em água em concentrações iguais a 2%, 5%, 10% e 15%.....257

Figura 5.6.3.1 - Fator de atrito de Fanning em função da velocidade média para fluxo de areia A em água, em concentração de 2%, 5% e 10%.....257

Figura 5.6.4.1 – Fator de atrito de Fanning em função da velocidade média do fluxo de solução de polímero a 100 ppm, 200 ppm e 400 ppm.....	258
Figura 5.6.4.2 – Fator de atrito de Fanning em função da velocidade média do fluxo para 100 ppm de polímero e concentrações aproximadas de areia BC iguais a 5% e 15%.....	259
Figura 5.6.4.3 – Fator de atrito de Fanning em função da velocidade média do fluxo para 400 ppm de polímero e concentrações aproximadas de areia BC iguais a 5% e 15%.....	259
Figura 5.7.1 – Distribuição vertical de velocidade pontual de fluxo de água e areia BC, de fluxo de água e areia A e de fluxo de 100 ppm de polímero com areia BC, em vazão e em concentração de areia aproximadamente iguais.....	260
Figura 5.7.2 – Distribuição vertical de velocidade pontual de fluxo de água e areia BC, de fluxo de água e areia A e de fluxo de 100 ppm de polímero com areia BC, em vazão e em concentração de areia aproximadamente iguais.....	261
Figura 5.7.3 – Distribuição vertical de velocidade pontual de fluxo de água e areia BC, de fluxo de água e areia A e de fluxo de 400 ppm de polímero com areia BC, em velocidade crítica de sedimentação, para concentrações médias aproximadas.....	263
Figura 5.7.4 – Distribuição vertical de velocidade pontual de fluxo de água e areia BC e de fluxo de 200 ppm de polímero com areia BC, em velocidade crítica de sedimentação, para concentrações médias aproximadas.....	264
Figura 5.7.5 – Distribuição vertical de velocidade pontual de fluxo de água e areia BC e de fluxo de 400 ppm de polímero com areia BC, em velocidade crítica de sedimentação, para concentrações médias aproximadas.....	265
Figura 5.7.6 – Distribuição vertical de velocidade pontual de fluxo de água e areia	

BC e de fluxo de 400 ppm de polímero com areia BC, em vazão e em concentração de areia aproximadas.....	265
Figura 5.8.1.1 – Distribuição vertical de velocidade pontual adimensional obtido para fluxo médio de 557,1 l/min de mistura de água e areia BC à concentração volumétrica de 4,34%.....	268
Figura 5.8.1.2 – Ajuste logarítmico aos pontos E, F e G.....	269
Figura 5.8.1.3 – Ajuste linear aos pontos G, H e I.....	270
Figura 5.8.1.4 – Relação entre kks, C_v e vazão média.....	271
Figura 5.8.1.5 – Influência da concentração média de areia BC sobre kls.....	272
Figura 5.8.1.6 – Influência da vazão média de areia BC sobre os valores kls.....	272
Figura 5.8.1.7 – Valores de kls para C_v maiores que 14,7% de areia BC.....	273
Figura 5.8.3.1 – Perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ para vazão e concentração aproximadas no escoamento heterogêneo de areias A e BC em água e em solução de 100 ppm de polímero.....	277
Figura 5.8.3.2 - Perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ para vazão e concentração aproximadas no escoamento heterogêneo de areias A e BC em água e em solução de 100 ppm de polímero.....	277
Figura 5.8.3.3 - Perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ para a condição de velocidade crítica de sedimentação de areias A e BC em água e em solução de 400 ppm de polímero.....	278

Figura 5.8.3.4 - Perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ para vazão e concentração aproximadas na condição de velocidade crítica de sedimentação de areia BC em água e em solução de 200 ppm de polímero.....	279
Figura 5.8.3.5 - Perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ para vazão e concentração aproximadas na condição de velocidade crítica de sedimentação de areia BC em água e em solução de 400 ppm de polímero.....	279
Figura 5.8.3.6 - Perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ para vazão e concentração aproximadas no escoamento heterogêneo de areia BC em água e em solução de 400 ppm de polímero.....	280
Figura 5.8.4.1 – Fator de correção $x_x = f(k_s/\delta)$ da distribuição logarítmica de velocidade de Einstein (1950).....	281
Figura 5.8.4.2 – $u^+ = f(\log(30,2 y/\Delta))$ no escoamento heterogêneo de água e areia BC em diversas concentrações médias.....	282
Figura 5.8.4.3 - $u^+ = f(\log(30,2 y/\Delta))$ na condição de velocidade crítica de sedimentação para fluxo de água e areia BC em diversas concentrações médias.....	282
Figura 5.8.4.4 - $u^+ = f(30,2 y/\Delta)$ para concentração média de areia BC superior a 15% no escoamento heterogêneo. Fluxo de 807,6 l/min e na condição de velocidade crítica de sedimentação.....	283
Figura 5.9.1 – Distribuição vertical de concentração pontual para concentração média praticamente igual (4,2% a 4,6%) de areia BC em água e crescentes vazões médias.....	284
Figura 5.9.2 – Distribuição vertical de concentração pontual para concentração aproximada de 9,5% de areia BC em água e vazões médias alta e na condição de	

crítica de sedimentação.....284

Figura 5.9.3 – Distribuição vertical de concentração pontual para concentração média praticamente igual (8,7% a 9,0%) de areia BC em água e crescentes vazões médias.....284

Figura 5.9.4 – Distribuição vertical de concentração pontual para a velocidade crítica de sedimentação de areia BC em água em concentração média volumétrica variada de 2,5% a 9,6%.....285

Figura 5.9.5 – Distribuição vertical de concentração pontual para o escoamento heterogêneo de areia BC em água em concentração média volumétrica variada de 4,3% a 14,6%.....285

Figura 5.9.6 – Equação de Rouse na velocidade crítica de sedimentação e 9,6% de areia BC em água.....289

Figura 5.9.7 – Equação de Rouse no escoamento heterogêneo 757,2 l/min e 11,8% de areia BC em água. Com correção nos valores de velocidade de sedimentação w devido à concentração.....290

Figura 5.9.8 – Equação de Rouse no escoamento com leito de sedimentos e 9,0% de areia BC em água.....290

Figura 5.9.9 – Valores de β em função de y/D obtidos da distribuição de concentração pontual para $Q = 571,5$ l/min e $C_v = 9,6\%$ de areia BC em água.....290

Figura 5.9.10 – Valores de β em função de y/D obtidos da distribuição de concentração pontual para $Q = 757,2$ l/min e $C_v = 11,8\%$ de areia BC em água.....291

Figura 5.9.11 – Valores de β em função de y/D obtidos para a distribuição de concentração pontual onde $Q = 488,2$ l/min e $C_v = 9,0\%$ de areia BC em água.....292

Figura 5.9.12- Distribuição vertical de concentração experimental para $Q = 769,4 \text{ l/min}$ e $C_v = 6,1\%$ e $C_{vp} = 100 \text{ ppm}$. Distribuição teórica de Rouse sem e com correção em w	294
Figura 5.9.13 – Valores de β em função de y/D obtidos para a distribuição de concentração pontual onde $Q = 769,4 \text{ l/min}$ e $C_v = 6,1\%$ de areia BC em $C_{vp} = 100 \text{ ppm}$	295
Figura 5.9.14 - Distribuição vertical de 4,3% de concentração média de areia BC em água e em 400 ppm de polímero, na velocidade crítica de sedimentação.....	295
Figura 5.9.15 - Distribuição vertical de 10,0% de concentração média aproximada de areia BC em água ($Q = 768,8 \text{ l/min}$) e em 100 ppm de polímero (787,5 l/min).....	296
Figura 5.9.16 - Distribuição vertical de 4,3% de concentração média aproximada de areia BC em água ($Q = 766,4 \text{ l/min}$) e em 100 ppm de polímero (858,8 l/min).....	297
Figura 5.9.17 - Distribuição vertical de 9,0% de concentração média aproximada de areia BC em água ($Q = 816,9 \text{ l/min}$) e em 100 ppm de polímero (827,1 l/min).....	297
Figura 5.9.18 – Valores de β de escoamento de 400 ppm de polímero para $Q = 504,9 \text{ l/min}$, $C_v = 4,3\%$ e para $Q = 827,1 \text{ l/min}$, $C_v = 9,2\%$ de areia BC.....	298
Figura 5.9.19 – Valores de β para a condição de velocidade crítica, $C_v = 4,3 \%$ de areia BC, sem e com 400 ppm de polímero.....	299
Figura 5.9.20 - Valores de β para vazão e concentração aproximadas de areia BC, em escoamento heterogêneo, sem e com 400 ppm de polímero.....	299
Figura 5.9.21a – Aplicação de valor constante de $\beta = 0,175$ à equação de Rouse, além da correção em w , devido à concentração.....	301

Figura 5.9.21b– Aplicação de valor constante de $\beta = 0,2$ à equação de Rouse, além da correção em w , devido à concentração.....	301
Figura 5.9.22 – Aplicação de valor constante de $\beta = 0,175$ à equação de Rouse, além da correção em w , devido à concentração.....	302
Figura 5.9.23 – Aplicação de valor constante de $\beta = 0,2$ à equação de Rouse, além da correção em w , devido à concentração.....	302
Figura 5.9.24 – Aplicação de valor constante de $\beta = 0,2$ à equação de Rouse, além da correção em w , devido à concentração.....	302
Figura 5.10.1 – Lei da diferença de velocidade para todos os testes de Água 1. Valores experimentais de Pitot sem fator de correção.....	304
Figura 5.10.2 – Lei da diferença de velocidade para todos os testes de Água 2. Valores experimentais de Pitot sem fator de correção.....	305
Figura 5.10.3 – Lei da diferença de velocidade para todos os testes de Água 3. Valores experimentais de Pitot sem fator de correção.....	305
Figura 5.10.4 – Lei da diferença de velocidade para todos os testes de Água 1. Valores experimentais de Pitot sem fator de correção. Ajuste polinomial.....	306
Figura 5.10.5 – Lei da diferença de velocidade para todos os testes de Água 2. Valores experimentais de Pitot sem fator de correção. Ajuste polinomial.....	306
Figura 5.10.6 – Lei da diferença de velocidade para todos os testes de Água 3. Valores experimentais de Pitot sem fator de correção. Ajuste polinomial.....	307
Figura 5.10.2.1 Lei de diferença de velocidade para fluxo de água e areia BC.....	308

Figura 5.10.3.1 – Lei de diferença de velocidade para escoamento de areia BC em concentração aproximada de 15,3% e vazões no escoamento heterogêneo.....	309
Figura 5.10.3.1 – Lei da diferença de velocidade para fluxo água e areia A.....	309
Figura 5.10.3.2 – Lei de diferença de velocidade para concentração aproximada de 1,0% de areia A.....	309
Figura A2.1 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.....	349
Figura A2.2 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.....	349
Figura A2.2 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.....	350
Figura A2.4 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.....	350
Figura A2.5 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.....	351
Figura A2.6 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.....	351
Figura A2.7 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.....	352
Figura A2.8 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.....	352
Figura A2.9 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.....	353
Figura A2.10 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia A.....	353
Figura A2.11 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia A.....	354

Figura A2.12 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia A.....	354
Figura A2.13 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia A.....	355
Figura A3.1 – Distribuição vertical de velocidades para água e areia BC, com leito de sedimentos.....	357
Figura A3.2 – Distribuição vertical de velocidades para água e areia BC, escoamento heterogêneo.....	357
Figura A3.3 – Distribuição vertical de velocidades para água e areia BC, escoamento heterogêneo, condição de velocidade crítica de sedimentação.....	358
Figura A3.4 – Distribuição vertical de velocidades para água e areia BC, escoamento heterogêneo.....	358
Figura A3.5 – Distribuição vertical de velocidades para água e areia BC, para concentração média aproximada de 8,8% de areia BC.....	359
Figura A4.1 – Distribuição de concentração pontual de água e areia BC.....	361
Figura A4.2 – Distribuição de concentração pontual de água e areia BC.....	362
Figura A4.3 – Distribuição de concentração pontual de água e areia BC.....	363
Figura A4.4 – Distribuição de concentração pontual de água e areia BC.....	364
Figura A4.5 Distribuição vertical de concentração e de velocidade pontuais no tubo para fluxo de solução de polímero e areia BC.....	365
Figura A4.6 Distribuição vertical de concentração e de velocidade pontuais no tubo para fluxo de solução de polímero e areia BC.....	366
..	
Figura A4.7 Distribuição vertical de concentração e de velocidade pontuais no tubo para fluxo de solução de polímero e areia BC.....	367
Figura A4.8 Distribuição vertical de concentração e de velocidade pontuais	

no tubo para fluxo de solução de polímero e areia BC.....	368
Figura A5.1 – Tensão de cisalhamento em função do gradiente de velocidade para 100, 200, 300, 400, 800, e 1200 ppm de polímero à 15°C.....	370
Figura A5.2 – Tensão de cisalhamento em função do gradiente de velocidade para 100, 200, 300, 400, 800, e 1200 ppm de polímero à 30°C.....	370
Figura A5.3 – Tensão de cisalhamento em função do gradiente de velocidade para 100, 200, 300, 400, 800, e 1200 ppm de polímero à 45°C.....	371
Figura A5.4 – Tensão de cisalhamento em função do gradiente de velocidade para 100, 200, 300, 400, 800, e 1200 ppm de polímero à 60°C.....	371
Figura A5.5 – Viscosidade em função da temperatura para 100, 200, 300, 400, 800, e 1200 ppm de polímero.....	372

LISTA DE FOTOS

Foto 4.1 – Vista da bancada de ensaios.....	75
Foto 4.2 - Vista do trecho transparente de acrílico e do tubo de Pitot.....	75
Foto 4.3 - Vista da bomba principal.....	76
Foto 4.4 - Vista do trecho de PVC com três polegadas de diâmetro.....	76
Foto 4.5 – Vista do sistema de aquisição de dados.....	77
Foto 4.6 – Vista dos transdutores de pressão.....	77
Foto 4.7 - Vista da bombas misturadoras 1 e 2 e da bomba de retorno.....	78
Foto 4.8 - Vista do tubo de Pitot.....	78
Foto 4. 9 – Vista do medidor de vazão eletromagnético.....	82
Foto 4.10 – Vista da central de aquisição de dados.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1.5.1 – Configuração do número de regime.....	41
Tabela 3.1 - Resumo de dados experimentais de máxima redução de arraste. Segundo VIRK (1970).....	51
Tabela 3.2 - Condições experimentais dos perfis adimensionais de velocidade média. Segundo VIRK (1970).....	57
Tabela 3.3 - Valores médios de Δy_s^+ , A e B em função da concentração de HEC em água à temperatura de 20° Celsius.....	63
Tabela 3.4 - Valores médios de Δy_s^+ , A e B em função da temperatura para PEO em água e concentração $C_w=0,0001$	64
Tabela 4.1 – Tabela de erro relativo em d_{rm} para areia BC.....	93
Tabela 4.2– Tabela de erro relativo em d_{rm} para areia A.....	93
Tabela 4.3 – Valor da densidade relativa da areia BC.....	94
Tabela 4.4 – Valor da densidade relativa da areia A.....	94
Tabela 4.5 - Erro relativo no cálculo da concentração média (areia BC).....	95
Tabela 4.6 - Erro relativo no cálculo da concentração média (areia A).....	95

Tabela 4.7 – Erro relativo na concentração pontual (areia BC).....	96

Tabela 5.4.1 – Acréscimos em termos de diferenças percentuais	

relativas em função da concentração do sólido da mistura.....	164

Tabela 5.4.2 – Acréscimos em termos de diferenças percentuais	

relativas em função da concentração do sólido da mistura.....	170

Tabela 5.4.3 : Relação entre a perda de carga devido ao escoamento de mistura constituída com a areia A e a perda de carga devido ao escoamento	

de mistura constituída com a areia AB.....	176

Tabela 5.4.4: Reduções expressas em diferenças percentuais	

relativas em função da velocidade de escoamento e da concentração	

do polímero.....	181

Tabela 5.4.5: Reduções expressas em diferenças percentuais	

relativas em função da velocidade de escoamento e da concentração	

do polímero.....	185

Tabela 5.4.6: Velocidades crítica de sedimentação, e crítica, (areia BC a 2%).....	186

Tabela 5.4.7: Reduções expressas em diferenças percentuais relativas em	

função da velocidade de escoamento e da concentração do polímero.....	189
Tabela 5.4.8: Velocidades crítica de sedimentação, e crítica, (areia BC a 5%).....	190
Tabela 5.4.9: Reduções expressas em diferenças percentuais relativas em função da velocidade de escoamento e da concentração do polímero.....	194
Tabela 5.4.10: Velocidades crítica de sedimentação, e crítica, (areia BC a 10%).....	194
Tabela 5.4.11: Reduções expressas em diferenças percentuais relativas em função da velocidade de escoamento e da concentração do polímero.....	198
Tabela 5.4.12: Velocidades crítica de sedimentação, e crítica, (areia BC a 15%).....	199
Tabela 5.4.13 : Acréscimos nas perdas de carga ao dobrar a concentração do sólido de 7,2% para 14%, com e sem polímero a 1200 ppm.....	203
Tabela 5.4.14: Reduções nas perdas de carga ao adicionar o polímero a 1200 ppm.....	204
Tabela 5.4.15: Velocidades crítica de sedimentação, e crítica, sem e com polímero a 1200 ppm (areia BC a 7,2%, e 14%).	204

Tabela 5.4.16: Reduções nas perdas de carga ao adicionar o polímero a 600 ppm.....	210
Tabela 5.4.17: Velocidades crítica de sedimentação, e crítica, sem e com polímero a 600 ppm (areia BC a 8,1%).	210
Tabela 5.4.18: Equações da velocidade crítica de sedimentação e da correspondente perda de carga em função da concentração do sólido da mistura para diferentes concentrações de polímero.....	213
Tabela 5.4.19: Equações da velocidade crítica e da correspondente perda de carga em função da concentração do sólido da mistura para diferentes concentrações de polímero.....	221
Tabela 5.4.20: Redução da velocidade crítica de sedimentação devido ao polímero.....	226
Tabela 5.4.21: Redução da perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, devido ao polímero.....	227
Tabela 5.4.22: Redução da velocidade crítica devido ao polímero.....	229
Tabela 5.4.23: Redução da perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica, devido ao polímero.....	230

Tabela 5.5.1 – Valores de J (m/m) obtidos das equações de THOMAS(1963 e 1964).....	239
Tabela 5.5.3.1.1 - Diferenças relativas percentuais (V^*) e (J^*) em função da concentração do polímero.....	246
Tabela 5.8.1.1- Valores de k_{ks} e k_{ls} para C_v menores que 14,7% de areia BC.....	271
Tabela 5.8.1.2- Valores de k_{ls} para concentrações maiores que 14,7% de areia BC.....	273
Tabela 5.9.1 – Valores de β para escoamento de água e areia BC.....	292

RESUMO

Apresentam-se os resultados de uma investigação experimental sobre o efeito de uma poliacrilamida aniônica solúvel em água nas velocidades crítica e crítica de sedimentação e em outros parâmetros hidráulicos do escoamento sólido-líquido.

Os experimentos foram realizados com água-areia e com solução de polímero-areia, em concentração volumétrica de sólidos de cerca de 2%, 5%, 10% e 15%. As soluções de polímero foram utilizadas desde 100 ppm até 1200 ppm.

Os resultados experimentais mostraram que existe uma distinção entre a velocidade crítica (a velocidade correspondente à mínima perda de energia) e a velocidade crítica de sedimentação (velocidade identificada pelo aparecimento de uma camada de partículas estacionárias ou em deslizamento). Discute-se a diferença entre as velocidades.

Discute-se o efeito da adição de polímero aos perfis de concentração e de velocidade, medidos com tubo de Pitot.

Investigou-se a degradação por repouso no reservatório, ou por envelhecimento, da solução de polímero com e sem areia.

O trabalho contém revisão bibliográfica (sobre conceitos básicos de hidrotransporte de sólidos, velocidade crítica, velocidade crítica de sedimentação, transporte de suspensões de polímeros e alguns modelos reológicos); descrição dos materiais e métodos utilizados; os resultados e conclusões e recomendações e sugestões para continuidade da pesquisa.

1 - INTRODUÇÃO

Atualmente, o transporte de sólidos em líquidos, através de dutos, é encontrado em múltiplas modalidades de aplicações. Dutos relativamente curtos são muito utilizados em transportes hidráulicos de resíduos finos na metalurgia, na dragagem de areias e cascalhos e nas operações de mineração de metais. Encontram-se aplicações ainda nas áreas de irrigação, tratamento de esgoto, engenharia de alimentos, indústria farmacêutica e extintores de incêndio.

Linhas de dutos de transporte de longas distâncias, tem sido construídas nos últimos anos. Uma das maiores linhas existentes é a de Black Mesa no Arizona. Segundo WASP et ali (1977), possui extensão de 273 milhas , 18 polegadas de diâmetro, transporta carvão consumindo 1,5 MkW até o Rio Colorado, e foi projetado para transportar anualmente 6 Mega toneladas.

Atualmente, no Brasil, encontramos a mais longa linha de tubulações para hidrotransporte de minério de ferro do mundo (396 km). Ela interliga a usina de mineração Samarco, e a usina de trituração no terminal marítimo da costa Atlântica situada em Ponta do Ubú. Transporta por ano 8 milhões de toneladas de suspensão de minério com 68% de ferro à velocidade de 1,5 m/s, e possui máxima elevação acima do nível do mar igual a 1180 m.

Diversas são as linhas de transporte de carvão, de aço concentrado, de cobre concentrado e de calcário existentes no mundo, como um resultado do comportamento geral de misturas sólido- líquidas em dutos ter sido objeto de muitas pesquisas desde o início do século.

De acordo com GOVIER & AZIZ (1972), a teoria sobre este tipo de mistura desenvolveu-se e embora todos os problemas não sejam explicados por análise teórica, já é possível compreender e prever a maioria dos fenômenos.

Fatores favoráveis ao transporte de sedimentos por dutovias são o baixo custo do transporte, a ocupação mínima do solo, a ausência de poluição ambiental, o menor

investimento inicial (menor desapropriação), vence acidentes geográficos inacessíveis aos transportes ferroviário e rodoviário (e quando possível, o faz através de caminhos mais curtos), e a operação não é afetada pela condição do tempo.

Na revisão bibliográfica verificou-se a viabilidade de estudos e experimentos sobre a velocidade crítica, e a influência de polímeros sobre seus valores.

Adicionalmente verificou-se a necessidade de aprofundamentos sobre as distribuições de velocidade e concentração no escoamento heterogêneo e na velocidade crítica de sedimentação para meios dispersantes de variadas densidades e viscosidades. Dessa forma optou-se pelo polímero em variadas concentrações como meio dispersante, que além de proporcionar variadas densidades e viscosidades, apresenta redução de arraste.

Diversas são as aplicações práticas envolvendo algum tipo de transporte de suspensões sólido-líquidas, com ou sem adição de polímero. Espera-se contribuir para que este tipo de transporte torne-se cada vez mais difundido, utilizado e eficiente.

Uma das aplicações práticas do uso de polímeros como redutores de energia dissipada pelo escoamento turbulento, vem sendo aceito e utilizado em sistemas de bombeamento sujeitos a sobrecargas ocasionais em estações de tratamento de esgotos domésticos e resíduos industriais. Estes sistemas geralmente são dimensionados para uma descarga média. Nas horas de sobrecarga, a adição de polímeros aumenta a capacidade do sistema sem necessidade de aumento energético.

A aplicação de polímeros prolonga os anos de operação de instalações de recalque existentes dimensionadas para descargas médias limitadas. Nestes casos o emprego de polímeros economiza investimentos em ampliações dos sistemas. Há ainda casos em que soluções econômicas são procuradas, de forma que o custo do polímero empregado seja inferior ao valor da energia economizada.

O transporte hidráulico de sólidos a longas distâncias é uma das modalidades de transporte mais econômicas. Este tipo de transporte com adição de polímeros apresenta reduções consideráveis no consumo energético.

O melhor conhecimento da velocidade crítica e da velocidade crítica de sedimentação de suspensões heterogêneas, possibilita maior confiança no desenvolvimento de projetos hidráulicos nas diversas modalidades de aplicação e interesse.

2 - OBJETIVOS

O mecanismo de redução de arraste através da adição de polímeros, é atualmente objeto de diversas pesquisas por se tratar de fenômeno ainda não totalmente compreendido, quantificado e de extrema complexidade.

A principal finalidade das pesquisas atuais sobre o uso de polímeros, refere-se à economia de consumo energético devido à redução do arraste. Assim, a adição de polímeros encontra aplicação no transporte de sedimentos.

Partículas de diversos tipos, tamanhos e formas, normalmente objetos de transporte turbulento em água, têm seu comportamento modificado em suspensão de polímero. Como consequência, ocorrem alterações nas variações de pressão, na velocidade crítica, nos perfis de velocidade e de concentração. Constitui portanto o trabalho das seguintes pesquisas:

1 - Relação entre a velocidade crítica de sedimentação e a velocidade crítica de mínima energia dissipada considerando as variações: da descarga líquida, da concentração dos sólidos, da granulometria da partícula sólida e concentrações.

2 - Influência do polímero na velocidade crítica de sedimentação e na velocidade crítica de escoamentos bifásicos (sólido- líquido), através de quantificações experimentais e correlacionamento dos dados. As misturas bifásicas são constituídas de duas areias de granulometria variada e diferentes entre si (uma fina e outra grossa), dispersas em água. Em soluções de polímero, a mistura constitui-se de areia fina.

3 – Variação do fator de atrito de Fanning em escoamentos bifásicos, constituídos de água e areia com e sem adição de polímero.

4 - Distribuição de velocidade e concentração ao longo de uma vertical, no escoamento heterogêneo, de suspensões de água e areia e suspensões de água, areia e polímero.

Quantificações experimentais e teóricas fornecem subsídios para generalizações e/ou correlações, e/ou interpretações dos dados obtidos.

5 - Quantificação da diferença relativa da velocidade crítica de sedimentação (velocidade correspondente ao início da formação do leito estacionário de sedimentos), com e sem adição de polímero.

6 - Caracterização da perda de carga e a degradação do polímero devido ao escoamento, e por envelhecimento, com e sem a presença da areia no transporte.

7 - Dados reológicos, parâmetros de distribuição de tamanhos e de sedimentação das partículas, fatores de importância em desenvolvimentos de projetos hidráulicos de partículas sólidas, também são quantificados afim de fornecerem subsídios aos fenômenos em interesse.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica abordam-se propriedades do transporte horizontal de sedimentos, do transporte de suspensões de polímeros e alguns modelos reológicos.

3.1 - TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

A área de transporte de sedimentos assume em geral, caráter tão amplo que aborda o transporte não só de partículas uniformes de densidade maior que da fase fluida, mas partículas de todos os tamanhos, densidades e fases da matéria dispersas em fluidos de diversas densidades e nas diversas fases da matéria. Inclui também os diversos tipos de escoamento, que de modo geral podem ser classificados como: escoamento livre (canais) e escoamento forçado (dutos sob pressão).

De modo particularizado, neste trabalho, realiza-se uma revisão bibliográfica voltada para o transporte em tubulações horizontais de suspensões sólido- líquidas.

São abordados principalmente os seguintes aspectos do escoamento: perda de carga, distribuição de velocidades e distribuição de concentrações. Estes aspectos são tratados em relação às velocidades crítica e crítica de sedimentação e também em relação a outras velocidades nos regimes turbulento e com leito estacionário.

3.1.1 FLUXO HORIZONTAL DE SUSPENSÕES SÓLIDO-LÍQUIDAS EM DUTOS SOB PRESSÃO.

A seguir apresentam-se alguns conceitos básicos sobre o transporte de fluidos limpos e de suspensões, os escoamentos padrões existentes em transporte horizontal de



misturas sólido- líquidas, definições de velocidade crítica, uma descrição de correlações sobre velocidade crítica e pesquisas gerais referentes ao transporte de sedimentos.

Posteriormente são abordadas as suspensões de polímeros e alguns aspectos sobre a reologia de fluidos não Newtonianas.

3.1.2 - Conceitos básicos de hidrotransporte de sólidos

Em hidrotransporte de sólidos, a abordagem e a pesquisa de escoamentos através de linhas horizontais, diferencia-se do tratamento dado às linhas verticais. Nas linhas verticais, os sólidos são facilmente transportados porque a velocidade de sedimentação (velocidade terminal) da partícula sólida é geralmente muito menor que as velocidades médias do transporte. Nas linhas horizontais, a não sedimentação das partículas sólidas depende da turbulência do escoamento, portanto em baixa velocidade média de escoamento, forma-se o leito de sedimentos ao longo da tubulação causando maior consumo energético para um mesmo volume de sólidos transportados, e em velocidade menor ainda, existe a possibilidade de obstrução total da tubulação

O presente trabalho de pesquisa, particularmente trata do hidrotransporte de sólidos por dutos horizontais, assim abordam-se a seguir, aspectos gerais do escoamento turbulento de fluidos.

No desenvolvimento de teorias sobre o escoamento turbulento de fluidos, diversas são as pesquisas existentes baseadas na bem conhecida teoria cinética dos gases. Isto se deve ao fato de que os movimentos de larga escala dos elementos fluidos na turbulência, são análogos ao movimento aleatório das moléculas em gases. Desta forma os efeitos do comprimento de mistura, análogo ao caminho livre médio no movimento molecular, tem sido intensamente pesquisado.

De acordo com WASP et al (1977), a teoria de PRANDTL é a mais simples e fornece boas concordâncias com resultados experimentais.

Em WASP et al (1977) encontra-se uma definição para o comprimento de mistura (l), ou seja, é considerado como sendo a distância média percorrida por um elemento de fluido sem perder suas propriedades originais (por exemplo velocidade), e para distâncias maiores que o comprimento de mistura, o elemento de fluido se mistura com suas vizinhanças.

SCHLICHTING (1972) apresenta as deduções de PRANDTL para a tensão de cisalhamento turbulento representada na Equação 3.1 e também conhecida como fórmula do comprimento de mistura de PRANDTL.

$$\tau = \rho l^2 \frac{du}{dy} \left| \frac{du}{dy} \right| \quad (3.1)$$

Comparando esta equação com a lei de viscosidade de Newton, obtém-se a viscosidade de vórtices ou viscosidade de atrito turbulento $E = \rho l^2 \left| \frac{du}{dy} \right|$.

SMOLDYREV (1982) fornece as seguintes explicações: Forças de cisalhamento são essencialmente viscosas mas entretanto se considerarmos a média de velocidades em uma corrente turbulenta, a troca de momento entre as camadas do escoamento médio pode ser representada como viscosidade turbulenta ou atrito turbulento. Em problemas de engenharia, essas forças são encontradas como cargas continuamente distribuídas portanto pode-se utilizar o conceito de tensão de uma força. A tensão de forças de corpo inclui o peso volumétrico e inercial de uma unidade de volume. A tensão de forças normais à superfície inclui as forças resultantes da viscosidade e da pressão. No escoamento viscoso (ou laminar) as tensões de atrito cisalhante são determinadas pela equação de Newton, enquanto para escoamentos totalmente desenvolvidos de um fluido, a tensão de cisalhamento viscoso é muito pequena em comparação à tensão de atrito de cisalhamento turbulento e pode ser desprezada.

Na equação 3.1, utilizando a definição de velocidade de atrito $u^* = (\tau/\rho)^{1/2}$ e a hipótese de que próximo à parede seja válida a relação $l = \kappa y$, obtém-se a Equação 3.2.

$$du/dy = u^* / \kappa y \quad (3.2)$$

Desta Equação surgiu a lei universal de PRANDTL para a distribuição de velocidade pontual de fluidos homogêneos, também conhecida como lei da diferença de velocidade (“law of deficiency” ou “defect law”) representada na Equação 3.3.

$$(u_{\max} - u) / u^* = (1/\kappa) \log (R/y) \quad (3.3)$$

Esta Equação, WASP et al (1977) representam de modo geral pela forma apresentada na Equação 3.3a.

$$(u_{\max} - u) / u^* = f(R/y) \quad (3.3a)$$

De acordo com WASP et al (1977), a lei da diferença de velocidade descreve o perfil de velocidade independentemente de rugosidade, diâmetro do tubo, etc, e cobre toda a camada limite, embora a natureza exata da função f ainda não seja conhecida.

Da integração da Equação 3.2, surgiu a lei de distribuição de velocidade junto à parede e para tubos lisos e tem a forma representada na Equação 3.4. Esta lei também é conhecida como lei Newtoniana de distribuição de velocidades junto à parede.

$$u^+ = (1/\kappa) \ln y^+ + K_a \quad (3.4)$$

onde $u^+ = u/u^*$ (3.4a)

$$y^+ = u^* y / \nu \quad (3.4b)$$

Porém a equação 3.4 só é válida para o centro turbulento e para altos valores de números de Reynolds e é dependente de rugosidade do tubo, do diâmetro do duto e da velocidade média do escoamento. Medidas experimentais comprovaram uma pequena dependência do comprimento de mistura com o número de Reynolds e que o comprimento de mistura é válido fora da camada limite.

Os valores atualmente aceitos das constantes da equação 3.4 para a água em tubos lisos e em turbulência, são: $(1/\kappa) = 2,5$ e $K_a = 5,5$.

De acordo com CEBECI & SMITH (1974), a espessura da subcamada viscosa varia aproximadamente de 0,1% a 1% da espessura total da camada limite. A distribuição de velocidade média na subcamada viscosa pode ser obtida da tensão total de cisalhamento dada por: $\tau = \mu \cdot du/dy - \rho u'v'$. Como a tensão de cisalhamento nesta região é aproximadamente constante, tem-se: $\nu \cdot du/dy - u'v' = \tau / \rho = (u^*)^2$.

Para a subcamada viscosa reduz-se a: $\nu \cdot du/dy = (u^*)^2$. Integrando esta equação e expressando em parâmetros adimensionais se obtém para y^+ menor que aproximadamente 5:

$$u^+ = y^+ \quad (3.4c)$$

A Equação 3.3, integrada para toda a seção transversal, para a velocidade média resulta na Equação 3.5.

$$u_m = u_{max} - 3,75 u^* \quad (3.5)$$

Da Equação 3.5 , da lei de distribuição de velocidades junto à parede e da definição do fator de atrito $f = 8 \tau / \rho u_m^2$, ou seja, $f = 8 (u^*/u_m)^2$, foi deduzida a lei universal de resistência de PRANDTL para tubos lisos e fluidos homogêneos, que depois de ter os seus coeficientes ajustados para valores medidos experimentalmente está representada pela Equação 3.6. Segundo SCHLICHTING (1972), esta equação está comprovada até números de Reynolds $3,4.10^6$ através de medidas efetuadas por NIKURADSE e por confirmações posteriores.

$$1/(f_D)^{1/2} = 2,0 \log (u_m D f_D^{1/2} / \nu) - 0,8 \quad (3.6)$$

Outra lei conhecida de resistência de fluidos homogêneos para dutos circulares e lisos é a lei de resistência de BLASIUS, representada pela Equação 3.7. Ela é válida para Re até 10^5 .

$$f = 0,3164 (u_m D/\nu)^{1/4} \quad (3.7)$$

Após Blasius diversas outras funções foram obtidas para a determinação de f , seja para tubos lisos como para tubos rugosos.

Considerando o mecanismo pelo qual as partículas se mantêm em suspensão em uma corrente turbulenta, O'BRIEN(1935), apud WASP et al (1977), postulou que a taxa de transferência ascendente de partículas devido à turbulência se iguala às forças gravitacionais descendentes. A Equação 3.8 representa as considerações de O'BRIEN(1935).

$$E_s (dC/dy) + w C = 0 \quad (3.8)$$

E_s é o coeficiente de transferência de massa em fluidos com partículas sólidas.

Por analogia nos fenômenos, de transferência de momento em fluidos limpos e transferência de massa em fluidos com partículas, espera-se que E_m seja igual a E_s . E_m é o coeficiente de transferência de momento para fluidos homogêneos e se relaciona com a viscosidade de vórtices ou atrito turbulento (E) por: $E_m = E/\rho$.

WASP et al(1977) observam que segundo von KARMAN, os dois coeficientes tem a mesma forma, enquanto outros autores tem demonstrado que eles não são iguais, mas produzem uma relação constante da seguinte forma: $E_s = \beta E_m$. Onde β é uma constante de proporcionalidade.

VANONI (1946), pela utilização da Equação 3.8 e da equação generalizada de tensão de cisalhamento em toda a seção do canal $\tau_y = \tau (1 - y/y_m)$ deduziu a relação de concentração entre dois pontos C/C_A onde A é um ponto arbitrário de altura a. Obteve a relação representada na Equação 3.9.

$$C/C_A = (a(y_m - y) / (y_m - a)y)^z \quad (3.9)$$

onde $z = w / \beta \kappa u^*$ (3.9a)

ISMAIL (1952), apud WASP et al (1977), realizou experimentos em canais fechados em três pontos da seção e obteve a Equação 3.10, a concordância entre os valores calculados e observados foi excelente e demonstrou a confiança do processo para aplicações em projetos de dutovias.

$$\log (C/C_A) = - (1,8 w / \beta \kappa u^*) \quad (3.10)$$

HSU et al (1971) apresentaram uma aproximação mais rigorosa ao problema de distribuição de concentração em dutos circulares. Empregaram coordenadas polares de acordo com a Figura 3.1, obtendo a seguinte Equação 3.11.

$$C(r,\theta) / C(0,0) = \exp [w/u^* (r \cos\alpha \cos\theta / r_0 m)] \quad (3.11)$$

onde $m = E_s / r_0 u^*$, e α é o ângulo com a horizontal.

Observa-se nas Equações 3.9a, 3.10 e 3.11 o aparecimento da relação w/u^* .

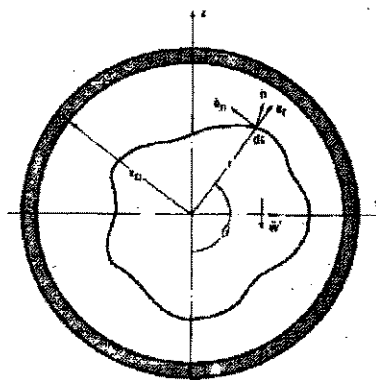


Figura 3.1 - Quadro de definição para o sistema de coordenadas polares.

3.1.3 - Escoamentos padrões no transporte de sedimentos

Os escoamentos padrões de fluxos horizontais de misturas sólido- líquidas podem ser identificados por observações visuais. CHIEN, SZE-FOO (1994), descreve os escoamentos padrões através da Figura 3.2. Em velocidades baixas, as partículas sólidas ocupam o fundo do duto formando um leito estacionário (Figura 3.2a). Nesta situação não há movimento de

sólidos no duto. Com o aumento da velocidade do fluido, as partículas da camada superior do leito estacionário, começam a se mover com o fluido (Figura 3.2b e 3.2c). Aumentando ainda mais a velocidade do fluido, o leito estacionário começa a se movimentar por saltitações ou por dunas. Algumas partículas começam a entrar em suspensão na corrente do fluido (Figuras 3.2d e 3.2e). Conforme aumenta a velocidade, a concentração de sólidos na corrente móvel aumenta. Adicional aumento de velocidade, causa a suspensão de todas as partículas na corrente (Figuras 3.2f e 3.2g). Na condição da Figura 3.2g, os sólidos estão completamente suspensos na corrente e o fluido se aproxima de uma suspensão homogênea.

Além da observação visual, existem outras formas de identificação dos escoamentos padrões.

BLATCH (1906), apud CHIEN, SZE-FOO (1994), observou em fluxos de esferas de vidro, a existência de uma velocidade média de escoamento na qual a perda de carga é mínima.

THOMAS (1964) identificou quatro regimes de escoamento em **suspensões diluídas** e apresentou um diagrama para sua determinação, o qual será descrito a seguir: Iniciando com a menor velocidade do fluido e com um leito estacionário de partículas, os regimes de escoamento seguintes numerados de 1 a 4, podem ser identificados por aumento da velocidade do fluxo:

Regime 1- Disposição periódica do material no fundo do duto, ondas transversais como dunas, com aparência de montes discretos ou ilhas de partículas, quando observadas em dutos circulares. As ondas movimentam-se ao longo do fundo do duto, na direção do escoamento e tem um reproduzível comprimento de onda, altura e velocidade.

Regime 2- Ondas longitudinais (tiras ou estrias de partículas sedimentadas) embora pouco estáveis, com dimensões de cerca de $0,1D$ de largura e $1D$ a $3D$ de comprimento na direção do escoamento (D = diâmetro do duto).

Regime 3- Escoamento heterogêneo cujo limite inferior é dado pela condição de mínimo transporte (ou velocidade crítica, ou velocidade média do fluxo necessária para prevenir a formação de um leito estacionário ou partículas deslizantes no fundo do duto). A velocidade mínima de transporte é comumente identificada pelo valor mínimo na curva de perda de carga unitária versus velocidade.

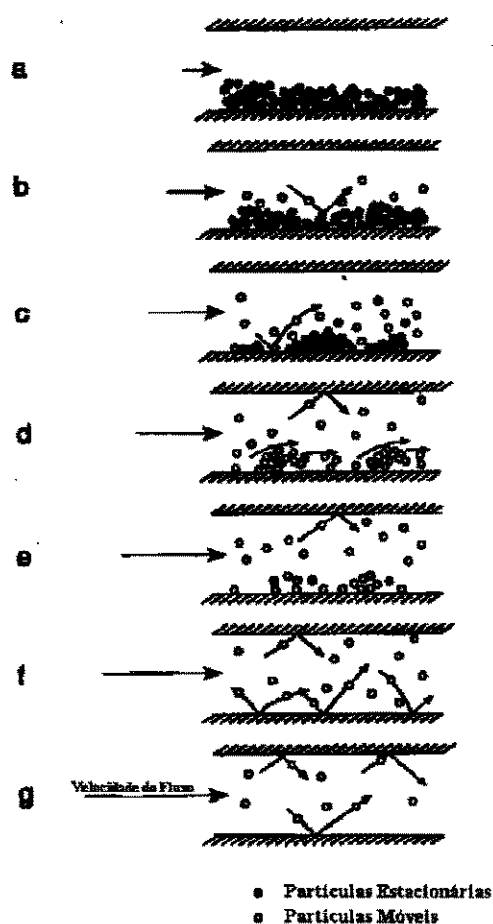


Figura 3.2- Escoamentos padrões de partículas de areia em duto horizontal

Regime 4- Escoamento totalmente suspenso, no qual o material particulado encontra-se uniforme e homogeneamente distribuído por toda a seção transversal do duto horizontal. A transição para este regime tem todas as probabilidades de não poder ser identificada na prática porque é aproximadamente exponencial.

No Regime 3, escoamento heterogêneo, observamos que THOMAS (1964), considera iguais as velocidades crítica e crítica de sedimentação para suspensões diluídas (pequenas concentrações de sólidos) e a determina experimentalmente através de aumento de velocidade do fluxo.

Para CONDOLIOS & CHAPUS (1963) é importante o conhecimento da velocidade crítica de deposição, porque ela distingue, os regimes de deposição e de não deposição, que

são muito diferentes entre si quando observados nas curvas de perda de carga em função da velocidade, além disso, ela também representa o ponto econômico de operação para uma determinada concentração. Para estes autores, a velocidade crítica foi determinada de duas formas diferentes. Por direta observação do instante em que as primeiras partículas se depositam no duto e por cuidadosa observação da formação do leito estacionário no duto durante o regime de deposição.

Dos testes realizados concluíram que a partir do momento em que as partículas começam a depositar-se e o leito estacionário recomeça a se reconstruir (o volume escoado é reduzido) e a velocidade do líquido (V_L) na parte livre do duto aumenta e se ajusta de modo que $V_C/(gD)^{1/2} = V_L/(4gR_h)^{1/2}$. Nestas circunstâncias, a velocidade sobre o depósito representa a velocidade crítica de deposição em um duto com nova área de seção transversal.

Observa-se que THOMAS aumenta a velocidade do fluxo para classificar os regimes de escoamento, enquanto CONDOLIOS & CHAPUS diminuem a velocidade do fluxo para definir a velocidade crítica de deposição.

GAESSLER (1967), observou que a fração volumétrica de sólidos transportada pela corrente móvel aumentava com a velocidade do fluido. Quando todos os sólidos se encontram em suspensão, a fração volumétrica de sólidos na corrente (C_{v1}), se iguala à fração volumétrica na entrada do duto (C_v). Assim o autor descreveu quantitativamente os escoamentos padrões pela relação C_{v1}/C_v . Valores de C_{v1}/C_v próximos de 1,0 indicam suspensão simétrica, de 0,7 a ~1,0 tem-se suspensão assimétrica, de 0,2 a 0,7 tem-se leito móvel com suspensão assimétrica, de ~0 a 0,2 tem-se leito estacionário com suspensão assimétrica e quando $C_{v1}/C_v \sim 0$, o duto está bloqueado.

GOVIER & AZIZ (1972) combinaram as sugestões de BLATCH e GAESSLER na construção de uma relação do gradiente de velocidade como se observa na Figura 3.3. Observa-se nesta Figura 3.3, os escoamentos padrões de sólidos e quatro velocidades de transição. Segundo GOVIER & AZIZ (1972), embora haja alguma confusão na descrição e variações em interpretação, parece que atualmente se estabelece que a velocidade crítica de sedimentação V_{M2} coincide com a velocidade de mínima perda de carga e se refere ao início da formação de um leito móvel.

Na Figura 3.3, segundo GOVIER & AZIZ (1972), V_{M1} é a velocidade de transição entre os escoamentos homogêneo e heterogêneo; V_{M3} é a de transição entre os escoamento com leito estacionário e leito móvel e V_{M4} é a transição entre o leito estacionário e o bloqueio total do tubo. A velocidade V_{M4} é raramente atingida em reais medições.

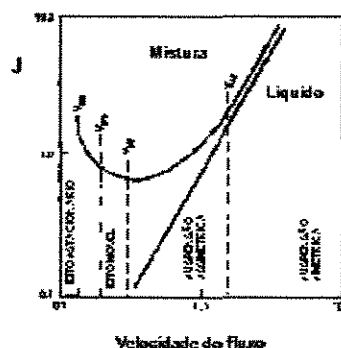


Figura 3.3- Típica relação entre gradiente de pressão e velocidade.

3.1.4 - Definições de Velocidade Crítica (ou velocidade mínima de transporte) e de Velocidade Limite de Sedimentação (ou velocidade crítica de sedimentação)

As denominações **velocidade crítica** (V_C , V_D , V_{M2}) e **velocidade mínima de transporte** serão igualmente utilizadas neste trabalho e referem-se à velocidade de mínima perda de carga.

Outras denominações utilizadas neste trabalho, **velocidade limite de sedimentação** ou **velocidade limite de deposição** ou **velocidade crítica de sedimentação** ou ainda **velocidade crítica de deposição** (V_{CS}), correspondem à velocidade de transição do escoamento heterogêneo ao escoamento com leito de sedimento.

Na literatura, as denominações, as definições e as identificações destas velocidades são vistas de diversos modos.

DURAND (1953) utiliza a denominação de **velocidade limite de deposição** como sendo a velocidade identificada pelo aparecimento de um regime de deposição no duto. As Figuras 3.3a e 3.3b representam o gradiente de pressão em mm/m em função da velocidade média do fluxo em m/s, obtidos por DURAND para duas areias de granulometria uniforme, respectivamente de 0,42 mm e 2,04 mm. As linhas indicadas por tracejados e pontilhados nas duas Figuras 3.3a e 3.3b, delimitam os regimes com e sem depósito no fundo do duto. Segundo DURAND (1953), a velocidade limite de deposição corresponde perfeitamente ao ponto de mínima perda de carga e portanto à mais favorável condição de operação do ponto de vista econômico e esta velocidade crítica é assim de grande interesse prático.

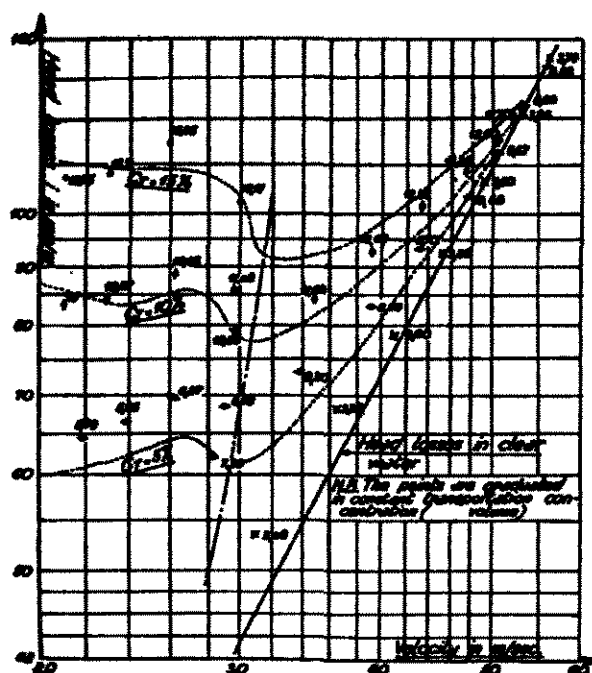


Figura 3.3a

Figura 3.3a - Perda de carga J (mm/m) em função de velocidade (m/s) de mistura água e areia ($d=0,42$ mm) em tubo de $D = 150$ mm. De DURAND (1953).

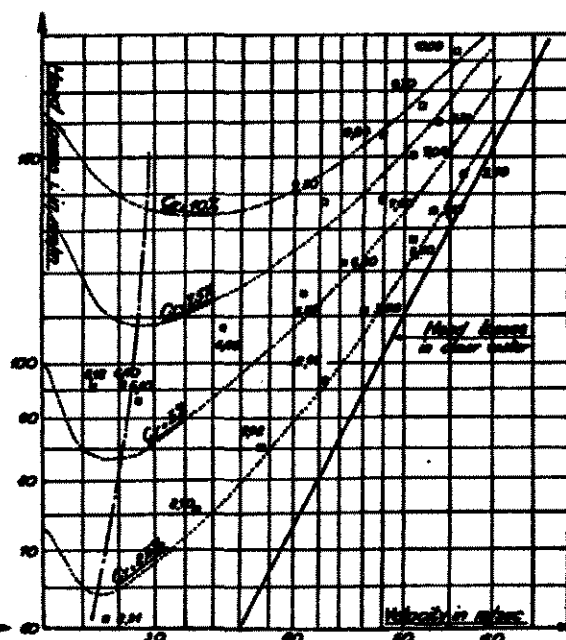


Figura 3.3b

Figura 3.3b - Perda de carga J (mm/m) em função de velocidade (m/s) de mistura água e areia ($d=2,04$ mm) em tubo de $D = 150$ mm. De DURAND (1953)

Um exame mais rigoroso das Figuras 3.3a e 3.3b levam à seguinte conclusão: para maiores concentrações, a velocidade limite de sedimentação encontra-se um pouco à esquerda da velocidade de mínima perda de carga.

BAIN & BONNINGTON (1970) descrevendo sobre os resultados obtidos por DURAND, CONDOLIOS e colegas no Laboratório de Hidráulica de Dauphinois, observa que a velocidade crítica de sedimentação torna-se praticamente constante em concentrações superiores a 15%. Observa também que a velocidade crítica é sempre maior que a velocidade crítica de sedimentação com exceção das menores concentrações e que este fato prova que o aumento na perda de carga associado às velocidades abaixo do valor crítico não são inteiramente devidos à obstrução do tubo pelo leito de sólidos.

Em VANONI (1977) encontra-se que a velocidade que distingue escoamento heterogêneo de escoamento com leito de sedimentos, algumas vezes referida como **velocidade crítica de sedimentação** não é única, e é dependente da situação de aumento ou diminuição de velocidade na passagem de um regime ao outro. De acordo com o autor, esta velocidade crítica é menor na diminuição de velocidade do que no aumento de velocidade, é dependente do estado de escoamento anterior (histerese hidráulica). VANONI (1977) ainda pondera que para propósitos práticos, pode-se assumir que há um único valor para a velocidade crítica.

Observou-se na literatura que um grande número de autores não faz distinção entre a **velocidade crítica** e a **velocidade crítica de sedimentação**, considerando-as como única, ou seja, a velocidade de menor perda de carga coincide com a velocidade de início de sedimentação. Isto deve muito provavelmente à conduta prática semelhante à de VANONI (1977).

Como se observará posteriormente, valores de velocidade crítica determinados experimentalmente e correlacionados por diferentes pesquisadores, fornecem geralmente valores que variam de uma pesquisa a outra. As diferenças podem ser decorrentes, além de outros fatores, da consideração de igualdade entre ambas as velocidades.

THOMAS (1962) denomina por **velocidade de mínimo transporte** à velocidade média do escoamento na qual uma camada de partículas estacionárias ou deslizantes aparecem no fundo do duto.

GRAF et al (1970) preferiram a denominação de **velocidade crítica de deposição**, para a velocidade na qual as partículas sólidas sedimentam-se e formam um leito estacionário.

LARRAS (1972) afirma que a passagem do escoamento com deposição para o escoamento sem deposição nem sempre passa pela mesma velocidade limite pois os fenômenos de erosão e de deposição não são sempre exatamente reversíveis, e que porém nada foi publicado de preciso até o presente sobre a questão.

OROSKAR & TURIAN (1980) denominam por **velocidade crítica** como a mínima velocidade que separa o escoamento com leito de sólidos no fundo do duto e o escoamento totalmente suspenso.

COIADO (1985) observou que para concentração de 12% as areias fina, 1 e 2 (d_{50} igual respectivamente a 0,225 mm, 0,650 mm e 1,20 mm) a velocidade crítica de sedimentação foi respectivamente maior, praticamente igual e menor do que a velocidade crítica. Para a menor partícula ($d_{50}=0,225$), a velocidade crítica de sedimentação foi sempre maior que a velocidade crítica, enquanto para as maiores partículas ($d_{50}=1,20$ e $d_{50}=0,650$), a velocidade crítica de sedimentação foi sempre menor que a velocidade crítica.

Torna-se interessante um maior esclarecimento e quantificação da diferença entre ambas as velocidades, uma vez que autores como GOVIER & AZIZ (1972), BAIN & BONNINGTON (1970), VANONI (1977) e LARRAS (1972) e COIADO (1985) já observaram a existência de controvérsias em suas definições.

WANI (1986) denomina por **velocidade crítica**, a velocidade média do escoamento requerida para prevenir a acumulação de uma camada de partículas estacionárias ou deslizantes no fundo do duto.

Neste parágrafo descrevem-se algumas observações de DARBY (1986). A curva de gradiente de pressão em função da velocidade exibe uma velocidade mínima que corresponde grosseiramente à fronteira entre os regimes heterogêneo e por saltitação (Para o autor, o regime por saltitação abrange os estados de leito móvel e de leito estacionário). Esta velocidade é denominada **velocidade de mínima deposição**, desde que se a velocidade for menor, os sólidos se depositarão no fundo do tubo. Esta característica geral foi observada em uma grande variedade de águas residuárias, embora uma análise exata e

medições quantitativas desta curva não foi encontrada. A complexidade do sistema aumenta conforme aumenta o grau de heterogeneidade do sistema e as respostas do sistema para análises diminuem em correspondência.

GILLIES & SHOOK (1991) desenvolveram uma correlação teórica para determinação da **velocidade de deposição** de suspensões aquosas. O coeficiente de correlação obtido em relação a valores experimentais foi $R^2 = 0,96$, a correlação obtida não deve ser utilizada fora do intervalo das condições experimentais estabelecidas, e segundo os autores, até que se torne disponível um método mecanístico para previsão da **velocidade crítica**, a correlação pode ser útil para cálculos de projetos. Entende-se que o autor refere-se à dificuldade de determinação exata da velocidade crítica de sedimentação quando ela se realiza por simples observação visual.

CHIEN, SZE-FOO (1994), utiliza a denominação **velocidade crítica** para a mínima velocidade do fluido requerida para prevenir a deposição ou acumulação de areias no duto horizontal, e também a define como a mínima velocidade de escoamento que assegura o movimento positivo das partículas sólidas. O autor refere-se apenas à pequenas concentrações médias de transporte, cerca de 2%.

THOMAS (1964), observa-se que a identificação da **velocidade crítica de sedimentação** pode ser realizada visualmente, e que a **velocidade crítica** como salienta é comumente identificada pelo mínimo valor na curva de perda de carga unitária em função da velocidade.

WOLFGANG, W. (1993) apresentou um modo novo de reconhecimento da velocidade crítica pelo uso de sensores “spark plug” para medição e monitoramento do movimento de material sólido no duto, e pela obtenção de um sinal de saída gerado quando o primeiro material repousa no duto. Utiliza também uma adaptação da idéia da tomografia computadorizada em combinação com as redes neurais no transporte hidráulico de sólidos através de dutos.

Observou-se que DURAND (1953), GRAF (1970), BAIN & BONNINGTON (1970) e VANONI (1977) especificam a **velocidade crítica de sedimentação** através da diminuição da velocidade do fluxo e por observação visual do início da sedimentação.

Porem VANONI (1977) observa que no caso de aumento de velocidade ela adota valores diferentes e maiores.

3.1.5 - Correlações e pesquisas diversas sobre a velocidade crítica e a velocidade crítica de sedimentação.

A operação de qualquer sistema hidráulico abaixo da velocidade crítica de sedimentação pode resultar em bloqueio da linha. Portanto a compreensão e o conhecimento 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 não 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-se velocidade 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** (w ou v_s), também conhecida como velocidade de deposição ou velocidade terminal em fluidos de dimensões infinitas e em repouso. A velocidade de sedimentação é resultado de um balanço entre o arraste viscoso e o 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), estabeleceu 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 3.12:

$$V_{cs} = \frac{(KSCgDV_s)^{1/3}}{1 + C(s - 1)} \quad (3.12)$$

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 3.13.

$$V_{cs} = F_L \sqrt{2gD(s - 1)} \quad (3.13)$$

Onde o valor de F_L é função da concentração volumétrica de sólidos e tamanho da partícula, e encontra-se representada na Figura 3.4.

Para concentrações volumétricas menores que 2%, o valor de F_L pode ser aproximado pela Equação 3.13a:

$$F_L = 2,853d^{0,143} \quad (3.13a)$$

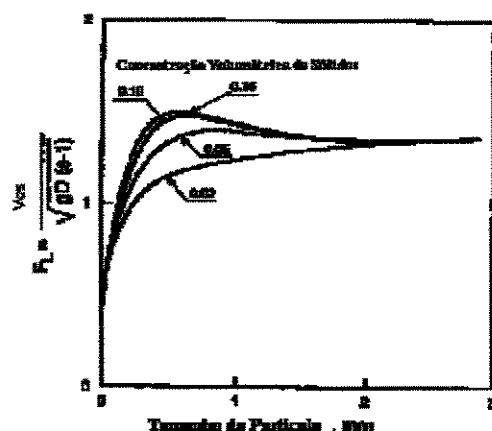


Figura 3.4- Valor de F_L da Correlação de Durand para grãos uniformes.

Pode-se observar na Figura 3.4 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 3.4b de DURAND & CONDOLIOS (1952) apud VANONI (1977).

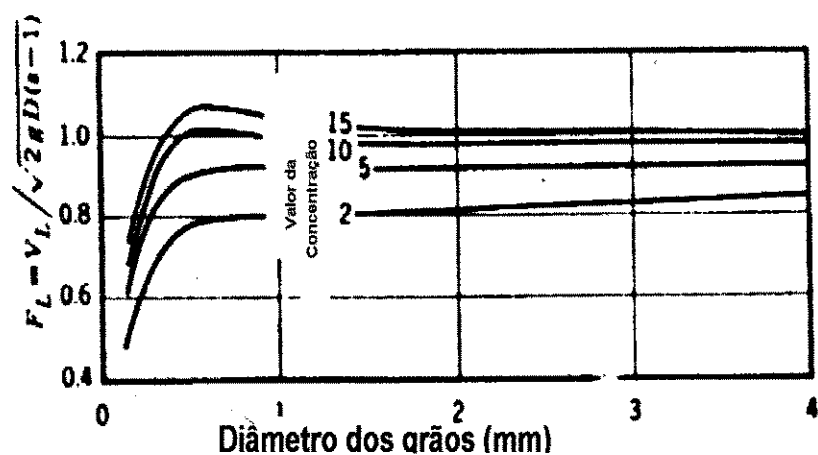


Figura 3.4b - Velocidade Limite de Sedimentação para material não uniforme de DURAND & CONDOLIOS apud VANONI (1977).

CAIRNS et al (1960), apud CHIEN SZE-FOO (1994), utilizaram partículas de 15 a 30 microns . Eles estabeleceram a correlação representada na Equação 3.14:

$$V_{M2} = 3,827 \left[gd(s-1)^{0,6} \left(\frac{DC\rho}{\mu} \right)^{0,3} \right]^{0,588} \quad (3.14)$$

Os valores de velocidade crítica obtidos são próximos aos de NEWITT dados por $17.V_s$.

SINCLAIR (1962), realizaram 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 3.15:

$$(V_{CS})_{\max} = 12,65 \left[\left(\frac{D}{d_{85}} \right)^{0,173} g d_{85} (s-1)^{0,8} \right]^{0,5} \quad (3.15)$$

O valor de $V_{M2}/V_{M2,\max}$ atingiu um valor máximo em uma certa concentração de sólidos como se pode observar na Figura 3.5.

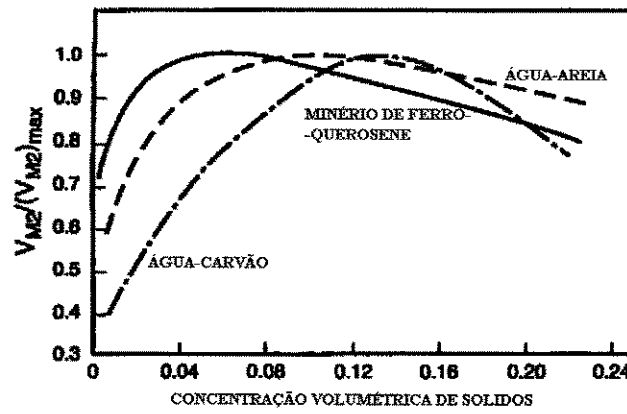


Figura 3.5- Relação entre $V_{M2}/V_{M2,\max}$ em função da concentração de entrada . Obtidos dos experimentos de SINCLAIR(1962).

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 $V_{M2}/V_{M2,\max}$ igual a aproximadamente 75%. Assim para suspensões aquosas com 2% de areia, a correlação obtida é representada na Equação 3.16. De acordo com CHIEN SZE-FOO(1994), os valores de SINCLAIR são relativamente menores comparados aos de outros autores.

$$V_{CS} = 9,49 \left[\left(\frac{D}{d_{85}} \right)^{0,173} g d_{85} (s-1)^{0,8} \right]^{0,5} \quad (3.16)$$

CONDOLIOS & CHAPUS (1963) plotaram $V_{cs}/(gD)^{0,5}$ em função da concentração de sólidos como se observa na Figura 3.6. Para concentração volumétrica menor que 2%, a velocidade crítica é dada pela Equação 3.17. De acordo com CHIEN SZE-FOO(1994), os seus resultados são comparáveis aos de WILSON e aos de CHARLES que será citado posteriormente.

$$V_{cs} = 3,0 C^{0,149} \sqrt{gD} \quad (3.17)$$

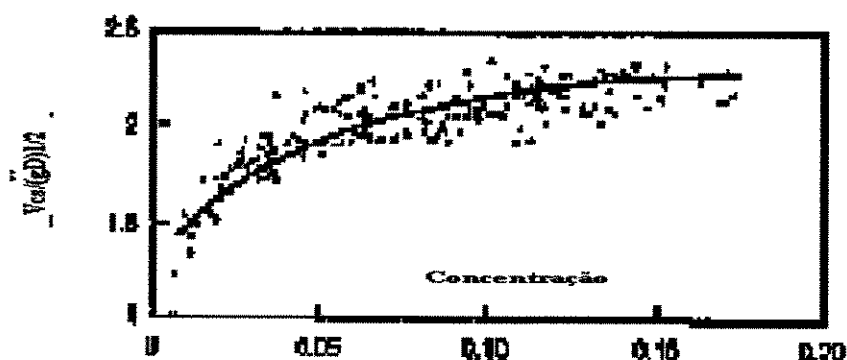


Figura 3.6- Correlação de velocidade crítica de sedimentação de CONDOLIOS & CHAPUS(1963).

YUFIN & LOPASIN (1966) apud CHIEN SZE-FOO (1994), desenvolveram uma correlação para a velocidade crítica para areia e cascalho de diâmetros maiores que 50 microns. Sua correlação é representada na Equação 3.18.

$$V_{M2} = 8,3 D^{1,3} C^{0,0417} \quad (3.18)$$

ZANDI & GOVATOS (1967) propuseram uma velocidade crítica usando mais do que 1000 dados experimentais coletados de 11 referências. A sua correlação é representada pela Equação 3.19.

$$V_{M2} = \left[\frac{40 C_g D (s-1)}{\sqrt{C_d}} \right]^{0,5} \quad (3.19)$$

BABCOCK (1968), apud CHIEN SZE-FOO (1994), apresentou uma correlação semelhante à de ZANDI & GOVATOS. Ela está representada na Equação 3.20. A velocidade crítica de BABCOCK é a metade da de ZANDI & GOVATOS.

$$V_{M2} = \left[\frac{10 C_g D (s-1)}{\sqrt{C_d}} \right]^{0,5} \quad (3.20)$$

SHOOK (1969) utilizou a correlação de perda de carga de DURAND e determinou a velocidade correspondente à mínima perda de carga e propôs a Equação 3.21. De acordo com CHIEN SZE-FOO(1994), para pequenas concentrações, os resultados de SHOOK são próximos aos de ZANDI & GOVATOS.

$$V_c = \frac{2,43 C^{1/3}}{C_d^{1/4}} [2 g D (s-1)]^{0,5} \quad (3.21)$$

BAIN & BONNINGTON (1970) propuseram a correlação dada na Equação 3.22.

$$V_{M2} = 3,48 C^{1/3} \left[\frac{gD(s-1)}{\sqrt{C_d}} \right]^{1/2} \quad (3.22)$$

CHARLES (1970), apud CHIEN SZE-FOO (1994), propuseram a correlação representada na Equação 3.23.

$$V_{M2} = \frac{4,8 C^{1/3} [gD(s-1)]^{1/2}}{C_d^{1/4} [1 + C(s-1)^{1/3}]} \quad (3.23)$$

GOVIER & AZIZ (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 3.24.

$$V_{M2} = 11,9 \frac{(V_s D)^{0,5}}{d^{0,25}} \quad (3.24)$$

THOMAS (1963 e 1964) publicou séries de artigos intitulados por Suspensões Não Newtonianas e também artigos sobre Características de Transporte de Suspensões. Parte destes seus trabalhos encontra-se representado nas Figuras 3.7a e 3.7b, o diagrama generalizado de fases no transporte de suspensões, aplicável à relação de densidades $(s-1) = 1,65$.

SOO (1967) afirma que pesquisas recentes sobre sedimentação, mostraram que o fator que mais afeta o escoamento vertical de sólidos suspensos em uma linha de corrente é a razão entre a velocidade terminal e a velocidade de atrito (relacionada ao grau de

turbulência). De acordo com SOO (1967), THOMAS baseou-se neste fator para representar a natureza do fluxo em torno de uma partícula quando ela se sedimenta no fundo do duto. Esta representação (Figuras 3.7a e 3.7b) de (w/u_0^*) versus $(u_0^* \rho d/\mu)$, onde u_0^* é a velocidade de atrito na condição de velocidade mínima de transporte, com nenhuma partícula deslizando no fundo do duto e no caso limite de diluição infinita. As linhas de números de Reynolds da partícula constantes, $(u_0^* \rho d/\mu)$ encontram-se representadas pelas retas tracejadas que dividem o diagrama em três intervalos. Estes intervalos referem-se às diferentes taxas de sedimentação:

$$\begin{array}{lll} N_{RE,p} < 1 & \text{-----} & \text{Lei de Stokes} \\ 1 < N_{RE,p} < 500 & \text{-----} & \text{Região de Transição} \\ N_{RE,p} > 500 & \text{-----} & \text{Lei de Newton} \end{array}$$

A linha constante $(w/u_0^*) = 0,2$ é do limite aproximado sugerido por DURAND, onde valores menores que 0,2 indicam suspensões em que a fase particulada é transportada substancialmente em suspensão e valores maiores que 0,2 indicam fase particulada transportada predominantemente em uma camada ao longo do fundo do duto.

Os quatro regimes de transporte de suspensões diluídas podem ser identificados como: α = ondas transversais, β = ondas longitudinais, γ = heterogêneo e ε = homogêneo. O início do regime α coincide com o início do movimento da partícula e é representado pela curva sólida que se estende da esquerda inferior à direita superior da Figura 3.7a. Esta curva é independente do diâmetro do duto. O fim do regime α e começo do regime β é também independente do diâmetro do duto mas agora requer um fator adicional para se considerar a densidade da partícula.

O diagrama também pode ser utilizado por observação do tamanho da partícula através da consideração da relação entre o diâmetro da partícula (d) e a espessura da subcamada laminar ou da camada interna. THOMAS aplicou as espessuras definidas por von Kármán e sendo $y^+ = y \rho u^*/\mu$, representou no diagrama estes três intervalos:

- $y^+ < 5$

----- subcamada laminar
- $5 < y^+ < 30$

----- camada interna
- $y^+ > 30$

----- centro turbulento

As curvas apresentadas na Figura 3.7a são para dutos de 1, 4 e 12 polegadas e para um valor de $(s-1) = 1,65$.

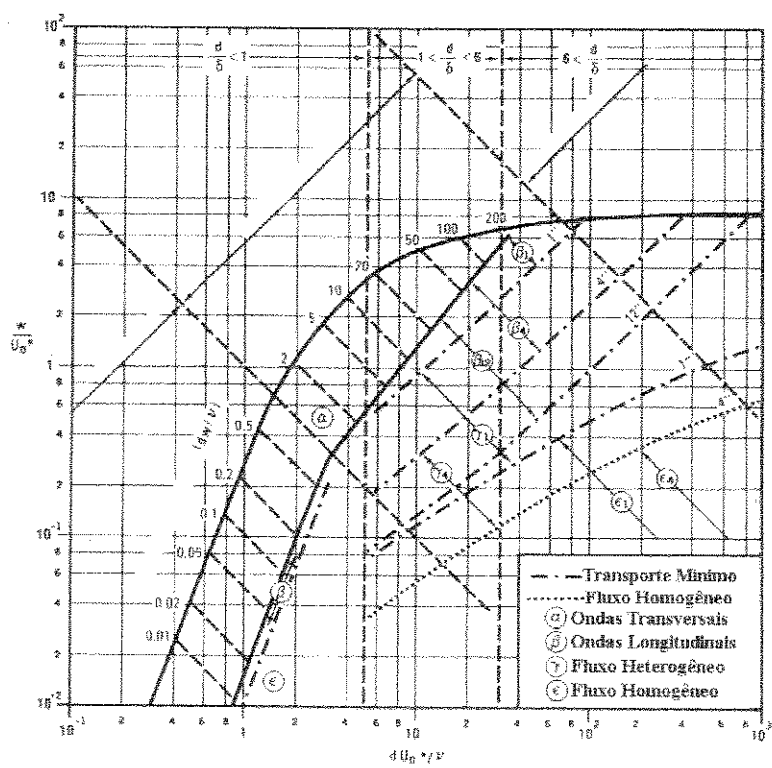


Figura 3.7a - Diagrama generalizado de fases para transporte de suspensões.

As fases β , γ , ϵ , aplica-se a $(s-1) = 1,65$.

A Figura 3.7b é semelhante à Figura 3.7a, porém com a indicação da linha constante ($w/u_0^* = 0,2$) e com as indicações dos regimes I e II.

Para escoamento no regime I, uma partícula no fundo do duto estará imersa na subcamada laminar, ou seja, a partícula tem dimensão menor que a subcamada laminar, pois ($du_0^*/\nu < 5$), e as partículas permanecem predominantemente em suspensão.

Para o regime II a partícula é maior que a subcamada laminar ($du_0^*/\nu > 5$) e o transporte ocorre principalmente com maiores concentrações de partículas, com sedimentação de acordo com os intervalos A,B e C dadas pelo número de Reynolds da partícula.

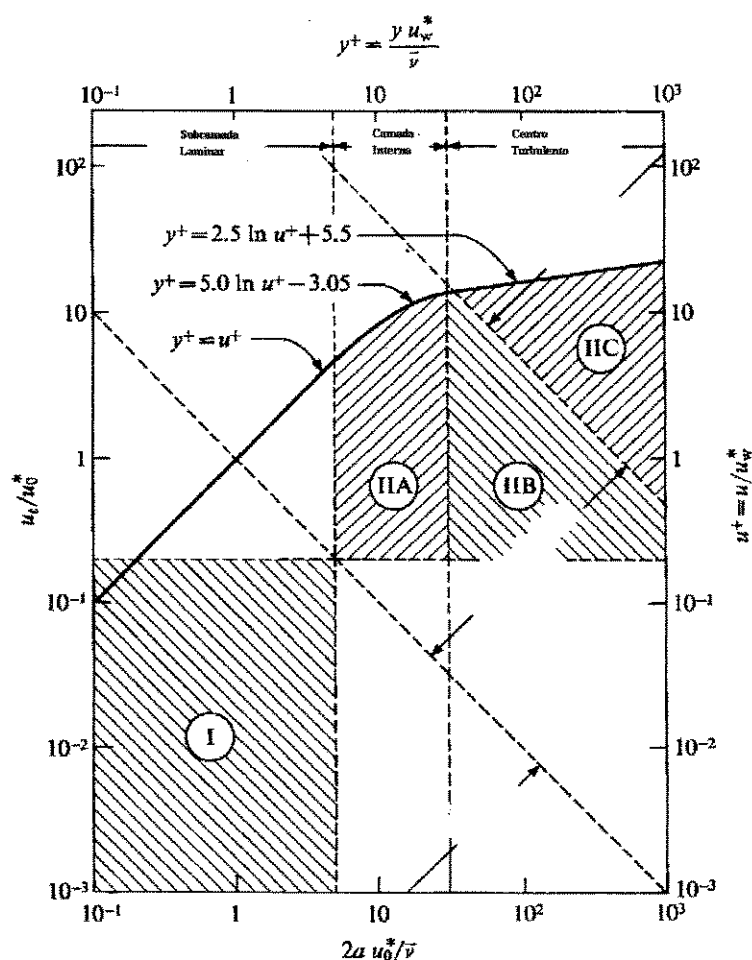


Figura 3.7b - Classificação dos regimes de escoamento por correlação com a velocidade mínima de transporte. Válida para $(s-1)=1,65$.

As relações obtidas por THOMAS são:

$$\text{Para } d > \delta, \quad \frac{w}{u_0^*} = 4,90 \left(\frac{du_0^*}{\nu} \right) \left(\frac{\nu}{Du_0^*} \right)^{0,60} \left[\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right]^{0,23} \quad (3.25)$$

$$\text{Para } d < \delta \quad \frac{w}{u_0^*} = 0,01 \left(\frac{du_0^*}{\nu} \right)^{2,71} \quad (3.26)$$

$$\frac{u_C^*}{u_0^*} = 1 + 2,8 \left(\frac{w}{u_0^*} \right)^{1/3} C^{1/2} \quad (3.27)$$

A Equação 3.27 resultou das observações de THOMAS de que sistemas sólido-líquidos tem valores de $(u_C^* - u_0^*)$ lineares em relação à $\phi^{1/2}$.

OROSKAR & TURIAN (1980) observam que há diferenças qualitativas importantes entre as várias correlações de velocidade crítica e que as várias correlações disponíveis no presente usualmente fornecem resultados muito divergentes. Os pesquisadores destacam que a importância evidente da velocidade crítica tem motivado diversos estudos experimentais ou no desenvolvimento de correlações capazes de generalizar os dados, permitindo uma extrapolação para condições mais amplas.

Desenvolveram um procedimento analítico para determinação da velocidade crítica para transporte de sedimentos em dutos.

Assumindo turbulência aproximadamente isotrópica, a energia dissipada por partícula para manter a partícula estacionária e suspensa é dada pelo produto $(F_D l_c)$ onde F_D é a força de arraste na condição crítica incipiente e na presença de outras partículas (ou seja, é considerada a velocidade de sedimentação “hindered”), e l_c é o comprimento médio do vórtice.

Considerando distribuição uniforme de partículas de mesmo tamanho na seção do duto, OROSKAR & TURIAN (1980) determinaram a energia total requerida por unidade de

comprimento do duto para manter todas as partículas em suspensão. O comprimento do vórtice foi estimado a partir da expressão derivada de DAVIES (1972), apud OROSKAR & TURIAN (1980).

Outra equação de energia total requerida foi deduzida a partir da turbulência isotrópica de Taylor.

Da igualdade entre estas duas equações de energia, retirou-se a equação de velocidade crítica. Porém, na derivação desta, assumiu-se que toda a energia turbulenta atribuída à direção vertical foi utilizada para suspender as partículas. Foi razoável assumir então que uma parte desta energia, correspondente aos pequenos vórtices seja dissipada em calor e não contribua na suspensão das partículas. Assim, apenas um fator x_1 da energia turbulenta foi utilizado na dedução da Equação 3.28 de velocidade crítica de OROSKAR & TURIAN (1980).

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = 1,85 C^{0,1536} (1-C)^{0,3564} (d/D)^{-0,378} SNR_e^{0,09} (x_1)^{0,30} \quad (3.28)$$

$$\text{Onde} \quad SNRe = \rho D (gd(s-1))^{1/2} / \mu \quad (3.29)$$

Para dados disponíveis na literatura, de velocidade crítica de suspensões, e que foram usados no teste da correlação, x_1 foi encontrado ser próximo da unidade, ou seja, maior que 0,95. Uma coleção de 357 pontos experimentais foi reunida. Para partículas de tamanho não uniforme, o diâmetro d_{50} foi adotado como o diâmetro representativo da amostra. Também foi realizada uma modificação na Equação 3.28, derivada de análise de regressão baseada nos 357 pontos experimentais, resultando na Equação 3.30 de OROSKAR & TURIAN (1980).

$$V_{M2} = 1,85 C^{0,154} (1-C)^{0,356} \left(\frac{D}{d}\right)^{3,78} \left(\frac{D\rho}{\mu}\right)^{0,09} [gd(s-1)]^{0,545} \quad (3.30)$$

Segundo OROSKAR & TURIAN (1980), as análises teóricas usadas fornecem resultados capazes de previsões muito satisfatórias de velocidade crítica.

Os autores ainda comentam que tendo em vista a enorme complexidade do problema sobre transporte de sedimentos, o sucesso evidente da aproximação analítica é extremamente encorajador.

GILLIES & SHOOK (1991) determinaram a velocidade crítica para suspensões aquosas de partículas de 0,15 a 4,0 mm de diâmetro e em dutos de 2 a 19,5 polegadas. Deduziram uma equação para a velocidade crítica a partir de seu modelo de duas camadas. Esta equação deduzida de leis da mecânica de fluidos, apresentou como uma primeira aproximação que a velocidade crítica varia com $(g D)^{1/2}$, embora outros fatores desconhecidos da equação apontem uma relação complexa entre a velocidade crítica e o diâmetro do duto. Os autores basearam-se nesta equação para propor a correlação de velocidade crítica:

$$V_{M2} = \left[2gD \left(\frac{\rho_s}{\rho_{fh}} - 1 \right) \right]^{1/2} \text{Exp}[0,165 - 0,073C_d - 12,5K_2] \quad (3.31)$$

$$\text{onde } K_2 = \left[\left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{2/3} \left(g^{1/3} d_{50} \right)^{-1} - 0,14 \right]^2 \quad (3.32)$$

O valor de ρ_{fh} é a densidade de uma hipotética mistura composta do fluido e de partículas que tem menos que 74 microns de diâmetro e uma concentração C_f . O valor de ρ_{fh} é calculado de acordo com:

$$\rho_{fh} = \frac{\rho_s C_f + (1 - C) \rho}{1 - C + C_f} \quad (3.33)$$

Observa-se que esta correlação requer o valor de C_f para calcular a densidade hipotética ρ_{fh} .

Em trabalho apresentado por GÖGÜS & KÖKPINAR (1993) foi proposta uma equação empírica para o cálculo da velocidade crítica. Ela foi obtida de análise dimensional e análise de regressão de 110 pontos experimentais obtidos de varias fontes. A correlação obtida está representada na Equação 3.34.

$$\frac{V_c}{\sqrt{gD}} = 0,124 \left(\frac{D}{d_{50}} \right)^{0,537} C^{0,322} (s-1)^{0,121} \left(\frac{wd_{50}}{v_w} \right)^{0,243} \quad (3.34)$$

Válida para as condições em que foram conduzidos os experimentos, isto é:

$$0,23 \text{ mm} \leq d_{50} \leq 5,34 \text{ mm}$$

$$1,04 \text{ g/cm}^3 \leq s \leq 2,68 \text{ g/cm}^3$$

$$25,4 \text{ mm} \leq D \leq 152,4 \text{ mm}$$

$$0,0075 \leq C \leq 0,30$$

Os autores concluem que sendo a equação proposta válida nestes grandes intervalos, seu uso na estimativa da velocidade crítica pode ser sugerido para tipos de problemas similares de hidrotransporte.

CHIEN SZE FOO(1994) realizou uma revisão da literatura e selecionou dezenove correlações para a velocidade crítica. Desde que grande parte de produtos de petróleo é proveniente de tanques de areia, o conhecimento da velocidade crítica é fundamental na prevenção de acúmulos de areia nos dutos horizontais. O autor comparou resultados experimentais com os previstos pelas correlações e recomenda a correlação de OROSKAR & TURIAN para todas as aplicações de oleodutos.

WASP et al (1977) citam SINCLAIR como um dos poucos pesquisadores que variaram em grande intervalo, a densidade das partículas suspensas. Os autores representaram em gráfico, dado na Figura 3.8, o valor de F_L da correlação de DURAND versus concentração de partículas de carvão e de minério de ferro obtidos de SINCLAIR. Observaram que a correlação de DURAND não foi adequada e concluíram que DURAND

não descreve completamente a dependência que tem a velocidade crítica da densidade relativa de sólidos.

Segundo WASP et al (1977), adicional trabalho é requerido para determinar a exata dependência que sofre a velocidade crítica das densidades do sólido e do líquido. Entretanto os autores ainda recomendam a correlação de DURAND porque ela obtém valores para suspensões de areia, e suas previsões são conservativas para outros sistemas.

WANI (1986) publicou dados experimentais de partículas de areia escoando em dutos de 2 e 6 polegadas. Os fluidos utilizados foram “brine” e uma solução aquosa de etilene glicol. Partículas de areia da maioria dos experimentos tinha um diâmetro médio de 210 microns e 720 microns. As concentrações volumétricas variaram de 5% a 42%. CHIEN SZE-FOO (1994) representou graficamente estes dados experimentais. Os gráficos de CHIEN SZE-FOO (1994) são vistos nas Figuras 3.9 e 3.10. A Figura 3.9 apresenta a velocidade crítica das duas partículas nos dois fluidos de diferentes viscosidades. Embora o espalhamento nos dados seja grande, pode-se observar que a velocidade crítica não é sensível ao tamanho da partícula, enquanto fluidos viscosos geralmente reduzem a velocidade crítica. A Figura 3.10 mostra que a velocidade crítica não é sensível a pequenas variações na densidade do fluido, embora alta densidade apresentou uma tendência a reduzir a velocidade crítica devido ao aumento na força de empuxo. As tendências das Figuras 3.9 e 3.10 mostram que a velocidade crítica aumenta com o aumento da concentração volumétrica.

(1994). Estes cálculos foram realizados para concentração volumétrica de 2% em vários diâmetros de dutos.

Observa-se na Figura 3.10a, ou também pelas correlações estabelecidas pelos pe Na Figura 3.10a, encontram-se valores de velocidade crítica calculados por CHIEN squisadores, que mesmo para pequenas concentrações, onde a diferença entre a velocidade crítica e a velocidade crítica de sedimentação é pequena, ocorrem significativas diferenças entre as correlações. Isto se deve provavelmente porque as variáveis diferem entre as correlações e com exceção da correlação de Sinclair, não levam em consideração o diâmetro da partícula.

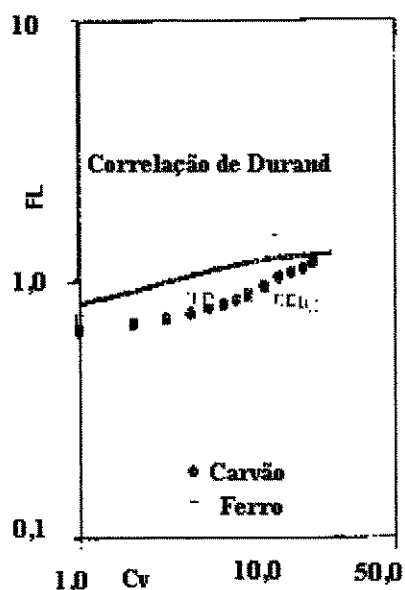


Figura 3.8 - Velocidade crítica V_D de suspensões de carvão e ferro.

De WASP et al (1977) onde $F_L = V_D / (2gD(s-1))^{1/2}$

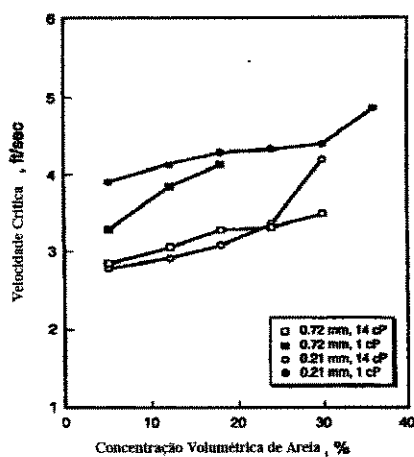


Figura 3.9 - Resultados experimentais de velocidade crítica em dutos de 2 polegadas em função da concentração, de WANI (1986) apud CHIEN SZE-FOO (1994).

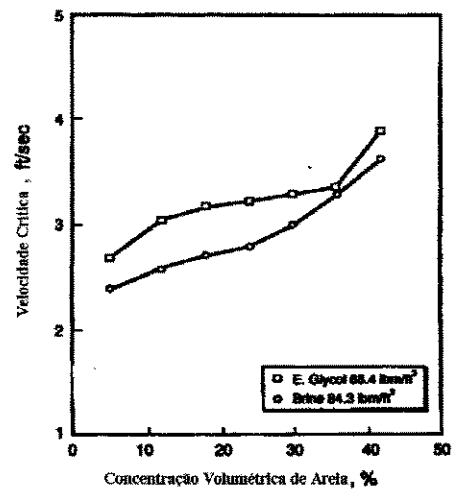


Figura 3.10 - Resultados experimentais de velocidade crítica em duto de 2 polegadas, destacando o efeito da densidade do fluido, de WANI (1986) apud CHIEN SZE-FOO (1994).

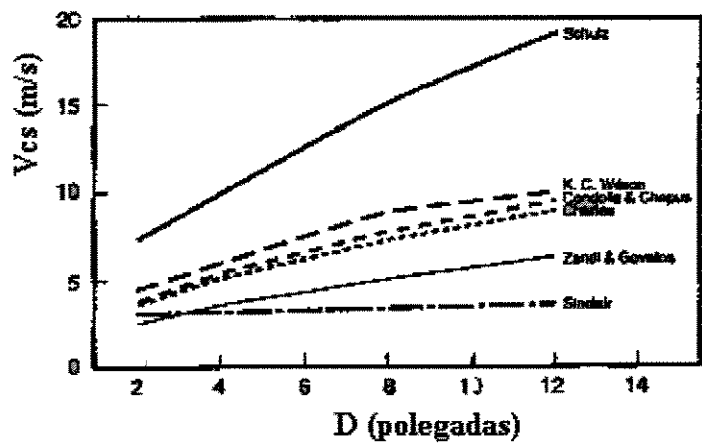


Figura 3.10a - Velocidade Crítica de várias correlações apud CHIEN (1994).

Turian et al (1977) em seu trabalho, classifica quatro regimes existentes em hidrotransporte de sólidos, da forma apresentada na Figura 3.10b. Os autores obtiveram quatro equações do fator de atrito de Fanning referentes aos quatro regimes de escoamento. Suas equações foram obtidas a partir do total de 2848 pontos experimentais e unifica 18 trabalhos de pesquisa sobre sólidos suspensos dos tipos: areia, níquel, vidro, aço, cobre, carvão, cascalho e madeira. Deste total de pontos experimentais, 936 foram determinados pelos autores em tubos de diâmetro interno igual a 5,08 cm, 2,54 cm e 1,27 cm. O sólido suspenso consistiu de contas de vidro com diâmetro médio uniforme, sendo que a faixa de variação foi de 90 μm até 4380 μm . A massa específica das contas de vidro também foi variado, desde cerca de 2,4 g/cm^3 até 4,4 g/cm^3 .

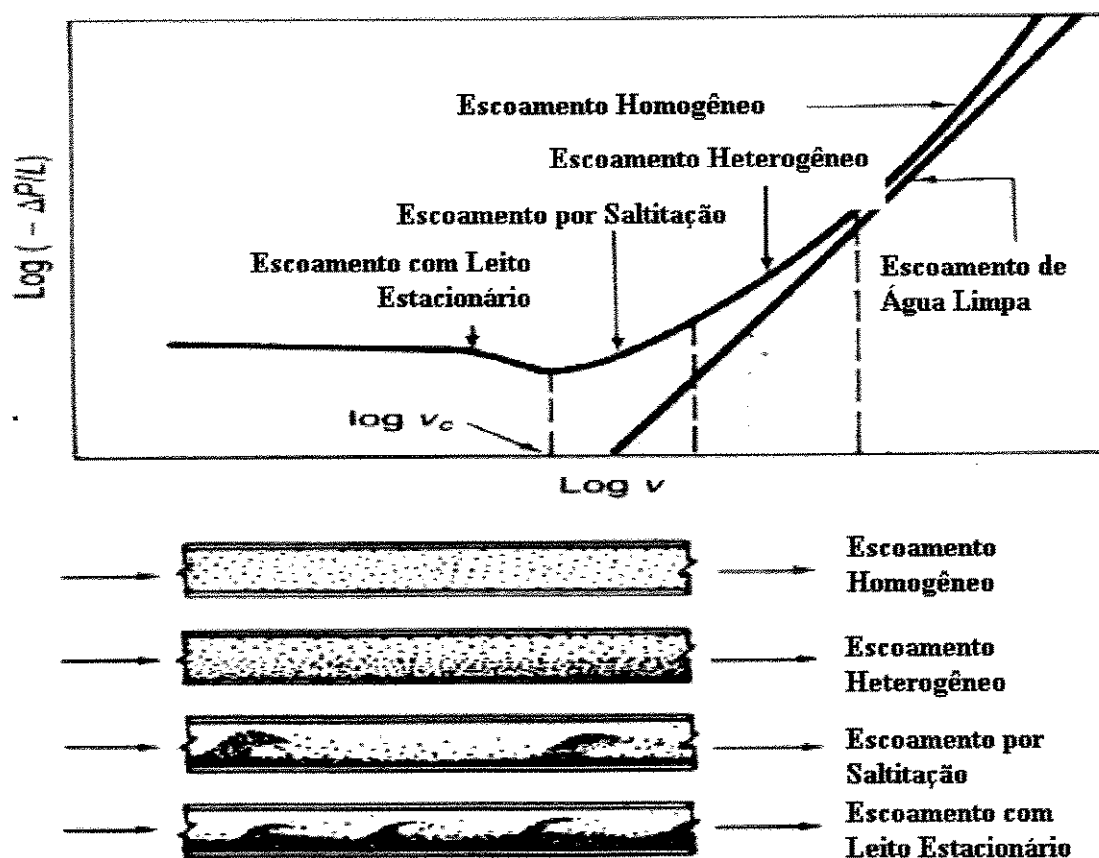


Figura 3.10b – Regimes de escoamento de acordo com Turian et al (1977).

O intervalo de variáveis referente ao conjunto todo de pontos experimentais é o seguinte:

Diâmetro interno do tubo:	1,26 a 69,9 cm
Massa específica:	1,16 a 11,3 g/ cm ³
Tamanho da partícula:	29,7 a 38000 µm.
Concentração volumétrica:	0,006 a 42%
Velocidade média do fluxo:	0,009 a 6,7 m/s

As quatro equações, discriminadas por regime de escoamento, obtidas por Turian et al são:

Para o escoamento com leito estacionário (regime 0):

$$f - f_w = 0,4036 C^{0,7389} f_w^{0,7717} C_D^{-0,4054} \left[\frac{V^2}{Dg(s-1)} \right]^{-1,096} \quad (3.35)$$

Para o escoamento por saltitação (regime 1):

$$f - f_w = 0,9857 C^{1,018} f_w^{1,046} C_D^{-0,4213} \left[\frac{V^2}{Dg(s-1)} \right]^{-1,354} \quad (3.36)$$

Para o escoamento heterogêneo (regime 2):

$$f - f_w = 0,5513 C^{0,8687} f_w^{1,200} C_D^{-0,1677} \left[\frac{V^2}{Dg(s-1)} \right]^{-0,6938} \quad (3.37)$$

Para o escoamento homogêneo (regime 3):

$$f - f_w = 0,8444 C^{0,5024} f_w^{1,428} C_D^{0,1516} \left[\frac{V^2}{Dg(s-1)} \right]^{-0,3531} \quad (3.38)$$

A partir do conceito de igualdade das equações no ponto de transição de um regime qualquer ao regime seguinte, obtiveram e definiram o número de regime (R) ou seja, os seguintes números de regime:

Na transição do regime leito estacionário para o de saltitação:

$$R_{01} = \frac{V^2}{31.93C^{1,083} f_w^{1,064} C_D^{-0,06160} Dg(s-1)} \tag{3.39}$$

Na transição do regime por saltitação para o heterogêneo:

$$R_{12} = \frac{V^2}{2,411C^{0,2263} f_w^{-0,2334} C_D^{-0,3840} Dg(s-1)} \tag{3.40}$$

Na transição do regime heterogêneo para o homogêneo:

$$R_{23} = \frac{V^2}{0,2859C^{1,075} f_w^{-0,6700} C_D^{-0,9375} Dg(s-1)} \tag{3.41}$$

Os valores de R_{01} , R_{12} ,e R_{23} , iguais à unidade correspondem à transição dos correspondentes escoamentos. De modo que os valores de R_{01} , R_{12} ,e R_{23} , para um determinado ponto do escoamento permitem a determinação do tipo de regime em que este ponto se encontra. A Tabela 3.1.5.1 apresenta a configuração do número de regime, ou seja, os sinais dos valores de $(R_{01}-1)$, $(R_{12}-1)$,e $(R_{23}-1)$ que correspondem a cada tipo de regime.

Tabela 3.1.5.1 – Configuração do número de regime

Regime	$(R_{01}-1)$	$(R_{12}-1)$	$(R_{23}-1)$	Tipo de Escoamento
0	-	-	-	Leito estacionário
1	+	-	-	Saltitação
2	+	+	-	Heterogêneo
3	+	+	+	Homogêneo

O valor do coeficiente de arraste C_D necessário deve ser obtido a partir das Equações 3.42 e 3.43 de **Turian et al (1971)**:

$$\begin{aligned} \text{Log}_{10} \text{Nre}_p = & -1,38 + 1,94 \log_{10} \Lambda - 0,0860 (\log_{10} \Lambda)^2 - 0,0252 (\log_{10} \Lambda)^3 \\ & + 0,000919 (\log_{10} \Lambda)^4 + 0,000535 (\log_{10} \Lambda)^5 \end{aligned} \quad (3.42)$$

Onde,

$$\Lambda = \text{Nre}_p C_D = \left\{ \frac{4gd^3 \rho (\rho_s - \rho)}{3\mu^2} \right\}^{1/2} \quad (3.43)$$

Soliman, R. H. e Collier, P. B. (1990) desenvolveram um programa BASIC para determinação da perda de carga e da velocidade crítica (considerando única a velocidade de mínima perda de carga e a velocidade de início da sedimentação). O programa utiliza as equações de Turian et al, Equações 3.35 a 3.43, as Equações 3.28, 3.29 e 3.30 de **Oroskar, A. R. e Turian, R. M. (1980)** para cálculo da velocidade crítica e as Equações 3.44, 3.45 e 3.46, de **Serghides, T. K. (1984)** para cálculo do fator de atrito de Darcy (f_D).

$$f_D = \left[\left(\frac{8}{N \text{Re}} \right)^{12} + \left(\frac{1}{(A+B)^{3/2}} \right) \right]^{1/12} \quad (3.44)$$

onde:

$$A = \left[2,457 \ln \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{N \text{Re}} \right)^{0,9} + (0,27 \frac{\varepsilon}{D})} \right) \right]^{16} \quad (3.45)$$

$$B = \left(\frac{37530}{N \text{Re}} \right)^{16} \quad (3.46)$$

O programa desenvolvido por **Soliman, R. H. e Collier, P. B. (1990)**, além de determinar a velocidade crítica de sedimentação, calcula a perda de carga unitária de fluidos sem e com partículas sólidas. Para o caso de misturas sólido-líquido, a vazão total, devido às duas fases, é separada em vazão líquida e vazão sólida. Ambas, medidas em unidades de massa por hora. Assim, para escoamento de mistura sólido-líquido os dados de entrada ao programa são: diâmetro interno do tubo, vazão líquida, vazão sólida, viscosidade do líquido, densidade do sólido, densidade do líquido e diâmetro médio da partícula, além da rugosidade da parede do tubo considerada na Equação 3.45.

Para um determinado conjunto de dados de entrada ao programa, em se tratando de mistura sólido-líquido, o programa inicialmente através da subrotina TSLUR, determina a velocidade crítica de sedimentação, além da concentração média de sólidos na mistura, coeficiente de arraste da partícula sólida, velocidade média do fluxo, e número de Reynolds modificado.

O número de Reynolds modificado, $SNRe$ apresenta-se na Equação 3.47:

$$SNRe = D\rho_L(gd(s-1))^{1/2} / \mu \quad (3.47)$$

A velocidade crítica de sedimentação é determinada através da equação obtida pelos pesquisadores Oroskar, A. R. e Turian, R. M. (1980), apresentada na Equação 3.48.

$$V_{cs} = (gd(s-1))^{1/2} (1,85C^{0,1536})(1-C)^{0,3564} SNRe^{0,09} (d/D)^{-0,378} \quad (3.48)$$

Após estes calculos, a subrotina TSDLTP, que segue à TSLUR, determina o regime de escoamento e a perda de carga unitária que corresponde aos dados de entrada ao programa.

O programa de **Soliman, R. H. e Collier, P. B. (1990)**, por basear-se nas equações de **Turian et al (1977)** obtidas de ampla faixa de variáveis, e por determinar a velocidade crítica de sedimentação e a perda de carga unitária de misturas sólido-líquido, trata-se de importante trabalho, útil aos interesses de pesquisas sobre o hidrotransporte de sólidos.

3.1.6 - Distribuições de velocidade e concentração

VANONI (1946) em sua pesquisa em canais verificou que seus dados experimentais obtidos não obedeceram quantitativamente a Equação 3.9. A distribuição real é mais uniforme que a teórica. Sedimentos finos podem ser transportados mais facilmente do que a teoria indica.

De diversas conclusões de VANONI (1946) podemos citar: Para material fino o coeficiente de transferência de sedimento (E_s) tende a exceder o coeficiente de transferência do momento (E_m), enquanto para materiais grosseiros tendência oposta foi encontrada. Sedimento suspenso reduz o valor da constante de von Karman (κ) o que caracteriza a eficiência da turbulência na transferência do momento. A redução de κ indica que o sedimento tende a suprimir ou amortecer a turbulência. Sedimento suspenso reduz a resistência ao fluxo, assim causa um transporte de sedimento mais rápido que a água limpa. Este aumento na velocidade devido à adição de sedimento à água limpa provavelmente não causa um aumento na capacidade de transporte do sedimento, desde que é acompanhado por uma redução da turbulência e na força de arraste na corrente do fluxo.

Outra conclusão de VANONI (1946) é que a distribuição de velocidades próxima ao centro do canal apresentou a forma logarítmica e segue a lei universal da diferença de velocidade (semelhante à equação 3.3 para dutos).

COIADO (1985) em pesquisa sobre escoamento de misturas sólido- líquidas através de condutos forçados, com aplicação às instalações de recalque, dentre as diversas conclusões obtidas, podemos citar: As velocidades críticas de misturas de água e areia, ajustam-se melhor à Equação de DURAND, com o parâmetro adimensional de transporte de sedimento de DURAND-CONDOLIOS, com diferença percentual média relativa de $\pm 15,4\%$. Sobre o perfil de velocidade na seção do duto, mantendo-se constantes a vazão e a concentração, verificou-se que as velocidades mais distantes da parede crescem com o aumento dos grãos de areia. Para a mesma vazão, as velocidades do escoamento em pontos afastados da parede, referente à areia $d_{50}=0,650$ mm e $s=2,65$, são maiores que as da água limpa, enquanto para a areia $d_{50}=0,225$ mm e $s=2,71$, ocorreu o oposto. Mantendo-se

constantes a vazão e o tipo de areia, ao variar as concentrações, observa-se perfis de concentração semelhantes. Sem leito estacionário, a Equação 3.9 (Equação de Rouse) ajustou-se melhor aos perfis de concentrações de água e areia, tomando-se como referência o ponto $a = 0,05D$, e o ajuste se torna melhor quando a mistura se aproxima da homogeneidade.

HEYWOOD (1986) em sua revisão sobre as técnicas de redução de energia em dutovias, trata do bombeamento de polpas em dutos horizontais. O autor observou de experimentos e considerações teóricas que o tamanho absoluto das partículas não tem nenhum efeito sobre a reologia das suspensões desde que as partículas estejam bem dispersas na suspensão e sofram a ação apenas de forças hidrodinâmicas. Na prática entretanto o efeito de variação da viscosidade com o tamanho da partícula, pode se apresentar em dados reológicos, por uma variedade de razões. Apresentaremos duas delas.

Primeiro, partículas em suspensão em água quando têm uma camada de moléculas absorvidas pela superfície da partícula, modifica-se para uma suspensão que se comporta reologicamente de acordo com uma concentração volumétrica maior do que a calculada pelo peso e densidade das partículas. Se a espessura desta camada de absorção permanece constante e é independente do tamanho da partícula, a viscosidade da partícula aumentará com a diminuição do tamanho da partícula para uma determinada concentração volumétrica constante e uma tensão de cisalhamento.

Segundo, à medida que o tamanho da partícula é reduzido a microns ou menos, movimentos Brownianos tornam-se significativos nas propriedades viscosas. Devido às colisões decorrentes, é comum o comportamento não Newtoniano e pode consistir em tensão de cisalhamento fraca ("shear thinning") ou em tensão de cisalhamento forte ("shear thickening"). A viscosidade da suspensão aumenta com a diminuição do tamanho da partícula.

Não está claro ainda como os dois efeitos podem ser quantificados em separado.

O autor conclui que quando se deseja redução da viscosidade em uma suspensão, deve-se reduzir a quantidade de partículas menores que um micron, e quando se deseja suspensão com alta viscosidade e tensão de cisalhamento fraca ("shear thinning") para o

transporte de partículas grosseiras, deve-se procurar uma proporção de finos que mantenha a suspensão praticamente não sedimentável.

COOKE & LAZARUS (1988) apresentaram um instrumento que utiliza a pressão de estagnação em um tubo de amostragem como referência na determinação da velocidade do fluxo. Como resultado, o instrumento permite a determinação da velocidade local, da concentração e da distribuição do tamanho da partícula na seção do duto. A geometria, a disposição e a acurácia do instrumento é discutida. Os autores realizaram medições em duto de 140 mm de diâmetro interno com água e areia à 18% em volume. Para três velocidades de ensaio, seus resultados de velocidades locais concordam bem com os esperados teoricamente por perfis logaritmos de distribuição em regime turbulento.

Das integrações de seus perfis de concentração, observaram que concordam com os valores reais com um desvio de 2%. A vazão integrada foi menor 10% que a real, indicando a necessidade de maiores avaliações.

JILAN & ZHENHUAN (1988) pesquisaram efeitos estratificados de partículas grosseiras em fluido Newtoniano. Verificaram que para duto circular as distribuições de velocidade e de concentrações se apresentam assimétricos e afirmaram que o fato é explicado pela existência de uma camada de leito de sedimentos. A concentração no leito se apresentou muito maior que na suspensão e conseqüentemente as chances de colisão entre as partículas é muito maior e como resultado o gradiente de velocidade no leito de sedimentos é muito maior que na suspensão, o que causa a distribuição assimétrica em toda a seção transversal. A posição de máxima velocidade situa-se um pouco acima do eixo do duto. Em dutos retangulares a distribuição de concentração tende a ser mais uniforme e os pesquisadores afirmam que pode ser devido às correntes secundárias nos cantos da seção, portanto a assimetria da distribuição não é tão aparente.

JACOBS, B.E.A. (1988) em sua revisão sobre escoamento bifásico, descrevem que vários fatores relacionados aos coeficientes de difusão e à influência dos sólidos na intensidade de turbulência precisam ser esclarecidos experimentalmente. Os autores afirmam que em geral há uma boa concordância entre teoria e medição das distribuições de concentração e velocidade, e que para partículas de areia de diâmetro nominal até 0,5 mm, o valor calculado da concentração volumétrica média (de 8% a 28%) difere de valores

experimentais em pelo menos 0,5%. JACOBS, B.E.A.(1988) acrescentam que a distribuição de concentração de partículas de areia de diâmetro nominal 13 mm não são bem descritos teoricamente e requerem a seleção dos diferentes fatores que forneçam concordâncias adequadas com os experimentos.

COLWELL & SHOOK (1988) pesquisaram os efeitos do comprimento retilíneo de duto nas distribuições de concentração e velocidade de mistura água e areia na seção do duto. As distribuições foram medidas na vertical seção nas posições 6 D, 50 D e 185 D à jusante da entrada. As medições indicaram que o comprimento de entrada deve ser de 50 D para misturas de areia. Partículas de alta velocidade de sedimentação necessitam comprimentos retilíneos um pouco menores que as partículas de velocidade de sedimentação intermediária. Partículas de menor densidade tipo poliestireno, para os quais efeitos dispersivos são importantes, o comprimento de entrada é significativamente maior que 50 D. As distribuições de velocidade mostraram que os perfis de velocidade se desenvolveram concomitantemente com os perfis de concentração. Para misturas de areia uma simulação bidimensional foi desenvolvida a partir da expressão de Schmidt- Rouse (semelhante à Equação 3.8 mas no lugar de w utiliza a velocidade relativa da partícula em relação ao fluido) e forneceu uma representação satisfatória do desenvolvimento dos perfis de concentração.

ALAJBEGOVIC et al (1994) usando um sistema LDA pesquisaram as estruturas de distribuição de fluxo ascendente de misturas sólido- líquidas em duto. Utilizaram partículas esféricas de cerâmica e de polistireno de cerca de 2 mm de diâmetro em água.

Os pesquisadores afirmam que o fenômeno de distribuição de fases em escoamento bifásico é um problema desafiador desde que a interação entre as fases não é totalmente compreendida.

Ao contrário das partículas de cerâmica, as partículas de polistireno movem- se mais rápido que o líquido em toda a seção do duto e até próximo à parede. Os autores concluíram que ocorre um aumento elevado das flutuações turbulentas na direção axial do fluido próximo à parede, muito provavelmente causado pelos espalhamentos de vórtices atrás das partículas que em geral se movem mais rapidamente do que o líquido nas proximidades da parede. Se as flutuações turbulentas radiais e axiais de ambas as fases são comparadas,

conclui-se que em geral as flutuações turbulentas das partículas de polistireno são maiores do que das de cerâmica. Isto ocorre porque as partículas (mais pesadas) de cerâmica têm maior inércia. Interessantemente a turbulência da fase líquida não é quase afetada pela variação da densidade das partículas, entretanto um pequeno decréscimo no nível de turbulência do escoamento com partículas de cerâmica é razoável devido à maior inércia destas partículas.

3.2 - TRANSPORTE DE SUSPENSÕES DE POLÍMEROS

Logo após a descoberta da existência de redução de arraste por polímeros surgiram diversas propostas de futuras possíveis aplicações, dentre as quais citam-se: combate à incêndios, irrigação, oleodutos, águas residuárias, hidrotransporte de sólidos, circuitos de aquecimento, jatos cortantes, aplicações biomédicas, máquinas hidráulicas e aplicações marinhas.

A energia dissipada devida a escoamento em condutos forçados pode ser reduzida pela adição de tipos especiais de polímeros ou outras substâncias macromoleculares. TOMS, B.A. em 1949 foi o pioneiro na apresentação de dados experimentais mostrando a queda de energia dissipada no fluxo turbulento de polímeros.

Neste item serão abordados aspectos referentes ao transporte hidráulico de suspensões de polímeros, ou surfactantes ou outros redutores de arraste.

3.2.1 - O fenômeno de redução de arraste

O fenômeno de redução de arraste por polímeros é conhecido por fenômeno TOMS.

TOMS, em 1948, foi o primeiro a observar a redução do consumo de energia por unidade de vazão em suspensões poliméricas no regime turbulento.

Polímero, de acordo com o "THE CONDENSED CHEMICAL DICTIONARY " (1981), é uma macro- molécula formada pela união química de cinco ou mais unidades idênticas denominadas monômeros. Em muitos casos, o número de monômeros é muito grande (3500 para celulose pura) e muitas vezes não é precisamente conhecido. Em polímeros sintéticos este número pode ser controlado a uma extensão predeterminada.

Os polímeros podem ser inorgânicos (siloxane, silicone, etc) e orgânicos. Os orgânicos podem ser naturais (polisacarídeos, proteínas e hidrocarbonetos), sintéticos (nylon, polivinil, polietileno, poliesters, etc) ou semi- sintéticos (rayon, acetato de celulose, etc).

De acordo com SELLIN et al (1982), os polímeros que fornecem boa redução de arraste são aqueles cuja molécula tem cadeia não ramificada e peso molecular maior ou cerca de 10^6 .

SELLIN et al (1982) citam os primeiros resultados de aplicação de polímeros em esgotos, referentes ao norte de Dallas no Texas. Estes testes realizados em duto de 610 mm de diâmetro e 1250 m de comprimento, mostraram que os polímeros podem ser aplicados com sucesso para diminuição dos níveis de sobrecarga diária. Os autores citam resultados da injeção de polímeros em pontos localizados a 5% e 25% do comprimento do navio a partir da proa, onde 4,5 l/min na concentração de 600 ppm de Polyox WSR-301 reduziu o atrito em cerca de 21%. A resistência total do modelo foi então diminuída de 10% e resultados semelhantes foram obtidos em outros modelos de navios.

3.2.2 - A assíntota de máxima redução de VIRK, P.S. (1967) e o Perfil Limite Máximo

VIRK (1970) indicou a existência de três regimes de escoamento turbulento, de acordo com o aumento da velocidade: (i) um regime sem redução de arraste onde a solução de polímero obedece a mesma relação de fator de atrito que o solvente, (ii) um regime no qual a redução de arraste depende principalmente de todos os parâmetros poliméricos

identificáveis - o sistema solvente- polímero, o peso molecular e a concentração (a separação entre os regimes (i) e (ii) é geralmente bem definida), (iii) um regime assintótico que limita a máxima redução de arraste possível no fenômeno TOMS. O fator de atrito nesta assíntota de máxima redução é independente dos parâmetros poliméricos.

Do ponto de vista teórico, o mecanismo de redução de arraste não é ainda bem conhecido, mas duas explicações significativas são apresentadas. A primeira delas é que o fenômeno provém de algum tipo de interação temporal entre o soluto polimérico e o fluxo turbulento. A segunda refere-se à interação turbulência- polímero, quando ocorre, afeta muito significativamente a região próxima dos limites da parede(camada elástica).

Segundo VIRK (1971), a importância da região próxima à parede tem hipótese e esclarecimento por dois tipos de evidências experimentais: Perfis de velocidade média em baixas reduções de arraste indicam que a região afetada pelas macromoléculas situa-se mais próxima da região intermediária de $y^+ \approx 50$ do que no centro turbulento. Dados em dutos rugosos mostraram que a redução de arraste é virtualmente inafetada pela presença ou ausência de uma camada viscosa, respectivamente aos escoamentos hidraulicamente liso e totalmente rugoso, o que sugere que a interação turbulência-polímero começa além da parede, além de $y^+ \approx 5$. Concluindo, isto implica que na zona interna $5 < y^+ < 50$ inicia-se o processo responsável pela redução de arraste.

Segundo VIRK (1970), apesar dos avanços mencionados não há ainda descrição satisfatória das numerosas variáveis que influenciam o fenômeno de redução de arraste, assim um modelo para o fenômeno de TOMS onde a redução de arraste é dependente principalmente do escoamento e dos parâmetros poliméricos se apresenta.

O modelo se baseia em um esquema de três zonas para o perfil de velocidade média, no qual a redução de arraste está associado a uma zona interativa ou subcamada elástica situada entre as subcamada viscosa e o centro turbulento Newtoniano. O autor realiza a integração dos perfis de velocidade média para produzir uma relação geral do fator de atrito que é um parâmetro da espessura da subcamada elástica.

Em coordenadas de fator de atrito, a região do fenômeno de TOMS é limitada pelas assíntotas de zero e máxima redução de arraste, ambos independente de parâmetros poliméricos. A assíntota de zero redução de arraste é a bem conhecida lei de Prandtl- von Kármán para escoamento turbulento Newtoniano em dutos lisos.

$$1 / f_f^{1/2} = 4,0 \log (Re f_f^{1/2}) - 0,4$$

(3.35)

A máxima redução de arraste, primeiramente publicada por VIRK (1967) por observação de diversos estudos independentes e cuja correlação foi posteriormente apresentada é dada por:

Tabela 3.1 - Resumo de dados experimentais de máxima redução de arraste. Segundo VIRK (1970).

ENSAIO	FONTE	SOLVENTE	POLÍMERO	M x 10 ⁶	CONCENTRA ÇÃO (WPPM)	DIÂMETRO TUBO(cm)	NÚMERO DE DADOS
1	TOMS	C ₆ H ₅ Cl	PMMA	2,3	500	0,128	5
2	CASTRO	ÁGUA	PEO	(4)	30,60,100	0,470;0,782; 1,097	60
				(7)	5,20	0,470;0,782; 1,097	40
3	GILES	ÁGUA	PEO	(6)	30,300	0,140;0,257	40
4	HOYT	ÁGUA	PEO	(6)	30,100	0,109;0,460; 1,02	10
5	LITTLE	ÁGUA	PEO	5,5	100	0,953	10
		0,3m MgSO ₄	PEO	5,5	100	0,953	5
6	PRUITT	ÁGUA	PAMH	(2,5)	100,1000	1,27	5
7	PRESTON	ÁGUA	PEO	0,85	300,1000	0,851	20
				6,1	100	0,851	20
8	BAHER	0,1m NaCl	PAMH	13,0	30,100	0,945	40
9	VIRK	ÁGUA	PEO	0,76	500,1000, 2000	0,292	20
				6,1	5,20,450	0,292;3,21	

NOTAS: 1 - Abreviações : PEO - Óxido de Polietileno
PAMH - Poliacrilamida, parcialmente hidrolizada
PMMA - Polimetilmetacrilato

2 - Valores de Peso Molecular entre parênteses foram estimados a partir de nomes comerciais ou dados do fabricante e não foram determinados experimentalmente.

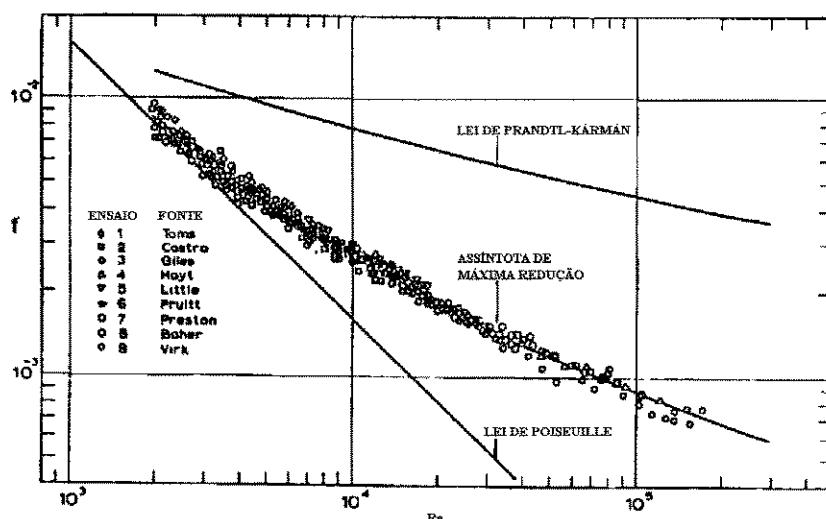


Figura 3.11 - Evidência de uma assíntota de máxima redução de arraste . Segundo VIRK (1970) para diversas pesquisas, relacionadas na Tabela 3.1.

$$1 / f_f^{1/2} = 19,0 \log (Re f_f^{1/2}) - 32,4 \quad (3.36)$$

Esta correlação foi obtida principalmente em dados de soluções de óxido de polietileno, porém segundo VIRK (1970), diversos outros polímeros dissolvidos em água e em solventes orgânicos e soluções complexas de sabões, aparecem concordantes com a assíntota de máxima redução. Nesta correlação as constantes foram obtidas para um intervalo de confiança de 95%, ou seja, as constantes são $(19,0 \pm 0,4)$ e $(32,4 \pm 1,2)$. A Figura 3.11 apresenta evidências experimentais da assíntota de máxima redução, obtida de VIRK (1970).

VIRK (1970) ainda correlacionou estes dados e obteve a expressão em forma de potência dada da seguinte forma:

$$f_f = 0,59 \text{ Re}^{-0,58} \quad 4\,000 < \text{Re} < 40\,000 \quad (3.37)$$

O expoente negativo varia entre 0,67 e 0,55 de acordo com observações do autor em relação aos obtidos por outros pesquisadores. O uso da Equação fora do intervalo de Re não é recomendado.

Comparando a assíntota de máxima redução com a lei de Poiseuille, Figura 3.11, observa-se que a máxima redução não atinge o escoamento laminar, de qualquer modo a grande porcentagem de redução do fator de atrito comparado ao escoamento turbulento Newtoniano é digno de observação, 64% e 82% em respectivamente Re igual a 10^4 e 10^6 .

O centro turbulento tipo Newtoniano ou "plug" Newtoniano é estabelecido experimentalmente em suspensões de polímeros. Nesta região o perfil de velocidade é paralelo (e acima) à lei de distribuição de Newton junto à parede (Figuras 3.12 e 3.13). O desvio para cima ou deslizamento efetivo ("effective slip") aumenta com o aumento da redução de arraste mas a declividade Newtoniana e portanto o comprimento de mistura constante $x_n=0,40$ continua válido.

Segundo VIRK (1970), ainda não há evidência experimental para a zona viscosa adjacente à parede, mas a sua presença pode ser antecipada por razão convencional. Como o fenômeno de TOMS ocorre apenas no escoamento turbulento, e na hipótese de nenhum deslizamento, o transporte turbulento precisa diminuir à medida que se aproxima da parede do duto onde o escoamento precisa eventualmente ser dominado por processos moleculares, assim a existência de uma região viscosa. Além disso as soluções de polímeros não exibem essencialmente nenhuma viscosidade non Newtoniana (ou "shear thinning") pois obedecem à lei de Poiseuille no escoamento laminar. Portanto é razoável assumir que a zona viscosa no fenômeno de TOMS é análoga à usual subcamada viscosa Newtoniana na sua estrutura de velocidade média (com certeza isto não significa qualquer similaridade na estrutura da turbulência).

A região intermediária, denominada por subcamada elástica, característica da redução de arraste, na qual ocorre o deslizamento efetivo, tem conexão com a subcamada viscosa e o centro turbulento. Associa-se a redução de arraste ao seu tamanho. A máxima redução de arraste ocorre quando a subcamada elástica atinge o eixo central do duto,

desaparecendo o centro turbulento. Nesta condição se tem o perfil limite máximo (Figuras 3.12 e 3.13), e de onde é lógica a suposição de que este perfil limite máximo é uma característica da região intermediária. Esta é a hipótese chave do modelo de VIRK.

O esquema das três regiões está ilustrado na Figura 3.12 em coordenadas u^+ versus $\log y^+$. Onde $u^+ = u/u^*$ e $y^+ = y u^*/\nu$. Por conveniências conceituais, bruscas variações são assumidas entre as regiões, mas é obvio que na prática as descontinuidade resultantes dos gradientes de velocidade deverão ser contínuos nas vizinhanças das fronteiras entre regiões.

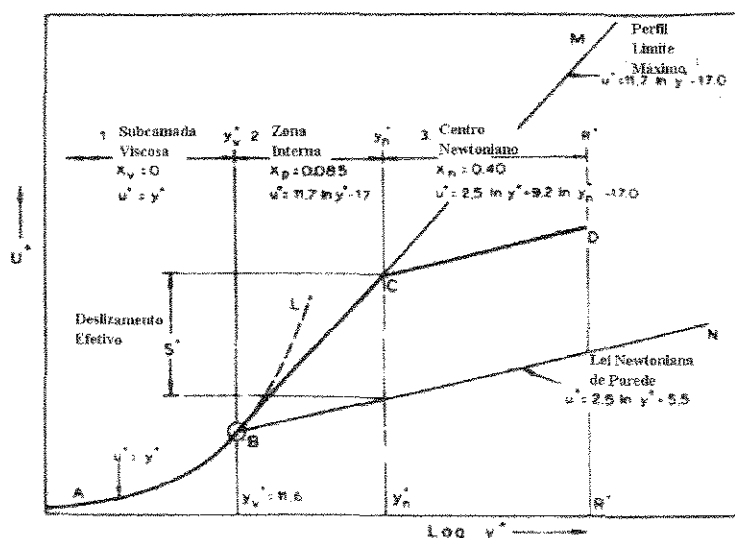


Figura 3.12 - Esquema do modelo de três camadas no fluxo médio proposto por VIRK para o fenômeno TOMS.

Como se pode observar na Figura 3.12, as três curvas: perfil limite máximo, subcamada viscosa e lei de Newton de distribuição junto à parede, interceptam-se num único ponto, e é natural considera-lo como a região externa da subcamada viscosa, isto é $y_v^+ \approx 11,6$. O valor de y_n^+ corresponde à interface entre a subcamada elástica e o centro turbulento. Conforme diminui a redução de arraste, $y_n^+ \rightarrow y_v^+$ onde se anula a redução de arraste, a região intermediária, segmento BC, desaparece e a curva reduz-se ao esquema de duas camadas Newtonianas de TAYLOR- PRANDTL. Com o aumento da redução de arraste, $y_n^+ \rightarrow R^+$ de modo que o centro turbulento, segmento CD, desaparece e prevalece o perfil limite máximo.

Para reduções moderadas de arraste, como $y_n^+ / R^+ < 0,1$, o valor de y_n^+ se relaciona com o deslizamento efetivo S^+ pela Equação seguinte:

$$\ln (y_n^+ / y_v^+) = S^+ x_p x_n / (x_n - x_p) \quad (3.38)$$

Nesta situação ocorre o centro turbulento Newtoniano sob a maior parte da seção do duto. É evidente que o presente esquema incorpora o modelo atual de deslizamento efetivo como um caso especial válido para reduções menores de arraste. O perfil limite máximo proposto é consistente com dados de perfil de velocidade obtidos experimentalmente na zona intermediária.

As relações do fator de atrito do tipo PRANDTL resultaram da integração dos perfis de velocidade média. Demonstra-se que as constantes (M, N) de uma relação de fator de atrito da forma:

$$f^{1/2} = M \log (Re f_r^{1/2}) + N \quad (3.39)$$

estão relacionadas às correspondentes constantes (A, B) de uma lei semilogaritmica da forma:

$$u^+ = A \ln y^+ + B \quad (3.40)$$

pela relação matricial:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,615 & 0. \\ 1,562 & 1,414 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M \\ N \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Esta transformação requer que a lei de parede de constantes (A,B), seja independente de Re e que as regiões muito próximas da parede e no eixo do duto onde a lei semilogaritmica não vale, carregue apenas uma pequena fração do escoamento total.

A correlação apresentada como Equação 3.36 implica na existência de um perfil semilogaritmico de perfil de velocidade nas condições de máxima redução de arraste e a aplicação direta da Equação 3.41 fornece o perfil ultimato nas condições de máxima redução. Como (A,B) obtidos são (11,7 ; 16,1) , e após alguns ajustes por dados experimentais, o perfil limite máximo é representado pela Equação 3.42:

$$u^+ = 11,7 \ln y^+ - 17,0 \quad (3.42)$$

Na Figura 3.12 observa-se a interseção das três curvas: $u^+=y^+$ (subcamada viscosa Newtoniana), $u^+ = 2,5 \ln y^+ + 5,5$ (lei Newtoniana de distribuição próximo à parede) e o perfil limite máximo representado pela Equação 3.42. Esta interseção dá-se em $(u^+ ; y^+) = (11,6 ; 11,6)$. Desta forma semilogaritmica, tem-se que o comprimento de mistura constante ($x = 1/A$) tende a 0,085 em soluções de polímeros, aproximadamente uma ordem de grandeza menor que o valor Newtoniano de 0,40. Esta comparação fornece alguma idéia sobre a extensão na qual o transporte turbulento é diminuído durante a redução de arraste. No modelo de VIRK apresentado na Figura 3.12 pode-se observar que o centro turbulento obedece a lei Newtoniana de distribuição junto à parede e portanto possui comprimento de mistura constante igual a 0,40, e conforme aumenta a redução de arraste, com o efetivo deslizamento a declividade (da reta CD) do centro turbulento permanece constante e então o comprimento de mistura constante continua a se aplicar. Conforme aumenta a redução de arraste, varia a extensão da região intermediária mas o comprimento de mistura que nele se apresenta é universal e tem sempre o valor $x_p = 0,085$.

A Figura 3.13 representa dados obtidos experimentalmente por VIRK (1970) sobre os perfis de velocidade média durante redução de arraste. Correspondentes condições experimentais são resumidas na Tabela 3.2. Linhas tracejadas indicam previsões do modelo

de deslizamento efetivo. Observa -se nesta Figura 3.13 pouca diferença em relação ao modelo de três regiões do escoamento médio de VIRK.

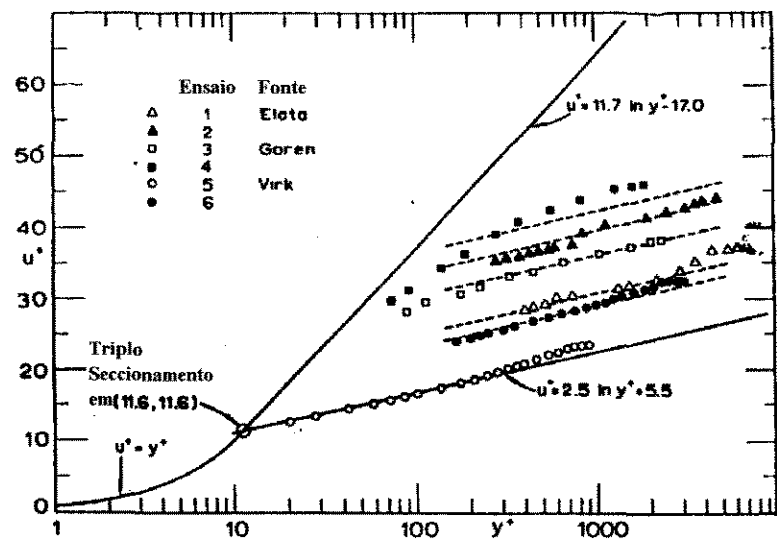


Figura 3.13 - Perfis de velocidade média durante redução de arraste. Condições experimentais estão resumidas na Tabela 3.2. Segundo VIRK (1970).

Tabela 3.2 - Condições experimentais dos perfis adimensionais de velocidade média. Segundo VIRK (1970).

ENSAIO	FONTE	DIÂMETRO ID (cm)	PITOT ID (cm)	POLÍMERO	M x 10 ⁶	CONCENTRAÇÃO (WPPM)	NÚMERO DE REYNOLDS	S ⁺
1	ELATA	5,07	0,30	GUARGUM	(0,5)	400	474000	7,8
2						800	430000	17,0
3	GOREN	5,08	0,20	PEO	(5,0)	2,5	150000	13,3
4						10	149000	19,4
5	VIRK	3,21	0,16	PEO	0,69	1000	36000	0,1
						1000	179000	6,4

NOTAS: 1 - EM TODOS OS CASOS O SOLVENTE FOI ÁGUA.
2 - VALORES DE M ENTRE PARÊNTESES FORAM ESTIMADOS.
3 - VALORES DESTA TABELA CORRESPONDEM À FIGURA 13.

3.2.3 - Pesquisas gerais sobre o transporte hidráulico de suspensões de polímeros

POREH et al (1970) observam que os polímeros mais eficientes têm a desvantagem da degradação mecânica e irreversível sob condições de escoamento turbulento. Utilizaram em seus experimentos três aditivos redutores de arraste, o oxido de polietileno e o "guar gum" além do complexo sabão CTAB com 1-naphthol. Utilizaram altas concentrações de sólidos nas determinações de redução de arraste e redução da velocidade crítica. Foram ensaiados tubos de 2,0 cm de diâmetro, um tubo de 55 cm de comprimento retilíneo para evitar efeitos de entrada, e três seções de medições de pressão espaçadas de 45 cm. As vazões foram medidas com medidor magnético. Dois tipos de areia foram utilizadas, areia de quartzo de diâmetro médio 0,9 mm e peso específico 2,61 e areia de baquelite de diâmetro médio 1,0 mm e peso específico 1,43, a areia de plástico continha um pouco de material fino.

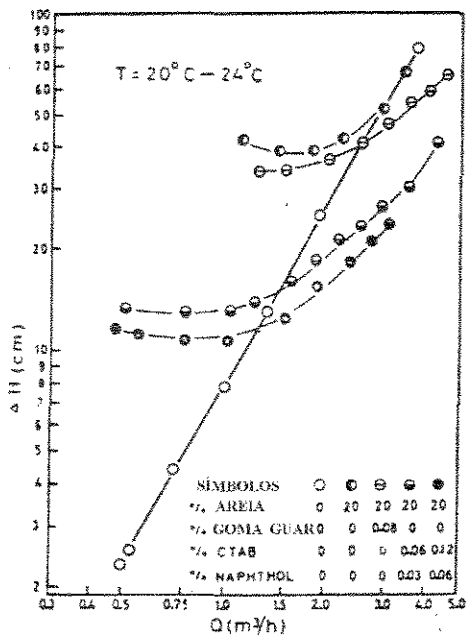


Figura 3.14 - Perda de carga para areia de quartzo ($C \approx 20\%$) para "guar gum" e complexo sabão. ΔH medido em cm de água em 68 diâmetros do duto.

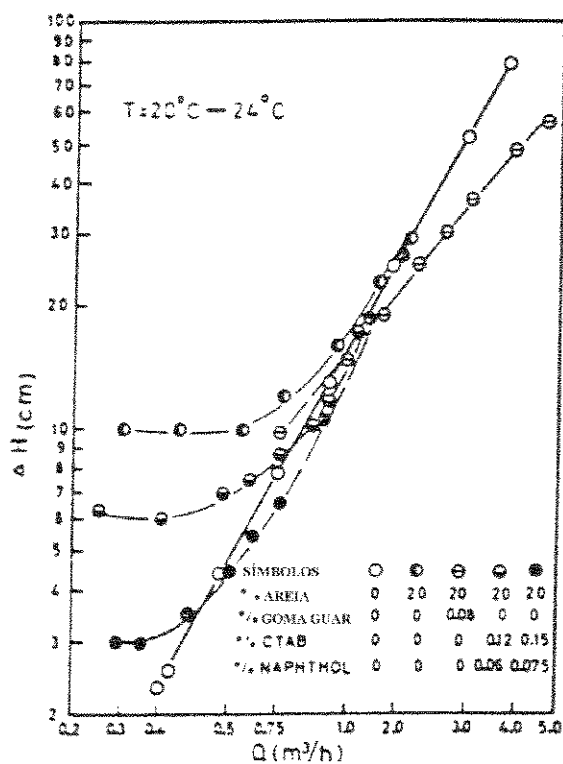


Figura 3.15 - Perda de carga para a areia de baquelite C ≈ 20%) para "guar gum" e complexo sabão. ΔH medido em cm de água em 68 diâmetros do duto.

Das observações dos autores podemos citar: "Guar gum" é um redutor de arraste moderado com redução de até 50% em concentrações de 1 000 ppm, é mais estável à degradação mecânica do que a maioria dos polímeros. O óxido de polietileno forneceu altas reduções de arraste em concentrações de 10 a 50 ppm mas sofreu degradação mecânica mais rapidamente. Os resultados para os sistemas de água e areia e 0,08% de "guar gum" com água e areia são apresentados nas Figuras 3.14 e 3.15.

Os autores observam que a perda de carga provocada por misturas constituídas pela areia mais densa é muitas vezes maior que a de menor densidade quando as vazões são baixas. Para vazões altas, as perdas de carga devido aos escoamentos de misturas constituídas pelas referidas areias, aproximam-se daquela provocada pela água limpa.

Semelhantes experimentos foram realizados com óxido de polietileno WSR-301 que apresentou maior redução de arraste para todas as vazões mas cujo efeito foi perdido completamente em poucos minutos devido à rápida degradação mecânica. A degradação na presença de sólidos é muito mais rápida do que a solução sozinha.

Outras conclusões dos autores são: Os resultados obtidos para a solução do complexo de sabão são reversíveis, isto é, os pontos obtidos com vazões baixas podem ser obtidos inicialmente e repetidos depois da obtenção dos pontos de vazões altas, pois nenhuma degradação mecânica permanente ocorreu. As velocidades críticas e de obstrução do duto na presença do complexo de sabão foi reduzida em cerca de 50%. A combinação da redução da perda de carga e a possibilidade de transporte de areia a menores velocidades com complexos de sabão indicam uma redução efetiva em perda de energia por massa transportada da ordem de 70%. A perda de carga correspondente à velocidade crítica para a solução de sabão a 0,225% foi cerca de 70% menor do que aquela provocada pela mistura de água e areia referente à sua velocidade crítica.

NG,K.S. ET AL (1980) determinaram experimentalmente o fator de atrito de escoamentos laminar e turbulento em dutos de 0,98 cm, 1,30 cm e 2,25 cm, para suspensões aquosas de Poliacrilamida (SEPARAN AP-273) e óxido de polietileno (WSR-301 e FRA). Foi encontrada uma redução de arraste máxima para os fluidos viscoelásticos no regime turbulento $f = 0,332 (Re')^{-0,55}$ para as soluções dos dois tipos de polímeros escoando num trecho retilíneo com 120D para evitar os efeitos de entrada. Os autores afirmam que os resultados concordam com a assíntota de máxima redução de VIRK e que os trechos retos de tubos maiores que 100 D verificaram as condições hidrodinâmicas totalmente desenvolvidas.

Os autores além do fator de atrito, mediram também o coeficiente de transferência de calor e observaram que o coeficiente de transferência de calor foi influenciado pela degradação do polímero muito mais rapidamente que o fator de atrito depois de diversas horas de circulação do fluido. Após o início da alteração no coeficiente de transferência de calor, algumas horas mais tarde o fator de atrito aumentou. Concluíram também que o óxido de polietileno degrada mais rapidamente que o Separan.

SELLIN et al (1982) na revisão bibliográfica sobre degradação de polímeros, observam: A perda da propriedade de redução de arraste de polímeros é conhecida ou por

envelhecimento, ou por degradação e envelhecimento é o termo normalmente usado para indicar deterioração devido às variações químicas ou físico-químicas decorrentes de armazenamento; soluções diluídas de polímero armazenadas à luz sofrem envelhecimento em poucos dias, enquanto soluções concentradas, emulsões e pó armazenados em refrigeradores sem iluminação, normalmente duram anos antes que o envelhecimento se torne significativo. Este tempo de vida útil deve-se ter em mente quando se trata de aplicações de redução de arraste. O termo degradação é usado para perda de eficiência na redução de arraste e também de outras propriedades da solução de polímero resultantes de energia mecânica fornecida à solução de polímero. Em termos práticos isto significa a passagem através de bombas ou dutos ou ambos. Enquanto a situação de degradação do polímero não é totalmente compreendida, ela pode aparecer a partir da evidência de sua grande utilidade e não se deve colocá-lo como um problema sério para as aplicações de redução de arraste, desde que a solução de polímero não seja exposta a bombeamento prolongado e que a velocidade do fluxo seja menor que 2 m/s.

Os autores observam que além da degradação, uma perda importante durante o escoamento é a adsorção do polímero sobre superfícies sólidas. Isto inclui as paredes do duto, assim como qualquer matéria particulada no fluxo. A extensão da ocorrência depende da superfície química do sistema e em particular da característica iônica do polímero usado. De qualquer modo mesmo polímeros não iônicos como o óxido de polietileno apresentam alguma adsorção, como demonstrou os testes em canalizações longas pois foi encontrado efeito de redução de arraste diferente a jusante do ponto de injeção.

Em relação à redução de arraste de polímeros, SELLIN et al (1982) consideram: Para ocorrer a redução de arraste é necessário que o escoamento na camada limite seja turbulento em característica e que as moléculas do polímero estejam presentes no fluido à uma pequena distância da parede do duto. Polímeros que fornecem boa redução de arraste são aqueles cuja molécula tem uma cadeia não ramificada e peso molecular maior ou cerca de 10^6 . Polímeros solúveis que apresentam estas características são óxido de polietileno, poliacrilamidas, carboximetil celulose e diversos outros, todos de origem sintética. Um número de polímeros naturais fornece boa redução de arraste em soluções aquosas ("guar gum" e outros extratos de plantas) mas usualmente requerem concentrações muito maiores

do que os sintéticos. Outro grupo de polímeros (incluindo polistireno) fornece bons resultados quando dissolvidos em solventes orgânicos.

Sobre as concentrações SELLIN et al observam que as concentrações ótimas variam muito com uma série de fatores. Redução máxima de arraste pode ser encontrada para pequenos dutos em pequena concentração de 10 ppm para óxido de polietileno de peso molecular 10^6 e de 100 ppm para dutos largos. Para soluções de "guar gum" são geralmente utilizadas concentrações variando de 1 000 a 5 000 ppm.

Ainda SELLIN et al observam que polímeros aniônicos e mais comumente os catiônicos poderão, com certeza, flocular partículas suspensas de caráter iônico oposto mas eles poderão também ligar-se aos íons dissolvidos de metais, particularmente os bivalentes como os de magnésio e de cálcio. Um vantagem considerável pode ser obtida se os polímeros forem aplicados em múltiplos propósitos, por exemplo em processos de esgotos os polímeros catiônicos são mais adequados para a floculação enquanto os aniônicos são melhores pela redução de atrito durante o transporte. Os aniônicos custam cerca de metade dos catiônicos.

GOLDA (1984) apud HEYWOOD (1986) desenvolveu um estudo sobre o desempenho de seis poliacrilamidas diferentes (todos comercializados pela DOW Chemical com a denominação de SEPARAN) na redução de arraste de mistura de carvão a 2,91% (partícula de diâmetro médio 2,8 mm e duto de 40 mm). Uma concentração fixada de 80 ppm foi usada e foram realizados testes de estabilidade mecânica pelo monitoramento de redução de arraste inicial e após 60 minutos. O melhor desempenho foi de SEPARAN AP-45 e conseqüentemente foi muito utilizado em uma série de testes para explorar os efeitos da concentração de carvão e polímero sobre a redução de arraste. A redução de arraste atingiu um máximo com o aumento progressivo da concentração do polímero. A concentração de polímero que forneceu a máxima redução de arraste foi maior para mistura de carvão do que para a água. A máxima redução de arraste também diminuiu progressivamente com o aumento da concentração de carvão.

HATTORI et al (1988) implantaram fibras na parede interna de um duto e verificaram grandes reduções de arraste para altas velocidades de solução de polímero, reduções de arraste estas maiores do que em dutos lisos. Fora dos valores de altas

velocidades o duto de fibra implantada não apresenta vantagens de redução de arraste em relação ao duto liso.

LODES & MACHO (1989) pesquisaram o efeito da concentração de polivinilacetato (PAVC) em água no fator de atrito e no perfil adimensional de velocidade. Utilizaram comprimento retilíneo de 91D a partir da entrada do duto para assegurar um perfil totalmente desenvolvido. Apesar do baixo peso molecular do polímero, $1,9.10^4$, encontraram reduções de arraste significantes, e em maiores concentrações o grau médio de redução de arraste foram 60% maiores do que 500 wppm de PAVC com 80% de grau de saponificação. Os autores também determinaram a espessura da camada elástica de $y_e^+ = 74,8$ para concentração de 100 wppm e 80% de grau de saponificação.

LODESOVÁ & LODES (1989) determinaram as espessuras da subcamada elástica de suspensões de hidroxietilcelulose (HEC) e óxido de polietileno (PEO). As medições de velocidade foram realizadas por anemômetro de laser- Doppler. A determinação da subcamada elástica (y_e^+) foi realizada pela utilização do perfil adimensional de velocidades médias e através da interseção da lei de distribuição junto à parede de Newton obtida para os polímeros com o perfil limite máximo de VIRK. Determinaram os valores de $\Delta y_s^+ = (y_e^+ - 11,6)/11,6$ apresentados nas Tabelas 3 e 4. Também nestas Tabelas 3.3 e 3.4 são apresentados os valores dos coeficientes A e B da Equação 3. 40 para os dois polímeros.

Tabela 3.3 - Valores médios de Δy_s^+ , A e B em função da concentração de HEC em água à temperatura de 20° Celsius.

C_w	A	B	Δy_s^+ (%)
0	2,62	5,53	0
0,001	2,85	5,45	5,3
0,002	2,93	5,44	7,4
0,003	3,07	5,40	10,3

Tabela 3.4 - Valores médios de Δy_s^+ , A e B em função da temperatura para PEO em água e concentração $C_w=0,0001$.

T(° C)	A	B	Δy_s^+ (%)
20	2,52	6,81	15,3
30	2,58	7,42	25,7
40	2,64	8,11	44,2

COIADO, E.M. (1989) pesquisou a redução de energia consumida por uma instalação de recalque através da adição de polímeros e dentre diversas conclusões obtidas, destacam-se: o polímero, do tipo aniônico, tem a capacidade de homogeneizar as misturas sólido- líquidas no escoamento turbulento em duto. A mistura é mais homogênea para maiores concentrações de polímero. A velocidade de sedimentação é inversamente proporcional à concentração do polímero. A turbulência quebra a atração eletroquímica entre as partículas sólidas. A presença do sólido na mistura em escoamento diminui a capacidade redutora do polímero. Esta diminuição deve-se ao rápido aumento da temperatura, sendo mais significativa à medida que se aumenta a concentração do sólido. Para determinada solução de polímero, não foram verificadas variações sensíveis no fator de atrito ao aumentar a concentração de areia. Para suspensões de polímero com concentração de 15,3% de areia, ocorreu diminuição da velocidade crítica.

O autor, adicionalmente, concluiu que: Existe um par de valores, comprimento virtual da linha de recalque e concentração do polímero, para o qual, o valor da energia elétrica economizada começa a ultrapassar o custo do polímero adicionado. No recalque das soluções utilizadas obteve-se comprimento virtual $L_v=2\ 000$ metros e $C=100$ ppm. Para água e areia em concentrações volumétricas de 7,3%, obteve-se $L_v=5\ 100$ metros e $C=100$ ppm. Para água e areia em concentrações volumétricas de 15,3%, obteve-se $L_v=6\ 200$ metros e $C=200$ ppm. Considerando apenas a relação custo do polímero/valor da energia elétrica economizada, num sistema fechado de bombeamento, mesmo para linhas de recalque curtas, a opção por uso de polímeros é economicamente muito vantajosa.

SELLIN et al (1982), afirma que os primeiros resultados que sugerem a aplicação de polímero em esgotos, foram publicados por Forester et al em 1969. Os testes de Forester

et al foram conduzidos em tubos de diâmetro igual a 254 mm, e dos resultados encontrados concluiu-se que: 1) A injeção de resíduos com grande concentração de sólidos, é um método prático e eficiente de redução do atrito através de polímeros na água, 2) Com a redução significativa do atrito, esta técnica resulta em grandes benefícios aos sistemas de condução de água sujeitos à sobrecargas ocasionais. Os resultados foram obtidos inicialmente em tubos de grandes diâmetros.

SELLIN (1982) afirma também que existe uma grande quantidade de dados coletados sobre redução de arraste em tubos de pequenos diâmetros, não excedendo 50 mm, e que relativamente são poucos os resultados obtidos em grandes diâmetros para as condições industriais.

YU, LI-REN (1991) introduziu um novo conceito para o comprimento de mistura de Prandtl e sugeriu a expressão: $l' = c_1 y + \Delta$, onde $(c_1 y)$ reflete o efeito de parede e Δ é uma variável de correção que é relacionada a dois fatores, o primeiro deles é a proporção direta à perda de energia, ou seja quanto maior a dissipação de energia mecânica, maior a intensidade de turbulência e comprimento de mistura, e o segundo estabelece proporção com o valor médio das dimensões dos vórtices. Assim deduziu uma equação única sobre toda a seção transversal do duto, em substituição às equações válidas para as regiões de subcamada laminar e centro turbulento de von Kármán. Apresentou dois exemplos de aplicação à sua equação de distribuição de velocidade: em dutos rugosos e em soluções de polímeros. Apresenta suas conclusões onde afirma que todos os resultados concordaram bem com os obtidos classicamente e com os dados experimentais do autor.

BEWERSDORFF & THIEL (1993) realizaram medições de perda de carga e perfis adimensionais de velocidade em dois dutos de rugosidade artificiais diferentes entre si e com soluções de polímeros e surfactante. As declividades do perfil de velocidade nas regiões de subcamada elástica e no centro turbulento permaneceram inalteradas pelo arranjo das rugosidades, o que é uma indicação de que a influência hidrodinâmica da rugosidade se restringe à região próxima à parede do duto. A solução redutora de arraste de surfactante exibiu redução de arraste no duto liso e nos rugosos, maiores que os da assíntota de máxima redução de VIRK. A solução de surfactante foi obtida pela dissolução equimolar de $C_{14}TABr$ e NaSal.

ANDERSON, G.W. et al (1993) pesquisaram os efeitos de superfícies com ranhuras ("riblets") da 3M em transporte de suspensões diluídas de polímeros. As ranhuras ("riblets") utilizadas eram do tipo redutores de atrito de superfície na turbulência. Concluíram que a redução de arraste apresentada pelo polímero foi semelhante ao desempenho do solvente no duto com ranhuras. Adicionalmente observam que o escoamento do solvente em altos números de Reynolds sugerem que as ranhuras não apresentam o típico escoamento totalmente rugoso.

3.3 - MODELOS REOLÓGICOS

Valores de tensão de cisalhamento (τ) e do gradiente de velocidade ($\Omega = du/dy$) podem ser determinados experimentalmente por uma variedade de instrumentos. Os mais comuns são o viscosímetro de tubo capilar e o viscosímetro de cilindros concêntricos.

Em WASP et al (1977) encontramos três definições de viscosidade além da conhecida viscosidade Newtoniana. Ou sejam: (i) viscosidade aparente μ_a que é definida como:

$$\mu_a = \tau / (du/dy) \quad (3.43)$$

(ii) viscosidade efetiva em dutos que é definida por:

$$\mu_e = \tau / (8 u_m / D) \quad (3.44)$$

(iii) viscosidade em altos valores de gradiente de velocidade (du/dy), μ_∞ que pode ser igual ao coeficiente de rigidez de fluidos descritos pelo modelo plástico de Bingham o qual será descrito posteriormente.

Os dados reológicos obtidos, podem ser utilizados diretamente na caracterização de um fluido ou para prever seu comportamento em certas condições. É conveniente e usual a adoção de um modelo ou equação de representação. DARBY, R (1986) afirma que embora haja algum grau de dedução lógica nos modelos, eles têm origem empírica.

De DARBY, R (1986), apresenta diversos modelos reológicos, dos quais a seguir serão representados os modelos: lei de potência ("power law" ou modelo "Ostwald-de Waele"), plástico de Bingham e Casson . As respectivas equações dos modelos são apresentadas a seguir.

Modelo Lei de Potência:

$$\tau = m \Omega^n \quad (3.45a)$$

$$\mu (\Omega) = m \Omega^{n-1} \quad (3.45b)$$

$$\mu (\tau) = m^{1/n} \tau^{(n-1)/n} \quad (3.45c)$$

Modelo Plástico de Bingham:

$$\tau = \tau_0 + \mu_\infty \Omega \quad (3.46a)$$

$$\mu(\Omega) = \tau_0/\Omega + \mu_\infty \quad (3.46b)$$

$$\mu (\tau) = \mu_\infty \tau / (\tau - \tau_0) \quad (3.46c)$$

Modelo Casson:

$$\tau^{1/2} = \tau_c^{1/2} + (\mu_c \tau)^{1/2} \quad (3.47a)$$

$$\mu(\Omega) = [(\tau_c/\Omega)^{1/2} + \mu_c^{1/2}]^2 \quad (3.47b)$$

$$\mu(\tau) = \mu_c \tau / (\tau^{1/2} - \tau_c^{1/2})^2 \quad (3.47c)$$

Cada modelo foi representado nas seguintes formas: $\tau = f(\Omega)$, $\mu = f(\Omega)$ e $\mu = f(\tau)$, onde $\Omega = du/dy$

A lei de potência contém dois parâmetros : n = índice de escoamento ou "flow index", e m = consistência. Ele pode representar o comportamento Newtoniano ($n=1$), o comportamento de cisalhamento fraco ou "shear thinning" ($n < 1$) e o comportamento de cisalhamento forte ou "shear thickening" ($n > 1$) e m é o valor da viscosidade aparente quando $\Omega = 1$. Dados experimentais (de τ versus Ω , ou de μ versus Ω , ou de μ versus τ que forneçam uma reta em um gráfico log-log podem ser representados por este modelo.

De acordo com DARBY (1986), embora muitos materiais exibam uma região tipo lei de potência sobre um intervalo de gradiente de velocidade e, em utilização por cerca de uma a duas décadas, o modelo falha para muito altos e/ou muito baixos gradientes de velocidade. Cita que por exemplo, o modelo "shear thinning" ($n < 1$) que prevê $\mu \rightarrow \infty$ conforme $(\Omega \text{ ou } \tau) \rightarrow 0$, e $\mu \rightarrow 0$ quando $(\Omega \text{ ou } \tau) \rightarrow \infty$, ambos os quais não são realísticos para materiais sem nenhuma tensão inicial de escoamento ("yield stress" ou τ_0).

Assim este modelo é conveniente na representação de dados sobre um certo intervalo finito, mas não é confiável em extrapolações além do intervalo de medições.

De acordo com DARBY (1986), podemos citar: Os modelos plástico de Bingham e Casson são qualitativamente semelhantes, pois ambos contém dois parâmetros: um "yield stress" (respectivamente τ_0 ou τ_c) e uma viscosidade limite (μ_∞ ou μ_c). Ambos exibem comportamento "shear thinning" e ambos se aproximam do comportamento Newtoniano com a viscosidade μ_∞ ou μ_c conforme τ ou Ω aumenta. Também o $\log \mu$ versus $\log \Omega$ para ambos se aproxima de uma reta de declividade -1 conforme Ω se aproxima de zero. Polpas concentradas e suspensões normalmente exibem uma aparente tensão inicial de

escoamento ou "yield stress" resultante da resistência devido ao contato interparticular no estado de repouso. Assim embora estes modelos sejam matematicamente simples eles exibem comportamento próprio limitante nos dois extremos de gradiente de velocidade mas são muito vantajosos na representação das propriedades viscosas das polpas e suspensões. O modelo plástico de Bingham é o mais popular nesta consideração.

Por causa das limitações nas medidas de viscosidade a um número finito de condições, não é muitas vezes possível observar o comportamento viscoso limite em taxas muito altas ou muito baixas de gradiente de velocidade.

DARBY (1986) fornece exemplos de dados sobre viscosidade aparente versus tensão de cisalhamento para solução de "lignite" em metanol nas concentrações de 45% e 60% de sólidos em peso. Os sólidos têm uma distribuição grosseira de partículas com 90% menores que 300 μm . As concentrações volumétricas correspondentes de sólidos nestas amostras são de 0,43 e 0,58 respectivamente. As Figuras 3.16 e 3.17 representam estes dados.

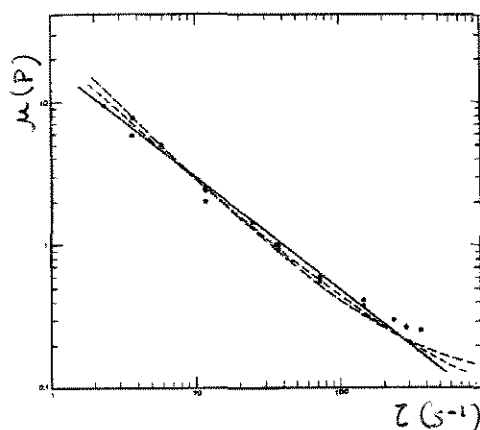


Figura 3.16 - Viscosidade versus τ , para 45% "lignite" em metanol, $C=0,43$.

———— Melhor ajuste pela lei de potência

----- Melhor ajuste pelo plástico de Bingham

----- Melhor ajuste pelo modelo de Casson

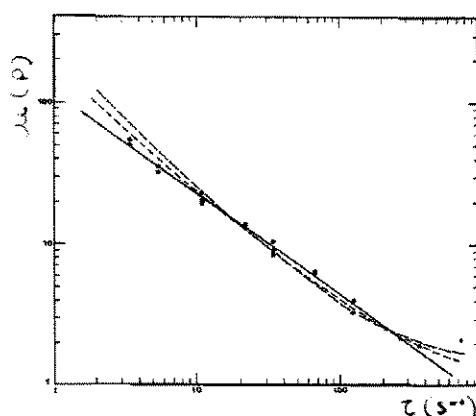


Figura 3.17 - Viscosidade versus τ , para 60% "lignite" em metanol, $C=0,58$.

- _____ Melhor ajuste pela lei de potência
- Melhor ajuste pelo plástico de Bingham
- .-.-.-.- Melhor ajuste pelo modelo de Casson

As seguintes conclusões foram observadas por DARBY(1986): O melhor ajuste de Casson sempre cai entre a lei de potência e o modelo de Bingham. Para ambas as séries de dados, os três modelos provêm um aceitável ajuste de dados. As diferenças não são suficientemente grandes para serem significativas. O fato é que mesmo que os dados cubram um intervalo de gradiente de velocidade no decorrer de duas décadas, ainda não é possível discriminar desambiguidades entre os modelos que melhor representam os dados. Assim, se o uso dos dados é restrito ao intervalo de gradiente de velocidade ou tensão de cisalhamento coberto pelas medições, deve ser indiferente a escolha do modelo desde que todos eles proverão um aceitável ajuste aos dados. Contudo se for necessário extrapolações além do intervalo de medições para o propósito de aplicação, pode-se esperar que os modelos de plástico de Bingham ou Casson serão mais confiáveis devido a seu mais realístico comportamento limite.

WASP et al (1977) fazem as seguintes observações: A escolha de um modelo reológico, isto é, Bingham ou lei de potência, depende essencialmente da preferência do projetista. Não existem evidências conclusivas a sugerir, qual é o melhor, até que seja feita a correlação dos dados. Há entretanto alguns pormenores que fazem o modelo de Bingham ser o de maior facilidade em utilização. Também as unidades de m são expressas em termos do expoente n , por exemplo para um fluido com $n=0,7$ o valor de m

pode ser expresso como sendo $\text{lbf} \cdot \text{s}^{0,7}/\text{ft}^2$ e se $n = 0,4$ as unidades de m ficam $\text{lbf} \cdot \text{s}^{0,4}/\text{ft}^2$. As constantes no modelo de Bingham entretanto são familiares, tanto de viscosidade como de tensão de cisalhamento.

4. - MATERIAL E MÉTODO

4.1 - Bancada de ensaio

A bancada de ensaio, anteriormente utilizada por COIADO (1989) com algumas modificações possibilitou a concretização dos objetivos propostos nesta pesquisa. A bomba principal foi substituída por uma bomba de maior potência, acoplada a um motor de 20 CV, com voluta e rotor revestidos de borracha natural. Todos os registros foram substituídos por válvulas também revestidas por borracha natural.

Na Figura 4.1 apresenta-se a bancada de ensaios utilizada neste trabalho de pesquisa.

Na Foto 4.1, apresenta-se uma foto da bancada de ensaios.

Para a determinação da perda de carga e definição da velocidade crítica de sedimentação, foram instalados em série, trechos horizontais de canalizações de PVC e de acrílico transparente com três polegadas de diâmetro.

A influência do polímero nas distribuições verticais de velocidade e concentração foi investigada na seção transversal do trecho transparente onde instalou-se um tubo de Pitot. O tubo de Pitot, além de realizar medições de velocidade pontual, também executou trabalho de sonda na retirada de amostras para medições de concentração pontual.

A seguir descreve-se os componentes físicos da bancada de ensaios.

4.1.1 - Bomba principal

Trata-se de bomba centrífuga horizontal de entrada e saída respectivamente quatro e três polegadas de diâmetro, rotor semi- fechado com 250 mm de diâmetro. A voluta e rotor foram revestidos de borracha para que não sofram desgastes por efeitos abrasivos.

A bomba principal ASH-PUMP, rotação de 1890 rpm, vazão de 110 m³/h foi acoplada a motor elétrico de indução trifásico WEG, modelo 160M 0495, 1760 rpm, 60 Hz, de 20 CV.

A bomba principal apresenta os seguintes valores nominais: vazão de 110 m³/h, rotação de 1890 rpm, eficiência de 63%, carga de 22 m.c.l.

P L C	COMANDO LÓGICO PROGRAMADO
Ⓐ	BOMBA ACOPLADA A UM MOTOR ELÉTRICO
Ⓜ	REGISTRO
Ⓟ	TUBO DE PITOT

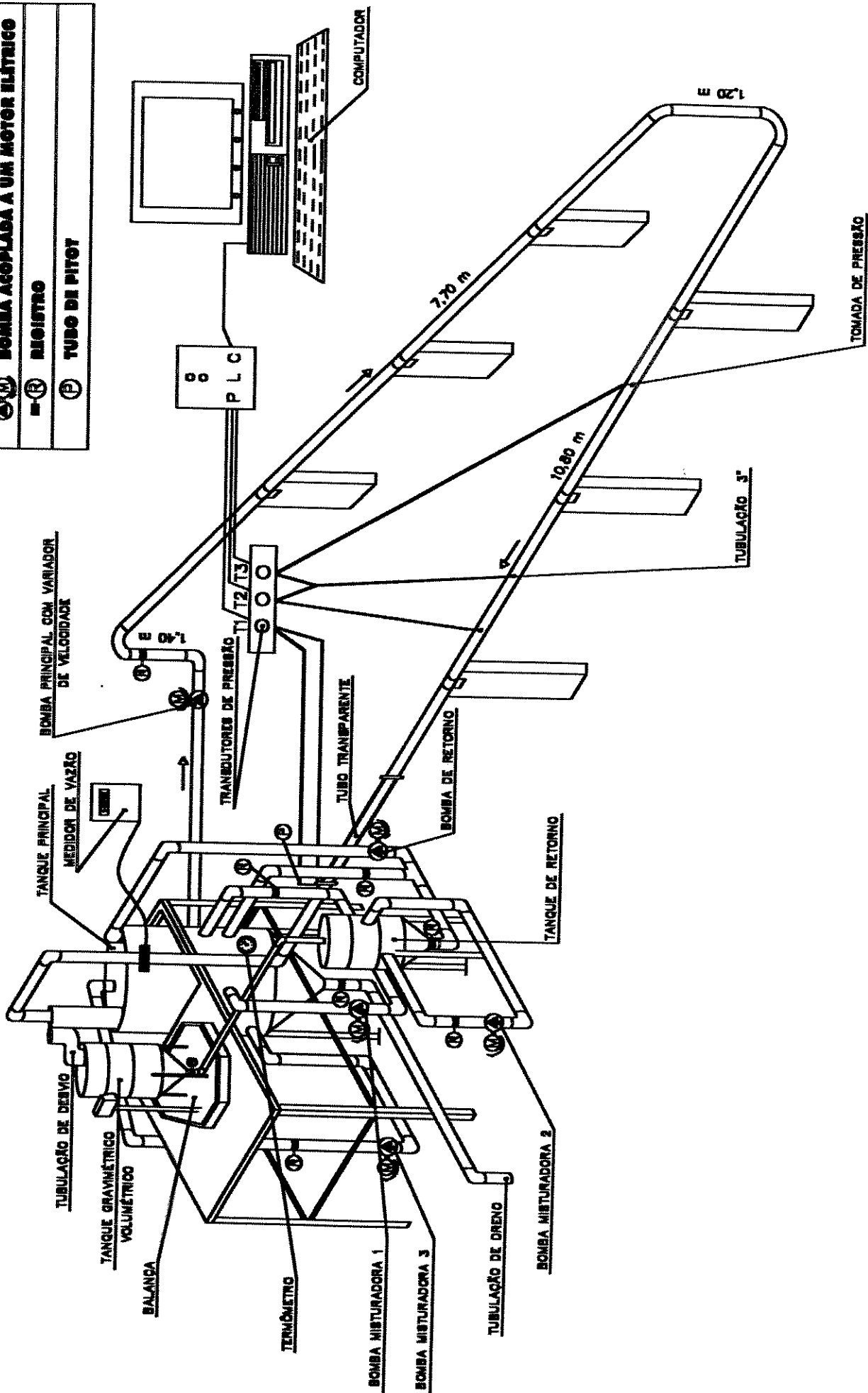


Fig. 4.1 – BANCADA DE ENSAIOS

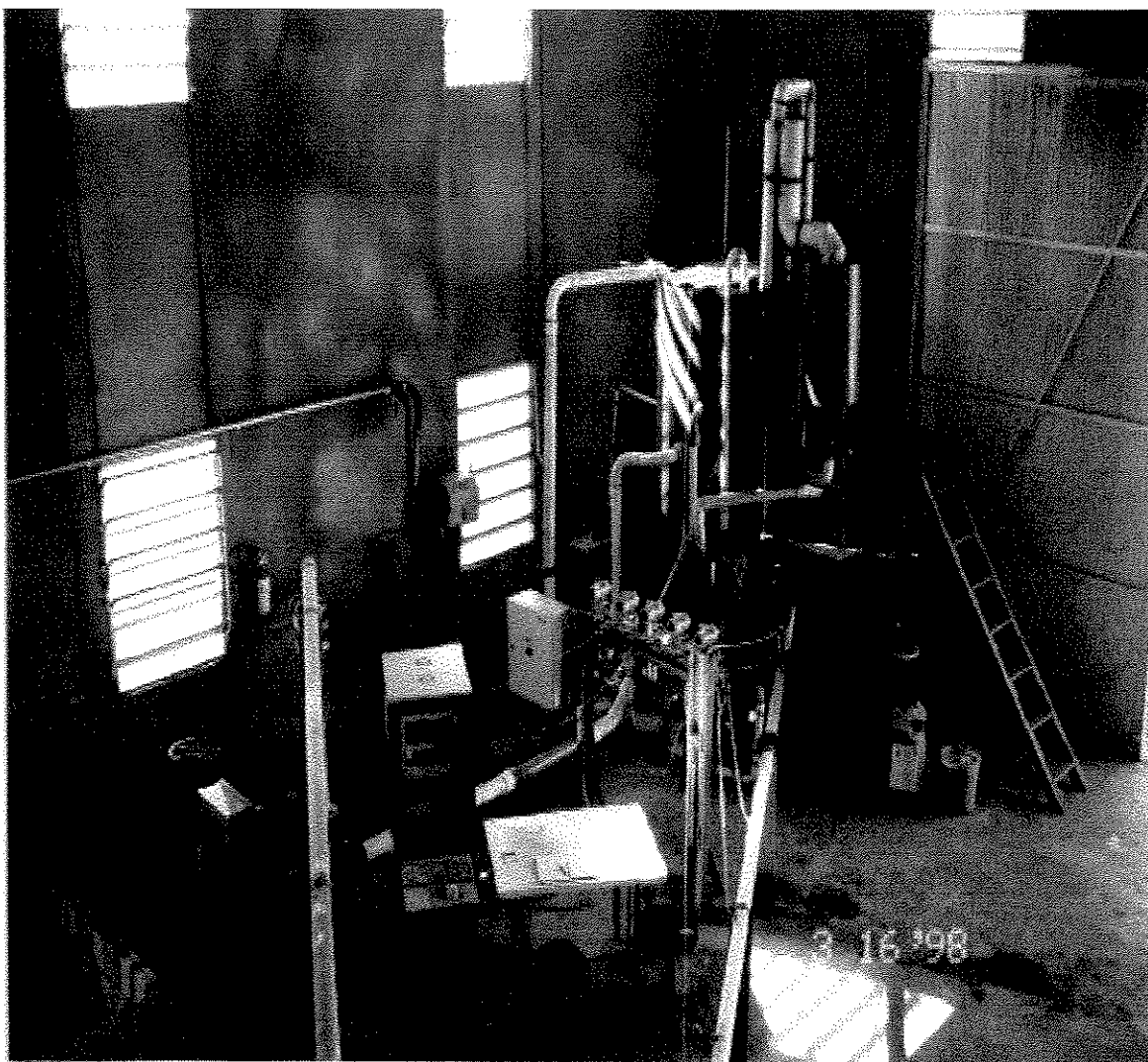


Figura 4.2 Vista geral da bancada de ensaios

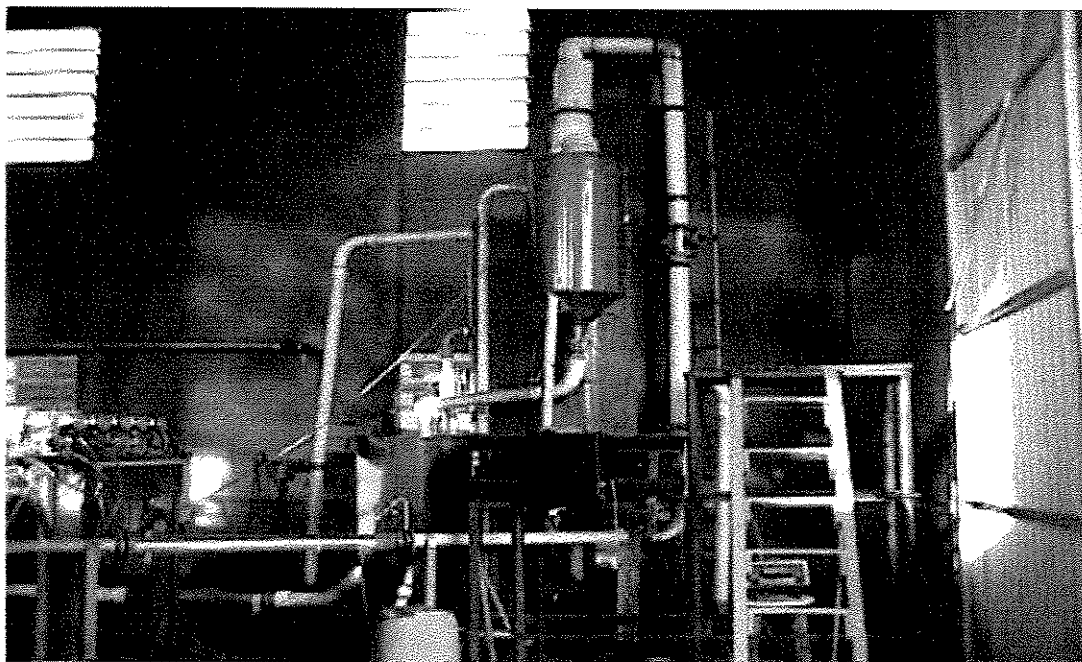


Foto 4.1 – Vista da bancada de ensaios

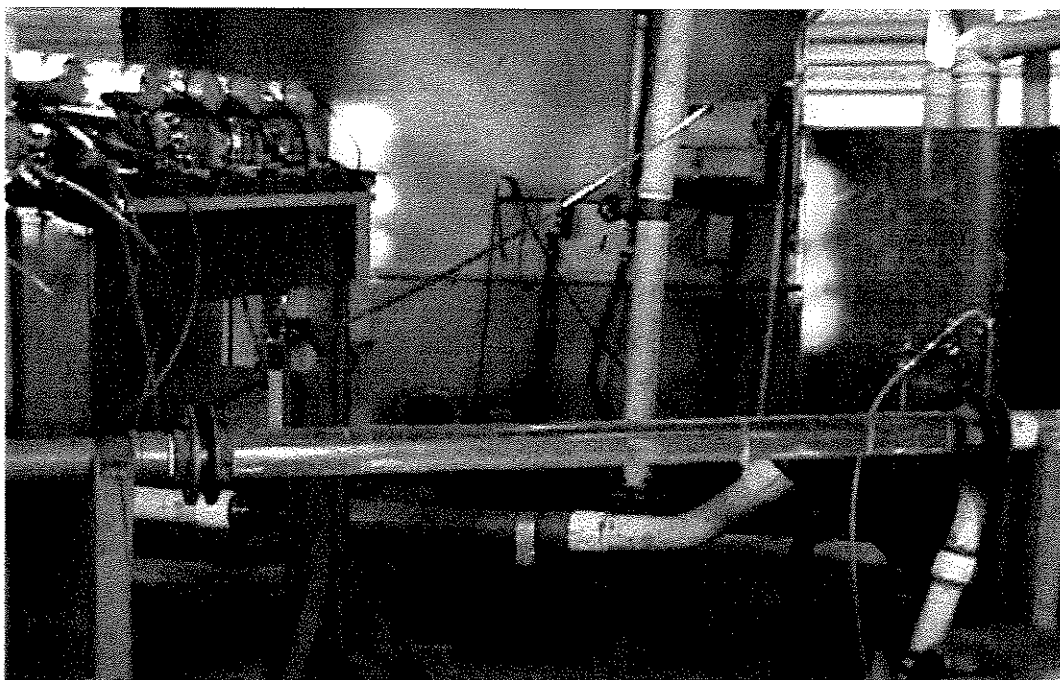


Foto 4.2 – Vista do trecho transparente de acrílico e do tubo de Pitot.

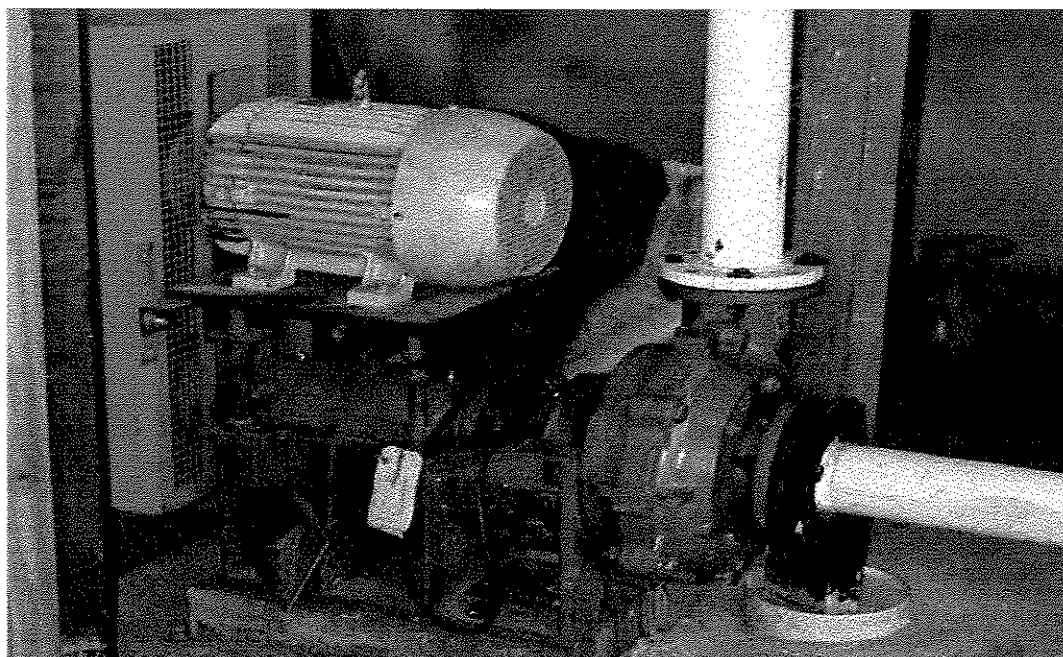


Foto 4. 3 – Vista da bomba principal

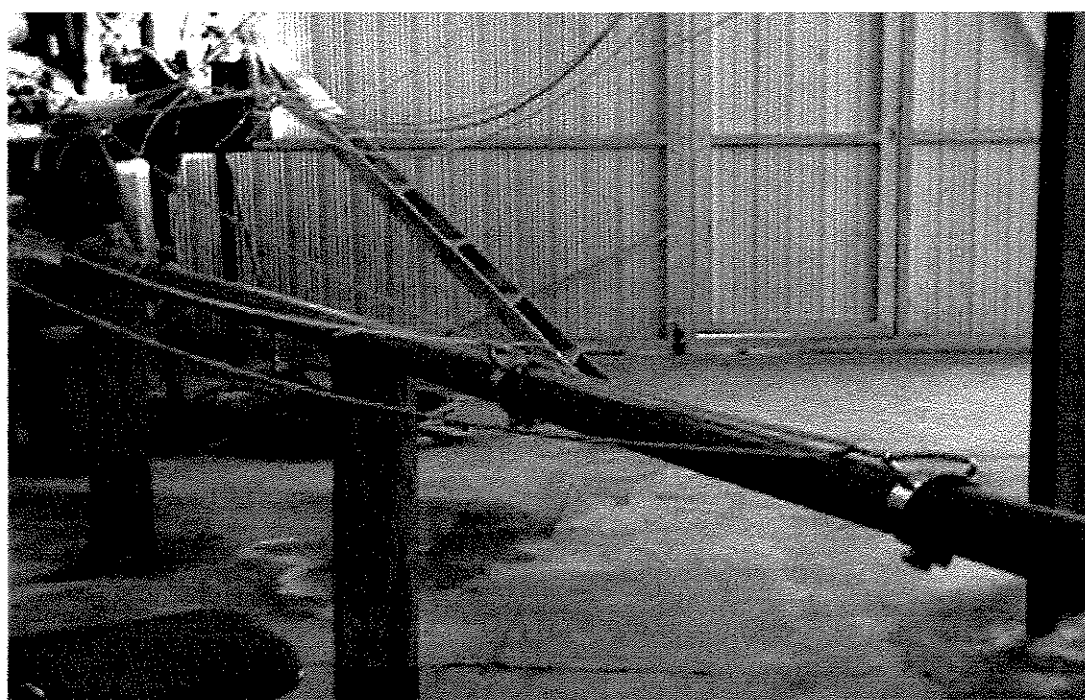


Foto 4.4 – Vista do trecho horizontal de PVC com três polegadas de diâmetro

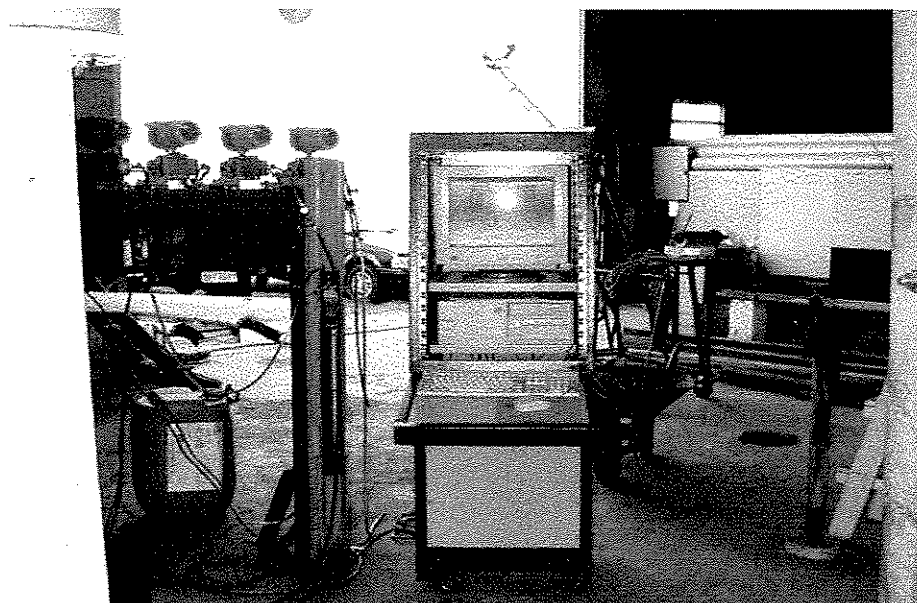


Foto 4.5 – Vista do sistema de aquisição de dados

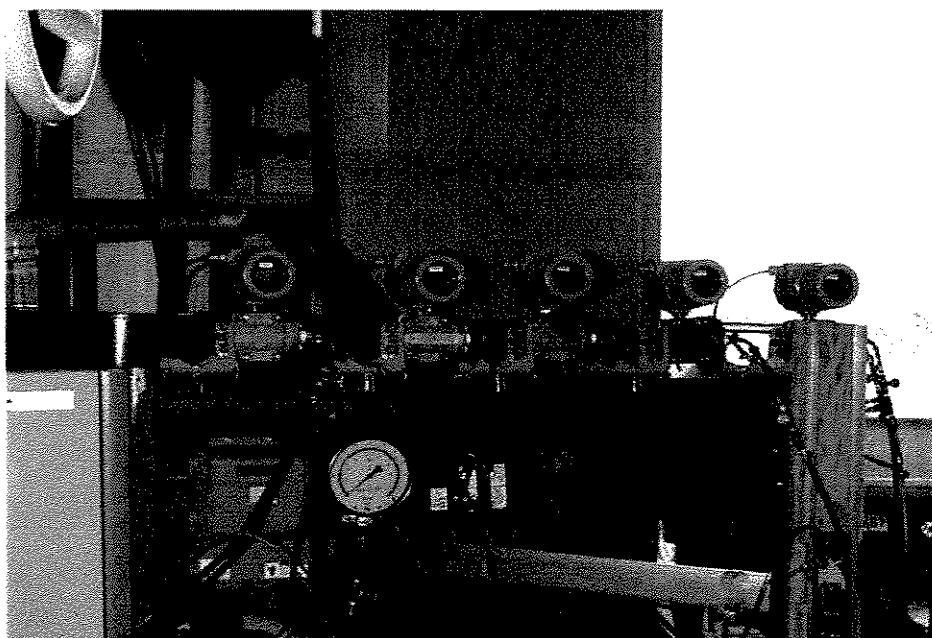


Foto 4.6 – Vista dos transdutores de pressão

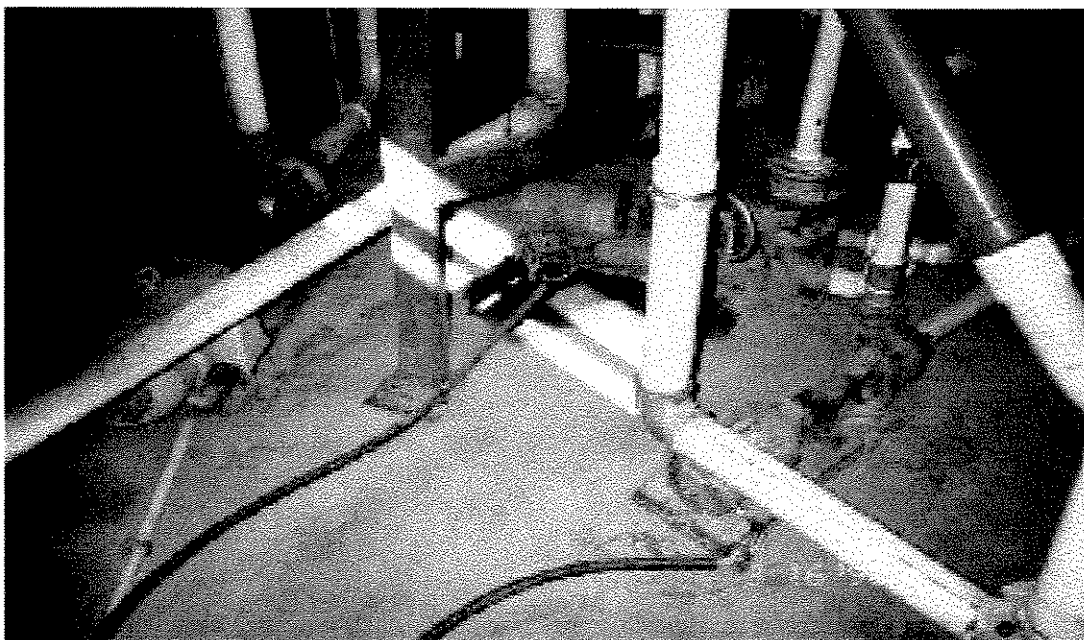


Foto 4.7 – Vista das bombas misturadoras 1 e 2 e da bomba de retorno

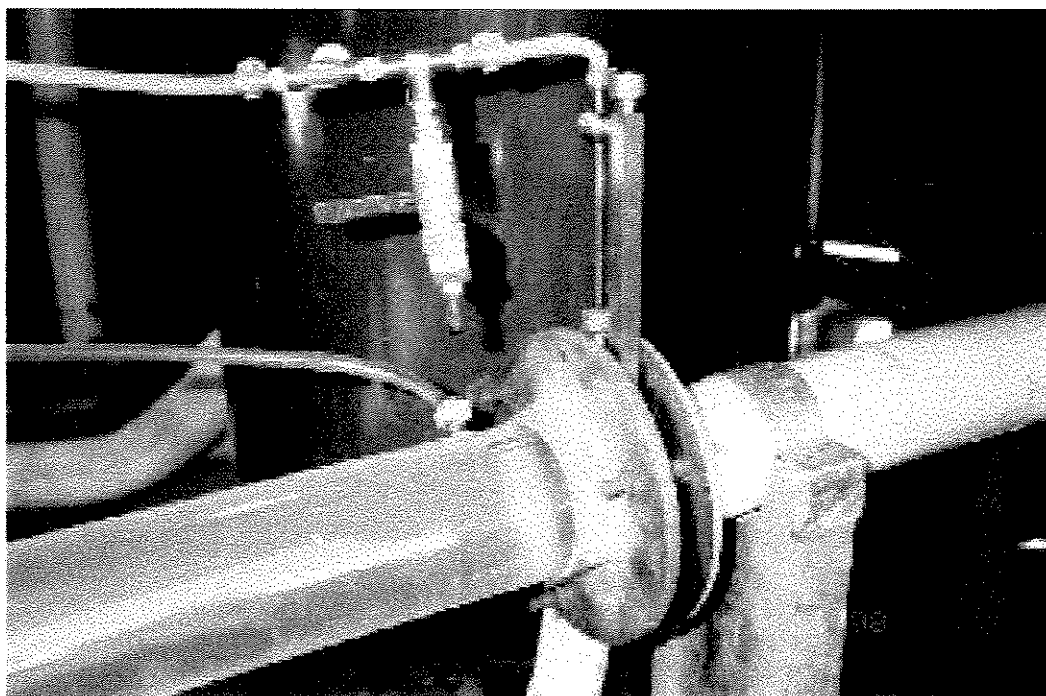


Foto 4.8 – Vista do tubo de Pitot

A bomba principal encontra-se representada na Foto 4.3.

4.1.2 - Bomba misturadora 1

Trata-se de bomba centrífuga, rotor semi- fechado, KSB, tipo 800.14, 1800 rpm, com 150 mm de diâmetro revestida de borracha natural. Terá a função de retirar a mistura de um ponto localizado na metade superior do tanque principal, injetando-a no sentido nível-fundo, de maneira a manter a mistura homogênea em todo o reservatório.

A bomba misturadora 1 foi acoplada a um motor elétrico, trifásico WEG, 3500 rpm, 15 CV.

A bomba misturadora 1 apresenta-se na Foto 4.7.

4.1.3 - Bomba misturadora 2

Realiza misturação do conteúdo do tanque de descarga ou tanque de retorno.

Será uma bomba centrífuga, rotor semi-fechado, LENZ, tipo 800.10, 3600 rpm, 1 HP, com 100 mm de diâmetro. Essa bomba succionou a mistura do tanque de descarga, recalando-a de volta ao próprio tanque de descarga após a realização de medidas volumétricas/gravimétricas. Esta bomba foi acoplada a motor TAURUS S.A., de 1CV, 380V/220V, 2800/3400 rpm

Esta bomba encontra-se apresentada no Foto 4.7

4.1.4 - Bomba Misturadora 3

A finalidade desta bomba é de auxiliar a bomba misturadora 1 na homogeneização da mistura dentro do tanque principal. Esta bomba foi colocada na ocasião de ensaios com a areia A, mais grossa

A bomba, a misturadora 3, bomba Lenz, tipo 800.14, com motor de 3 HP, 1800 rpm, foi adaptada ao reservatório para melhor homogeneização da mistura de (água + areia A). A bomba 3 foi acoplada a um motor elétrico trifásico modelo C653E, de 10 CV, 1710 rpm. O

ponto de injeção da mistura dentro do reservatório também foi transferido para uma região mais central.

4.1.5- Bomba de retorno

Possui dupla função, a primeira, com o registro aberto, realiza misturação no tanque principal, succionando de um ponto médio do tanque principal e recalcando a mistura de volta ao tanque principal e a segunda função, com o registro fechado succiona do tanque de retorno ou de descarga e recalca para o tanque principal.

É centrífuga, LENZ rotor semifechado, , com 80 mm de diâmetro, 3600 rpm, e 3 HP.

A bomba de retorno foi acoplada a um motor elétrico trifásico KHOLBACH S.A., modelo KT111A, 2800 rpm, de 3 CV.

Está representada na Foto 4.7.

4.1.6 - Canalização de sucção

A canalização de sucção é de PVC rígido com quatro polegadas de diâmetro, une o reservatório principal à bomba principal.

4.1.7 - Canalização de recalque

A canalização de recalque tem os seguintes componentes: um trecho vertical de ferro fundido com 1,5 m de comprimento e 4 polegadas de diâmetro, um registro de 3 polegadas revestido de borracha para suportar o desgaste devido aos sedimentos. Após o registro, a canalização passa a ser de PVC de 3 polegadas e por uma curva de 90° muda para horizontal com 15 m de comprimento, volta a ser vertical com 1,1 m de comprimento passando novamente a ser horizontal com 12,6 m de comprimento. A canalização torna a mudar de direção e de diâmetro passando a vertical com 4 polegadas onde se encontra instalado o medidor eletromagnético de vazão, retornando ao tanque principal ou ao tanque de medidas gravimétricas/volumétricas através do desviador rotacional de fluxo.

O trecho de 3 polegadas, na horizontal com 12,6 m de comprimento, é constituído de 9,3 m de PVC rígido seguido de 1,3 m de tubo de acrílico transparente para visualização do comportamento dos sedimentos e seguido de 2,0 m de tubo PVC.

O comprimento retilíneo de tubo desde a curva de 90° até a primeira tomada de pressão do diferencial de pressão de 2 metros de tubo é de 56 diâmetros do tubo.

O comprimento retilíneo de tubo desde a curva de 90° até a primeira tomada de pressão do diferencial de pressão de 1 metro de tubo (J) é de 82 diâmetros do tubo. Para transporte de sólidos não coesivos em água, esta distância deve ser de 50D GOVIER & AZIZ (1972) e Colwell & Shook (1988). Para soluções de polímero, NG, K.S. et al (1980) recomenda 100D, porém devido às limitações no espaço físico do laboratório, não foi possível atingir este valor. Porém encontra-se na literatura autores como LODES & MACHO (1989) que utilizaram 91D e obtiveram perfil totalmente desenvolvido e Hattori, H. et al (1988) que utilizaram 26D em tubos com implante de fibras e soluções poliméricas e não observaram diferença nos valores observados de perda de carga, principalmente na região de altos números de Reynolds.

A vista do Tubo de PVC de 3 polegadas, encontra-se representada na Foto 4.4, e a vista do tubo transparente de acrílico, na Foto 4.2.

4.1.8 - Desviador rotacional de fluxo

Permite que o fluxo seja desviado do reservatório principal, para o tanque de medidas gravimétricas/ volumétricas. O desvio do fluxo para o tanque gravimétrico/volumétrico tem a finalidade de determinação da concentração média do sólido presente no fluxo.

4.1.9 - Seção de medidas de concentração e velocidade pontuais

A seção de medidas de concentração e velocidade pontual foi localizada no trecho de canalização transparente onde instalou-se o tubo de Pitot, que ora funcionou como medidor de velocidades, ora funcionou como sonda de concentração retirando por sifonagem do ponto desejado, amostras de mistura em escoamento. Dois pontos desta

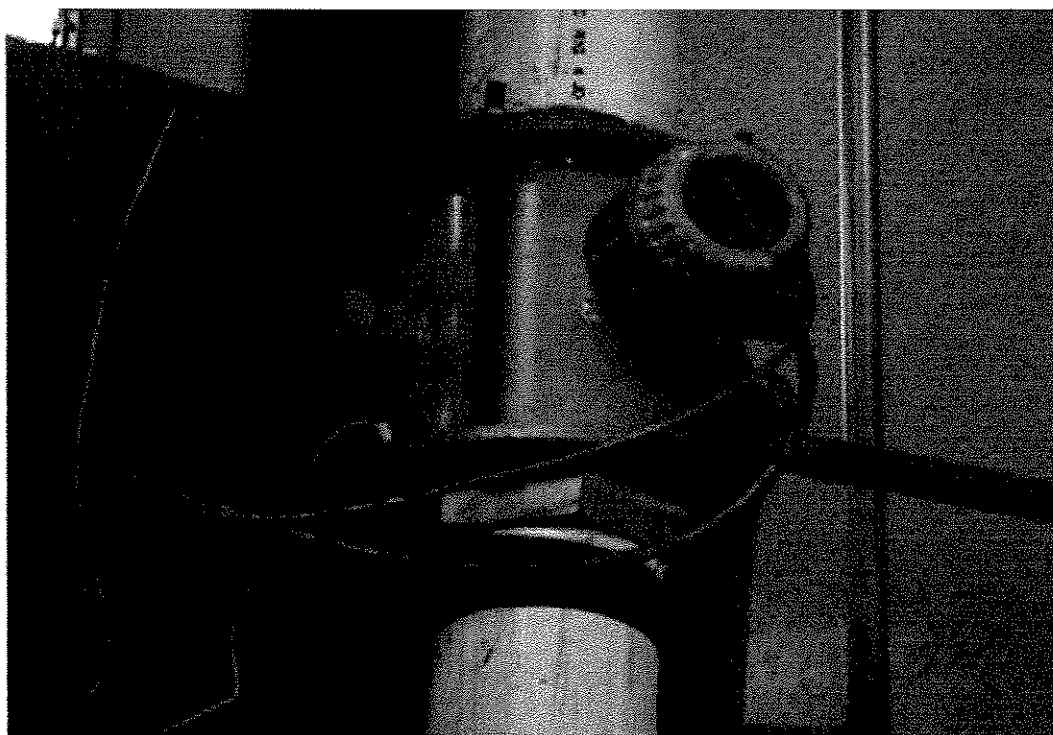


Foto 4. 9 – Vista do medidor de vazão eletromagnético.

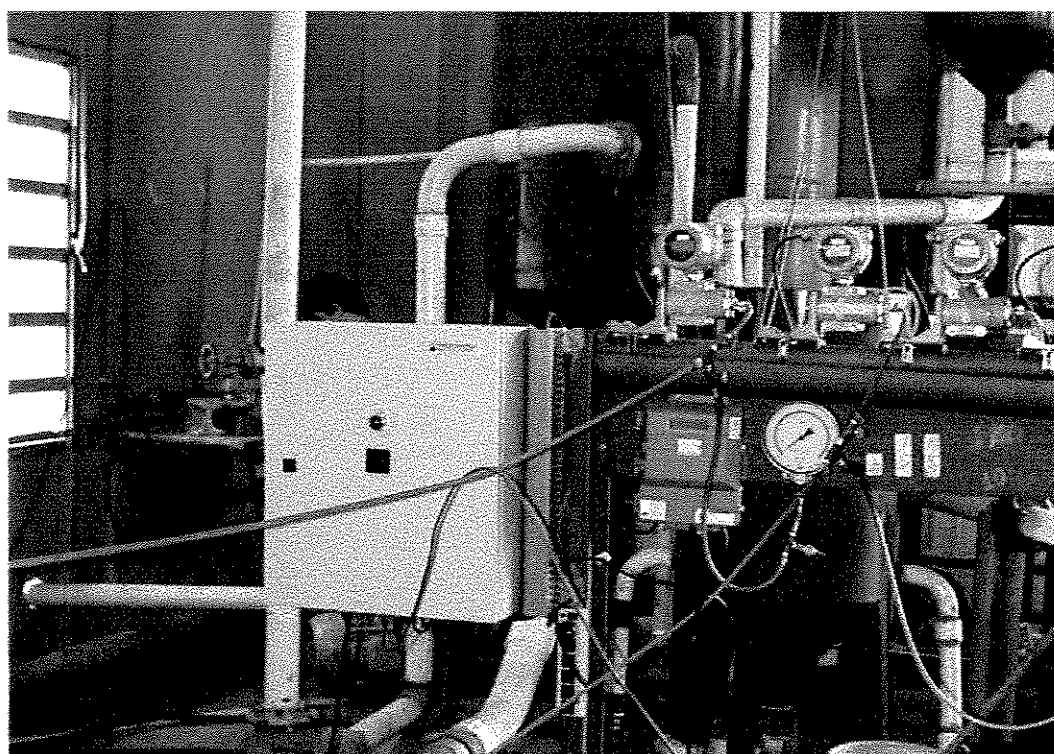


Foto 4.9 – Vista da central de aquisição de dados.

seção, um localizado ao tubo de Pitot, e outro localizado no tubo transparente de acrílico, serão ligados a um transdutor diferencial de pressão indicando a diferença de pressão entre os dois pontos (parede do tubo e ponto de estagnação do tubo de Pitot), ou seja, indicando a taquicarga do ponto desejado.

O tubo de Pitot se apresenta nas Fotos 4.2 e 4.8.

4.1.10 - Reservatório principal

É cilíndrico-cônico com capacidade para 2000 litros, mede 1,20 m de diâmetro por 2,00 m de altura e fixo sobre três pés de cantoneiras com 1,20 m de altura. No reservatório principal, onde as misturas sólido- líquidas e as suspensões de polímero são preparadas, foram mantidas homogêneas através das bombas misturadoras 1e/ou 3.

4.1.11 - Sistema de medidas gravimétricas

É constituído por um tanque gravimétrico/volumétrico fixo sobre uma balança com capacidade para até 700 kg e precisão de 200 gramas.

O tanque gravimétrico/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 de gaveta de três polegadas. Possui na parede externa um medidor de nível (Piezômetro ou tubo transparente) com uma escala que permite leituras com precisão de 1 mm.

4.1.12 - Tanque de descarga ou de retorno

É cilíndrico-cônico com capacidade para 300 litros, mede 0,62 m de diâmetro por 0,90 m de altura. Recebe a mistura do tanque gravimétrico/volumétrico, e tem o seu conteúdo misturado pela bomba misturadora 2. A bomba de retorno retira a mistura da base cônica do tanque de retorno e a recalca para o reservatório principal.

4.1.13 - Transdutores de pressão

Um transdutor de pressão converte a energia de pressão em sinais elétricos. A calibração e medição dos sinais elétricos fornece a medida da pressão.

O sistema é adotado de três transdutores de pressão Fisher-Rosemount, modelo 1151, com escala de 0 a 700 mm.c.a, e saída de 4 a 20 mA. As saídas para o micro computador foram calibradas com simulador de voltagem, de modo a atingir o range de 0 a 700 mm.c.a, em escala linear.

A resolução do display digital é de 0,05% do range ± 1 dígito e a indicação da acuidade é de 0,25% do range ± 1 dígito.

Os transdutores de pressão medem o diferencial de pressão entre seções distanciadas de dois metros no tubo de 3 polegadas, e entre seção de 1 metro no tubo de 3 polegadas e mais próximo ao tubo de Pitot.

Os transdutores de pressão encontram-se na Foto 4.6.

As leituras de diferencial de pressão realizadas pelos transdutores eram registradas e armazenadas pelo sistema de aquisição de dados, representado nas Fotos 4.5 e 4.10.

4.1.14 - Medidor de vazão eletromagnético

O princípio de funcionamento do medidor de vazão eletromagnético, baseia-se na Lei de Faraday, segundo a qual, um objeto condutor que se move em um campo magnético, gera uma força eletromotriz. No caso de movimento de um fluido em um tubo, obtém-se que a força eletromotriz induzida é proporcional à vazão.

O sistema de bombeamento possui um medidor eletromagnético de vazão, Fisher-Rosemount, modelo 570 TM, com conversor 8712 U, instalado em tubo vertical de 4 polegadas.

A precisão do instrumento, é de 0,5% da vazão com fluxo entre 0,3 m/s e 10 m/s; e entre 0,1 m/s e 0,3 m/s, a precisão é de $\pm 0,0015$ m/s.

O instrumento, com saída para micro computador de 4 a 20 mA, mede de 0 a 1800 l/min. As saídas para o micro computador foram calibradas com simulador de voltagem, de modo a atingir o range de 0 a 1800 l/min, em escala linear.

O medidor de vazão eletromagnético pode ser visto na Foto 4.1 sobre a vista geral da bancada de ensaios, e na Foto 4.9.

As leituras de vazão realizadas pelo medidor de vazão eletromagnético eram registradas e armazenadas através do sistema de aquisição de dados composto por uma central e um computador e um software, os quais podem ser observados nas Fotos 4.5 e 4.10.

4.2 - Procedimento Experimental

Descreve-se a seguir o procedimento experimental realizado na bancada de ensaios. Aborda-se a forma de aquisição das medidas de perda de carga, de vazão, de concentração e de diferencial de pressão no tubo de Pitot. Descreve-se também a forma de obtenção das misturas sólido-líquido.

4.2.1 - Medidas da vazão e da concentração média do sólido na mistura

A medida de vazão foi realizada pelo medidor de vazão eletromagnético.

A medida de concentração média de sólidos presentes no fluxo, foi obtida através de desvio do fluxo, do tanque principal para o tanque de medidas gravimétricas/volumétricas. Em cada operação de desvio do fluxo realizadas as seguintes leituras: 1º) peso do tanque volumétrico, cheio e vazio, 2º) a temperatura do líquido no tanque principal e 3º) nível do piezômetro, indicativo do volume armazenado.

4.2.2 - Medidas de perda de carga

A perda de carga no trecho reto e horizontal do tubo de 3 polegadas foi medida pelo transdutor de pressão diferencial.

Foi medida em trecho de 1m de comprimento do tubo de 3 polegadas e em trecho de 2 metros de tubo. Ao tubo de 3 polegadas foram adaptadas tomadas de pressão cuidadosamente construídas.

4.2.3- Medida da velocidade e da concentração pontual

As velocidades pontuais foram medidas pelo tubo de Pitot com tomadas de pressão conectadas a um transdutor de pressão. Elas foram realizadas em sete ou nove pontos na vertical ao longo da seção do duto.

O tubo de Pitot possibilita medições de velocidades pontuais através das pressões estática (na parede do tubo) e total (no ponto de estagnação do Pitot). A pressão estática é obtida do orifício de tomada de pressão de 2 mm de diâmetro e 1 D a montante do ponto de estagnação do Pitot.

As velocidades em cada ponto da seção foram calculadas pela equação de Bernoulli, segundo a expressão:

$$u = \sqrt{(2 \cdot \Delta p) / \rho} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \quad (4.1)$$

onde: u = velocidade média no ponto (m/s)

Δp = diferença de pressão entre a total e a estática (N/m²)

ρ = massa específica (kg/m³)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

ΔH = diferencial de pressão entre a total e a estática (mm.c.a.)

Segundo SATTO (1994), o uso deste tipo de medidor é simples, mas há diversos fatores que podem gerar incertezas nas medidas de velocidade. Entre os quais destacam-se: o alinhamento do tubo de Pitot em relação à linha de corrente, a existência de rebarbas nos orifícios de tomadas de pressão e as flutuações na pressão de escoamento.

O alinhamento do tubo de Pitot foi então realizado por fixação do tubo responsável pelo ponto de estagnação com o conjunto haste, anel e micrômetro, obtendo-se o alinhamento do Pitot. As rebarbas nos orifícios foram retiradas, lixando-se as paredes internas dos tubos nos pontos de tomadas de pressão, visando-se o arredondamento de arestas para a finalidade de eliminação de perturbações turbulentas no local.

As flutuações de pressão foram atenuadas por um variador de velocidade que manterá constante a rotação da bomba e pelo comprimento retilíneo de tubo antes do

medidor para garantir escoamento permanente e totalmente desenvolvido, além dos cuidados na obtenção das medidas na faixa da escala do transdutor de pressão.

As medidas de concentração pontuais foram realizadas por sifonamento e amostragem isocinética obtidas através do tubo de Pitot. As amostras foram coletadas em provetas de $100 \text{ ml} \pm 2 \text{ ml}$ e de $200 \text{ ml} \pm 1 \text{ ml}$. Foram anotados o volume, o peso e a temperatura da mistura.

4.2.4 - Determinação da velocidade crítica

A velocidade crítica de sedimentação foi determinada utilizando-se o seguinte procedimento: inicialmente diminuiu-se a velocidade média do escoamento até a formação de um leito estacionário com uma mínima espessura fixa. A partir desse ponto, aumentou-se lentamente a velocidade média até um pouco além do instante em que todas as partículas do leito eram transportadas em suspensão. Depois novamente foi diminuída a velocidade até o ponto considerado como o ponto de início de sedimentação. Nesta condição de velocidade crítica de sedimentação, foram efetuadas as medidas de perda de carga, e de diferenciais do tubo de Pitot (quando possível) e de concentração pontual e média no tubo. A velocidade crítica foi obtida do gráfico de perda de carga em função da velocidade, esta corresponde à velocidade média de mínima perda de carga para uma dada concentração média de sólidos.

4.2.5 - O preparo das soluções de água e polímero

Num recipiente contendo 10 litros de água mantida em agitação manual através de bastão de madeira, uma quantidade conhecida de polímero em peso foi adicionada lentamente obtendo-se uma solução homogênea e altamente viscosa. A seguir a solução foi despejada lentamente no reservatório principal contendo água em movimento turbulento provocado pelas bombas misturadoras. O procedimento foi repetido até a obtenção da concentração desejada da solução.

4.2.6 - A água utilizada

A água utilizada na preparação das soluções foi retirada diretamente da rede pública de abastecimento sem nenhum tratamento especial.

4.2.7 - O polímero e as concentrações utilizadas

Foram realizados testes preliminares para definição das concentrações de NALCO 4045 a serem utilizadas.

Trata-se de polímero de elevado peso molecular, especialmente desenvolvido para utilização como floculante líquido na indústria açucareira. Apresenta além da redução de arraste em escoamento turbulento, a propriedade de eliminação de grumos e entupimentos de tubulações e bombas. Possui densidade de 1,1 g/l, cor branco-creme opalescente e PH de 8,2 a 8,5.

4.2.8 - As areias utilizadas e o preparo das misturas sólido- líquidas água e areia

Utilizou-se uma areia denominada areia BC, classificada como fina, com um diâmetro d_{50} e peso específico da ordem de 0,20 mm e 2652 kgf/ m³ respectivamente. A composição da areia BC é de 96,48% de pedrisco fino, 2,85% de pedrisco médio e 0,67% de pedrisco grosso.

O valor do diâmetro da partícula de areia BC referente à porcentagem de partículas menores que ele, representa-se a seguir:

$$d_{10} = 0,1461 \text{ mm},$$

$$d_{16} = 0,1553 \text{ mm}$$

$$d_{35} = 0,1810 \text{ mm}$$

$$d_{50} = 0,2019 \text{ mm}$$

$$d_{65} = 0,2263 \text{ mm}$$

$$d_{84} = 0,2752 \text{ mm}$$

$$d_{90} = 0,3067 \text{ mm}$$

Outra areia utilizada nos ensaios de bombeamento foi a areia A, classificada como areia grossa, com diâmetro d_{50} e peso específico da ordem de 1,30 mm e 2635 kgf/ m³ respectivamente. A composição da areia A é de 1,33% de silte, 6,86% de pedrisco fino, 69,14% de pedrisco médio e 22,67% de pedrisco grosso.

O valor do diâmetro da partícula de areia A referente à porcentagem de partículas menores que ele, representa-se a seguir:

$$d_{10} = 0,4679 \text{ mm},$$

$$d_{16} = 0,6101 \text{ mm}$$

$$d_{35} = 0,9937 \text{ mm}$$

$$d_{50} = 1,3013 \text{ mm}$$

$$d_{65} = 1,6549 \text{ mm}$$

$$d_{84} = 2,9110 \text{ mm}$$

$$d_{90} = 5,0010 \text{ mm}$$

Para cada ensaio foi preparada no reservatório principal uma mistura de concentração conhecida obtida pela adição de um determinado volume de areia a um volume conhecido de água limpa.

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

4.2.9 - Preparo das misturas de água, areia e polímero

Após preparada a mistura de água e areia, conforme o procedimento anterior, adiciona-se o polímero pelo processo de obtenção de suspensões de água e polímero anteriormente descrito.

4.2.10 - Troca de solução polimérica.

Após a finalização de um ensaio de solução polimérica (com determinada concentração) e areia, procedeu-se à retirada da solução por sifonamento, após um tempo

de espera para a sedimentação dos sólidos. A seguir o tanque principal foi preenchido com água limpa, a bomba misturadora 1 realizou homogeneização e após um tempo de espera para nova sedimentação outro sifonamento do líquido foi realizado. Esta forma de troca de solução garantiu a retirada de toda a solução já utilizada, afim de possibilitar o preparo de nova solução.

4.3 - Metodologia de cálculos

A seguir serão descritos os cálculos das concentrações média e pontual das diversas misturas sólido-líquido; os cálculos da velocidade média e da pontual dos fluxos; e os cálculos dos erros relativos nestas grandezas e na perda de carga unitária J (m/m).

4.3.1 - Cálculo da concentração média do sólido na mistura

A concentração média do sólido na mistura, expressa em volume da mistura, foi calculada através da equação:

$$C_v = (d_{rm} - 1) / (d_{rs} - 1) \quad (4.2)$$

onde: $d_{rm} = W / (vol \cdot \gamma_a)$ = densidade relativa da mistura

W = peso da mistura armazenada no tanque volumétrico

vol = volume da mistura armazenado no tanque volumétrico

γ_a = peso específico da água

d_{rs} = densidade relativa do sólido

C_v = concentração média em volume do sólido na mistura

4.3.2- Cálculo da concentração pontual

A concentração pontual na secção transversal do tubo de 3 polegadas, foi obtida através de retirada de amostra por sonda do tubo de Pitot. A amostra foi coletada em provetas de precisão de 1 ml ou de 2 ml. O peso líquido da amostra foi

obtido de balança eletrônica com precisão de 1 grama. Assim a concentração pontual foi calculada pela equação 4.2.

4.3.3– Erros nas medidas

De acordo com Paradine e Rivett (1974), ocorre com frequencia na teoria da combinação de erros, que uma quantidade deve ser calculada a partir de outras duas ou mais quantidades, cujos valores observados ou estimados sejam passíveis de erros. Assim, suponha-se por exemplo, a quantidade z , calculada através das determinações de x e de y , ou seja, $z = f(x,y)$.

Sendo necessária a estimativa de precisão em z , tem-se para pequenas alterações, até a primeira ordem:

$$\delta z = \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \delta y \quad (4.3)$$

Na equação 4.3, δx e δy são respectivos desvios dos valores médios de x e de y , e as derivadas parciais devem ser tomadas com seus valores médios em x e y . Assim a equação 4.3 assume a forma:

$$\delta z = A \cdot \delta x + B \cdot \delta y \quad (4.4)$$

onde A e B são constantes.

Somando para todos os erros possíveis, a dupla somatória indicando que devemos incluir todo par de erros δx e δy que ocorrem juntos.

$$\sum (\delta z)^2 = \sum \sum (A \cdot \delta x + B \cdot \delta y)^2 \quad (4.5)$$

Como o erro provável é proporcional ao desvio padrão, os quadrados dos erros prováveis podem ser substituídos por variâncias (indicadas por σ_z , σ_x , σ_y , respectivamente para z , x e y). E a equação 4.5 fornece:

$$\sigma_z^2 = A^2 \cdot \sigma_x^2 + B^2 \cdot \sigma_y^2 \quad (4.6)$$

A equação 4.6 pode ser estendida para qualquer número finito de variáveis independentes. Para $z = f(x,y)$, tem-se:

$$\sigma_z^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \cdot \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \cdot \sigma_y^2 \quad (4.7)$$

Esta equação será utilizada na determinação do erro das diversas grandezas obtidas dos dados experimentais.

4.3.3.1 - Erro na concentração média de sólidos presente no fluxo

O tanque gravimétrico e volumétrico, recebe o fluxo desviado da tubulação para a realização das medidas de concentração média de sólidos presente no referido fluxo. Assim são realizadas as leituras de peso e volume líquido deste tanque. O volume é determinado através de leitura no piezômetro (Piez) acoplado ao tanque e pela equação:

$$\text{Volume do tanque gravimétrico} = 0,19027 \cdot \text{Piez} + 123,499 \quad (4.8)$$

Como a incerteza na medida do volume, depende da precisão do piezômetro, que é de ± 1 , tem-se da equação 4.7 que para a leitura 200 do piezômetro, o erro relativo no volume do tanque é igual a $\sqrt{[1/200]^2}$ ou seja, 0,005 (0,5%).

A balança mede a massa líquida do conteúdo do tanque gravimétrico e sua precisão é de 200 g.

Selecionou-se ao acaso os valores experimentais da tabela 4.1, tomando-se a faixa mínima e máxima aproximada de concentração média.

A densidade relativa da mistura d_{rm} é obtida da relação entre a massa líquida do tanque gravimétrico e o volume do tanque, ainda em relação à massa específica da água limpa na temperatura do tanque.

Para efeito de determinação do erro em d_{rm} , despreza-se o erro na massa específica da água limpa devido à pequena imprecisão (2°C) no valor da temperatura, o que causa pequena variação na massa específica da água limpa.

Na tabela 4.1 apresenta-se o erro relativo em d_{rm} (areia BC) para concentração média de 1,8%, 4,9% e para 14,9%.

Na tabela 4.2 apresenta-se o erro relativo em d_{rm} (areia A) para concentração média de 2,1%, e para 10,9%.

Tabela 4.1 – Tabela de erro relativo em d_{rm} para areia BC

Areia BC				
C_v	Piezômetro	Massa líquida	Volume calculado (Eq.4.8)	$\sigma_{d_{rm}}/d_{rm}$ (Eq.4.7)
(%)	(mm)	(kg)	(Litros)	
1,8	225	171.2	166.3099	0,005
4,9	215.5	177.8	164.5023	0,005
14,9	209	203.4	163.2656	0,005

Tabela 4.2– Tabela de erro relativo em d_{rm} para areia A

Areia A				
C_v	Piezômetro	Massa líquida	Volume calculado (Eq.4.8)	$\sigma_{d_{rm}}/d_{rm}$ (Eq.4.7)
(%)	(mm)	(kg)	(Litros)	
2,1%	200	167,2	161.5532	0.005
10,9%	258	202,0	172.5888	0.005

Para as areias A e BC, os valores da densidade relativa de sólidos foi obtido de média aritmética resultante de análise de picnômetro de três amostras. Os valores obtidos

para a areia BC encontram-se na Tabela 4.3 Os valores da densidade relativa da areia A encontram-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.3 – Valor da densidade relativa da areia BC

Areia BC	Densidade relativa (d_{rs})
Amostra 1	2,6560
Amostra 2	2,6869
Amostra 3	2,6132
Valor médio	2,6520
Desvio padrão	0,0370

Tabela 4.4 – Valor da densidade relativa da areia A

Areia A	Densidade relativa (d_{rs})
Amostra 1	2,627
Amostra 2	2,651
Amostra 3	2,629
Valor médio	2,636
Desvio padrão	0,013

As medidas de concentração média da mistura são determinadas de acordo com a equação 4.2. Assim a partir das equações 4.2 e 4.7, calcula-se o erro relativo na medida da concentração média.

Sendo σ_{Cv}/C_v o erro relativo da concentração média, tem-se:

$$\frac{\sigma_{Cv}}{C_v} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{drm}}{d_{rm} - 1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{drs}}{d_{rs} - 1}\right)^2} \tag{4.9}$$

Tabela 4.5 - Erro relativo no cálculo da concentração média (areia BC)

Cv	d_{rm}	σ_{drm}	d_{rs}	σ_{drs}	σ_{Cv}/C_v
1,8%	1.02940	0.005147	2.652	0.037	0.177 (17,7%)
4,9%	1.08084	0.005404	2.652	0.037	0.071 (7,1%)
14,9%	1.24582	0.006229	2.652	0.037	0.029 (2,9%)

Tabela 4.6 - Erro relativo no cálculo da concentração média (areia A)

Cv	d_{rm}	σ_{drm}	d_{rs}	σ_{drs}	σ_{Cv}/C_v
2.1%	1.03495	0.005175	2.636	0.013	0.148 (14,8%)
10,9%	1.17041	0.005852	2.636	0.013	0.035 (3,5%)

Observa-se nas tabelas 4.5 e 4.6 que o erro relativo na concentração média é maior para a menor concentração e diminui consideravelmente para as maiores concentrações.

4.3.3.2- Erro relativo na concentração pontual

A concentração pontual da mistura é calculada pela equação 4.2, considerando-se peso e volume da amostra na proveta. A amostra contida na proveta foi retirada por sonda do tubo de Pitot. Considerando-se a concentração pontual compreendida na faixa aproximada de 0,01% a 44% (faixa de valores obtidos experimentalmente), determina-se o erro relativo no cálculo da concentração pontual.

Tabela 4.7 – Erro relativo na concentração pontual (areia BC)

Cv	Volume	Peso	Temperatura	Precisão Proveta	d_{rm}	$\sigma_{d_{rm}}/d_{rm}$	σ_{Cv}/C_v
	(ml)	(grama)	(°C)	(ml)			
0.5%	170	171.00	29	±1	1,00998	0.008295	0.023
44%	121	207.26	29	±1	1.71987	0.00957	0.032
42%	90	151.65	36	±2	1.6957	0.002318	0.061

Utilizou-se provetas de precisões diferentes, de ± 1 ml e de ± 2 ml. Geralmente a proveta de precisão ± 2 ml foi utilizada na coleta por sonda dos pontos mais inferiores da base do tubo, isto é, nos pontos de maior concentração pontual. Assim, apresenta-se na Tabela 4.7, o erro relativo na concentração pontual de valores aproximadamente extremos de concentração pontual, 0,5% e 44%, para proveta de precisão ± 1 ml (o erro relativo resultou em variação de 2,3% a 3,2%). E na mesma Tabela 4.7, o erro relativo na concentração pontual para proveta de precisão ± 2 ml (o erro relativo resultou em 6,1%).

4.3.3.3 - Erro relativo na velocidade pontual

A velocidade pontual é calculada da equação 4.1. A precisão na medida da velocidade portanto, depende da precisão do transdutor de pressão diferencial.

A precisão do transdutor corresponde a 0,05% do range ± 1 dígito. Sendo o range do medidor compreendido entre 0 a 700,0 mm.c.a., resulta precisão de $0,35 \pm 1$ dígito, ou seja, 0,45 valor este que será aproximado para 0,5 mm.c.a.

Das equações 4.1 e 4.7,obtém-se:

$$\frac{\sigma_u}{\bar{u}} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{\Delta H}}{\Delta H} \quad (4.10)$$

Desta equação 4.10, resulta:

Para $\Delta H = 5 \text{ mm}$, $\sigma_u/\bar{u} = (1/2) \cdot 0,5/5,0 = 0,05 = 5\%$

Para $\Delta H = 700 \text{ mm}$, $\sigma_u/\bar{u} = (1/2) \cdot 0,5/700,0 = 0,0004 = 0,04\%$

Ou seja, para a velocidade pontual mínima e a máxima, tem-se:

Para $\Delta H = 5 \text{ mm}$, $\bar{u} = 0,313 \text{ m/s} \pm 0,016 \text{ m/s}$

Para $\Delta H = 700 \text{ mm}$, $\bar{u} = 3,704 \text{ m/s} \pm 0,0015 \text{ m/s}$

4.3.3.4- Erro relativo na velocidade média

A equação de determinação da velocidade média do fluxo representa-se por: $v_m = U = Q/A$. De modo que o erro relativo na velocidade média depende dos erros nas leituras da vazão e do diâmetro do tubo, ou seja:

$$\frac{\sigma_U}{U} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_Q}{Q}\right)^2 + \left(2 \frac{\sigma_D}{D}\right)^2} \quad (4.11)$$

O diâmetro do tubo acrílico é de $0,07810 \text{ m} \pm 0,00001 \text{ m}$. A vazão possui precisão correspondente a $(0,005 \cdot Q)$, na equação 4.7 portanto resulta:

$$\frac{\sigma_U}{U} = \sqrt{\left(\frac{0,005Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{2.0,00001}{0,0781}\right)^2} = 0,005 = 0,5\%$$

Assim o erro relativo no valor calculado de velocidade média do fluxo corresponde a 0,5%.

4.3.3.5 - Erro relativo na perda de carga unitária

A perda de carga unitária (J) no tubo de três polegadas foi medido diretamente de tomadas de pressão distanciadas entre si de 1,0 m e acopladas ao transdutor de pressão. De modo que o erro na medida de J depende da precisão do transdutor de pressão. Assim, como a precisão do transdutor é de 0,05% do range ± 1 dígito, tem-se que as leituras de J, tornam-se J (mm) $\pm 0,5$ mm. Pois o range do medidor é de 700 mm.

4.4- Viscosidade e densidade da água e suspensões de polímero

Os valores de densidade e viscosidade da água em função da temperatura foram retirados do HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS (1987).

As soluções de polímero NALCO 4045 foram obtidas em concentrações iguais a 100, 200, 400, 600, 800 e 1200 ppm. A densidade de NALCO 4045 de acordo com o fabricante é de 1,1 kg/l à temperatura de 20°C. A densidade das soluções de polímero foram consideradas iguais à da água desde que foram pequenos os valores utilizados de concentrações.

As propriedades reológicas de soluções do polímero Nalco 4045 foram determinadas com o Reômetro Contraves, modelo Rheomat 115, com Rheoscan 100 e banho para a manutenção da temperatura. O reômetro pertence ao Instituto de Química da UNICAMP, cuja diretoria gentilmente autorizou sua utilização e a realização das medições.

O reômetro é do tipo rotacional e cilindros coaxiais.

A tolerância na velocidade de rotação do reômetro é de $\pm 1\%$ do valor para a menor rotação, e $\pm 0,5\%$ do valor para a maior rotação. A rotação varia de 5 a 780 rpm.

A tolerância do torque é de $\pm 1\%$ somado de $\pm 0,1$.

Obtém-se a tensão de cisalhamento (mPa) através do produto entre a indicação do torque, a velocidade de rotação (s^{-1}) e um coeficiente do reômetro constante para cada rotação.

Para as soluções a 100 ppm, 200 ppm, 300ppm, 400 ppm, 800 ppm e 1200 ppm, às temperaturas de 15 °C, 30 °C, 45 °C e 60 °C e rotações de 100 rpm, 300 rpm, 500 rpm, 600 rpm e 700 rpm, foram obtidas as tensões de cisalhamento correspondentes.

Os dados experimentais obtidos e seus respectivos gráficos encontram-se no ANEXO 5.

Os gráficos A5-1, A5-2, A5-3 e A5-4 do ANEXO 5 apresentam os valores obtidos de tensão de cisalhamento em função do gradiente de velocidade. Observa-se uma relação linear entre ambos, no intervalo medido de gradientes de velocidade. As soluções de maiores concentrações, nitidamente apresentam um valor de tensão aparente de arranque inicial ("yield stress").

Destes gráficos foram obtidos os valores de viscosidade. Estes são apresentados no gráfico A5-5 do ANEXO 5 em função da temperatura. Foram ajustadas curvas de tendência as quais também se apresentam no referido gráfico.

No gráfico A5-5, ANEXO 5, observa-se que a curva de viscosidade da solução à 1200 ppm resultou retilínea, porém ocorreu que a diferença entre a viscosidade à 800 ppm e à 1200 ppm foi muito pequena. Não foi possível detectá-la, devido à precisão do medidor. A curva retilínea resultou do melhor ajuste pelo método dos mínimos quadrados do “software” Excel aos dados.

4.5 - Ensaios de água e de água e areia

O trabalho experimental investiga o comportamento hidrodinâmico de misturas sólido-líquido. Para cada mistura sólido-líquido foram realizadas medições experimentais por bateladas. Em cada conjunto de bateladas, nove ou dez foram as providências ou medições realizadas, as quais apresentam-se nos itens a seguir: (1) Medição de perda de carga referente à tubulação de acrílico de 3 polegadas, (2) Medição de perda de carga no tubo PVC de 3 polegadas, (3) Medição do diferencial de pressão do tubo de Pitot em pontos localizados na vertical que passa pelo centro do tubo de acrílico de 3 polegadas, (4)

Retirada de amostras através do tubo de Pitot para medidas de concentração pontuais, (5) Medida de vazão através do medidor eletromagnético (vazão 1), (6) Através do desvio do fluxo para o tanque de medidas gravimétricas (ou volumétricas), medição do volume e do peso do fluxo desviado para obtenção da concentração média do fluxo (7) Anotações das vazões referentes à velocidade crítica de deposição (v_D ou v_{cs}) por diminuição ou por aumento da velocidade do fluxo (8) Medição do número de amostras dentro do intervalo de tempo da batelada, sendo que o software ELIPSE realiza duas medições por segundo (9) Anotação da rotação do variador de velocidade e (10) Em se tratando de soluções de NALCO 4045, também foi necessária a anotação do horário inicial e final da batelada.

Os ensaios com água limpa, para a finalidade de calibração do sistema, as medidas experimentais realizaram-se de acordo com os itens (1), (2), (3) e (5) apresentados anteriormente.

4.6 – Denominações de todos os ensaios

. Os ensaios referentes às calibrações com água, realizados antes e após cada ensaio com areia recebem as denominações seguintes:

Água 1 : Ensaio com água antes de qualquer teste experimental com areia.

Água 2 : Ensaio com água após todos os testes com (água + areia BC).

A areia BC tem densidade relativa $d_{rs} = 2,6520 \text{ g/cm}^3$ e diâmetro $d_{50} = 0,2019 \text{ mm}$.

Água 3 : Ensaio com água após todos os testes com (água + areia A).

A areia A tem densidade relativa $d_{rs} = 2,6256 \text{ g/cm}^3$ e diâmetro $d_{50} = 1,3013 \text{ mm}$.

Água 4 : Ensaio com água após testes experimentais com areia referentes a outra pesquisa.

Água 5 : Ensaio com água após todos os testes com (solução de NALCO 4045 e areia BC).

Os ensaios referentes às misturas de água e areia recebem as denominações:

(Água + Areia BC) : Ensaio de misturas de água e areia BC.

(Água + Areia A) : Ensaio de misturas de água e areia A.

(Solução de NALCO 4045) : Ensaio com solução de NALCO 4045

(Solução de NALCO 4045 + Areia BC) : Ensaio de soluções de polímero e areia BC.

Algumas dificuldades apresentadas no sistema foram contornadas, como o interrompimento das medições para limpeza das mangueiras de tomada de pressão do tubo de Pitot.

4.7 - Ensaio de soluções de polímero e de suspensões de polímero e areia

Foi realizado o Ensaio ÁGUA 4 para recalibração do sistema após testes experimentais de outro trabalho de pesquisa científica realizado na mesma bancada de ensaios. A seguir foram realizados na seguinte ordem os testes com suspensões de polímero, testes com suspensões de polímero e areia BC, teste de recalibração do sistema ÁGUA 5 e testes com suspensões de polímero.

O teste com suspensões de polímero foi realizado em duas etapas. A primeira consistiu na realização de medições sequenciais por bateladas através de diminuição da rotação do motor e na segunda etapa, testes sequenciais foram realizados com aumento da rotação do motor. Estes testes assim diferenciados proporcionaram um esclarecimento sobre a histerese do polímero.

O teste realizado com areia BC e solução de polímero forneceu compreensão da degradação do polímero em presença de areia. Assim, decidiu-se pela repetição dos testes com polímero para elucidação do comportamento do polímero utilizado, conforme descrito no parágrafo anterior.

Os dados experimentais obtidos encontram-se no ANEXO 2 – Dados experimentais dos testes de polímero e areia BC.

Durante o início dos ensaios com soluções de polímero ocorreu a mudança no sistema de aquisição de dados para o sistema PLC (Controlador Lógico Programado), dotado de uma central de aquisição de dados (Foto 4.10).

4.8 – Os experimentos com polímero

As soluções de NALCO 4045 utilizadas nos ensaios de bombeamento, foram preparadas em concentrações iguais a 100 ppm, 200 ppm, 400 ppm, 600ppm, 800 ppm e 1200ppm. A obtenção de tais concentrações no tanque principal realizou-se pela estimativa do volume total do tanque principal e da tubulação. O volume de polímero adicionado ao tanque foi medido com proveta de 200 ml e precisão de ± 2 ml.

O polímero antes de ser adicionado ao tanque foi previamente misturado à água em pequenos recipientes com cerca de 10 litros de capacidade. A agitação processou-se manualmente pelo uso de bastão de madeira e lenta adição de polímero à água contida no recipiente.

A aquisição de dados experimentais sobre o escoamento de suspensões de polímero NALCO 4045 foi realizada sistematicamente pelo seguinte processo: Manteve-se a rotação do motor em torno de 650 rpm por cerca de 5 a 7 minutos após a total colocação do polímero no tanque principal. Este tempo foi fixado para a finalidade de uniformização total da solução em todo o sistema de bombeamento. Após este tempo de espera, colocou-se a rotação do motor em 1250 rpm (a maior rotação utilizada) e iniciou-se o processo de medição por bateladas para uma dada concentração do polímero. Cada batelada mede vazão fornecida pelo medidor eletromagnético, e o diferencial de pressão dos transdutores de pressão conectados à tubulação principal e ao tubo de Pitot. A rotação variou de 1250 rpm para cerca de 400 rpm, nesta ordem decrescente, em cada ensaio, sendo que foram realizados os testes com tubo de Pitot na rotação intermediária de cerca de 750 rpm. A sistematização da metodologia de ensaio com suspensões de polímero ocorreu devido à necessidade de diminuição de fatores intervenientes aos dados experimentais de interesse. Por exemplo, a ação do cisalhamento e da temperatura e da idade da solução sobre o desempenho hidrodinâmico da solução, fatores estes que influenciam a degradação da solução.

Anotou-se o horário de início da medição por batelada (após o tempo de espera para uniformização da mistura) e cada horário das bateladas subsequentes. Esta anotação de horário, das rotações do motor e da temperatura da solução, fornecem respectivamente idéia da degradação do polímero por tempo de preparo, cisalhamento e temperatura.

Na análise dos resultados, observou-se maior importância ao intervalo entre o horário inicial da primeira batelada e o horário da batelada em estudo, uma vez que o cisalhamento é permanente no processo de medição por bateladas e por ter sido pequena a máxima variação de temperatura de cerca de 6°C para cada ensaio realizado (com uma determinada concentração); e dentro de uma faixa máxima de temperatura (em todos os ensaios) variando de 24°C a 41°C.

Além dos testes anteriormente descritos de diminuição da rotação do motor, de 1250 rpm para 400 rpm com solução fresca, foram realizados também testes com solução fresca aumentando a rotação do motor. A comparação dos dois tipos de testes indica a histerese da solução em função da velocidade de bombeamento.

Todo teste com solução de polímero, em que a vazão era aumentada (aumentando a rotação do motor), era seguido de teste de caminho inverso, ou seja, a vazão era então gradativamente reduzida.

4.9 - A medição para suspensões de polímero com areia BC

A medição por bateladas para fluxo de misturas de solução de NALCO 4045 e areia BC seguiu um procedimento semelhante à medição para fluxo de suspensões de polímero sem areia. Ocorreu espera de 4 a 7 minutos para uniformização da solução no tanque principal antes do início das bateladas. A rotação do motor inicia-se sempre em 1250 rpm (primeira batelada) e foi diminuída gradativamente, passando pela velocidade crítica de sedimentação, e atingindo a formação do leito de sedimentos, em valores próximos à 500 rpm. Em rotação próximo à 750 rpm e quando possível (devido às dificuldades de entupimentos no tubo de Pitot) na velocidade crítica de sedimentação realizou-se medição das velocidades e das concentração pontuais ao longo de uma vertical com o tubo de Pitot.

O horário de cada batelada foi anotado.

Realizou-se medição de degradação da solução de NALCO 4045 em presença de areia. O efeito do repouso da solução medido em horas, ocasionou a degradação por envelhecimento da solução, degradação esta medida através da alteração nos valores de perda de carga.

Todos os testes experimentais realizados com soluções de NALCO 4045 e areia BC, foram realizados a partir de maiores para menores velocidades do fluxo. O variador de velocidade possibilitou a variação da rotação do motor da bomba principal. Assim embora apresente-se em alguns gráficos a descrição do tipo: **Teste realizado por diminuição da rotação do motor**, salienta-se que todos os ensaios realizados de areia BC adicionado a polímero, foram realizados por diminuição da rotação do motor.

Para cada solução fresca de polímero foi realizado um teste experimental por bateladas, diminuindo-se a rotação do motor de 1250 rpm até uma rotação referente a um escoamento com leito de sedimentos. A velocidade crítica de sedimentação foi portanto medida por diminuição da velocidade do fluxo. E medida adicional de velocidade crítica de sedimentação por aumento de velocidade do fluxo foi realizada no final do teste experimental realizado por diminuição, conforme descrito anteriormente. Cada teste experimental por bateladas foi realizado em intervalo de tempo que variou de cerca de 50 minutos a 1 hora e 20 minutos.



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

**INFLUÊNCIA DE POLÍMERO REDUTOR DE ARRASTE NO
ESCOAMENTO BIFÁSICO (SÓLIDO-LÍQUIDO) EM CONDUTOS
FORÇADOS**

Volume 2

MARIA YAECO UEJIMA SATTO

ORIENTADOR: PROF.DR. EVALDO MIRANDA COIADO

Campinas – S.P.

1998



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

**INFLUÊNCIA DE POLÍMERO REDUTOR DE ARRASTE NO
ESCOAMENTO BIFÁSICO (SÓLIDO-LÍQUIDO) EM CONDUTOS
FORÇADOS**

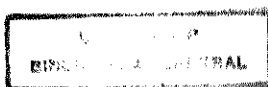
**Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia Civil da Universidade
Estadual de Campinas para obtenção
do título de Doutor em Engenharia
Civil - Área de Concentração:
Recursos Hídricos**

Autora: Maria Yaeco Uejima Satto

Orientador: Prof. Dr. Evaldo Miranda Coiado

**Campinas – SP
1998**

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação/tese.	
	<u>2/2/99</u>
Prof. Dr.	
Matrícula:	<u>051866</u>



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	
V. 02	Ex.
MAC	BC/37446
PROD.	229/99
D	☐ D ☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	28/04/99
N.º CPD	01100123582-9

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

Sa83i

Satto, Maria Yaeco Uejima

Influência de polímero redutor de arraste no escoamento bifásico (sólido-líquido) em condutos forçados. / Maria Yaeco Uejima Satto.--Campinas, SP: [s.n.], 1998.
2v.

Orientador: Evaldo Miranda Coiado.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Escoamento bifásico. 2. Tubos - Dinâmica dos fluidos. 3. Polímeros solúveis em água. 4. Transporte de sedimentos - Velocidade. I. Coiado, Evaldo Miranda. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

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

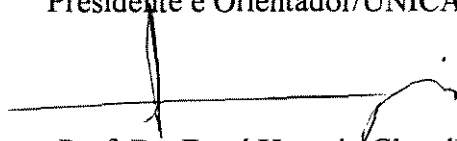
**INFLUÊNCIA DE POLÍMERO REDUTOR DE ARRASTE
NO ESCOAMENTO BIFÁSICO (SÓLIDO-LÍQUIDO) EM
CONDUTOS FORÇADOS**

MARIA YAECO UEJIMA SATTO

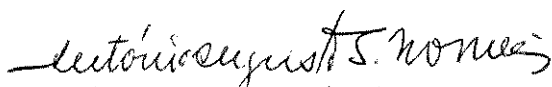
Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. Evaldo Miranda Coiado
Presidente e Orientador/UNICAMP



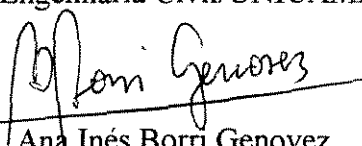
Prof. Dr. Fazal Hussain Chaudhry
Escola de Engenharia São Carlos/USP



Prof. Dr. Antonio A. dos Santos Nogueira
Escola Politécnica/USP



Prof. Dr. José Geraldo Pena de Andrade
Faculdade de Engenharia Civil/UNICAMP



Profa. Dra. Ana Inés Borri Genovez
Faculdade de Engenharia Civil/UNICAMP

Campinas, 16 de Dezembro de 1998

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE FOTOS.....	xxxvi
LISTA DE TABELAS.....	xxxvii
RESUMO.....	xlii
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - OBJETIVOS.....	3
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 - Transporte de sedimentos.....	5
3.1.1 - Fluxo horizontal de suspensões sólido-líquido em dutos sob pressão	5
3.1.2 - Conceitos básicos de hidrotransporte de sólidos.....	6
3.1.3 - Escoamentos padrões no transporte de sedimentos.....	12
3.1.4 - Definições de velocidade crítica (ou velocidade mínima de transporte) e de velocidade limite de sedimentação (ou velocidade crítica de sedimentação.....	16
3.1.5 - Correlações e pesquisas diversas sobre velocidade crítica de sedimentação.....	21
3.1.6 - Distribuições de velocidade e concentração	44
3.2 - Transporte de suspensões de polímeros	48
3.2.1 - O fenômeno de redução de arraste	48
3.2.2 - A assíntota de máxima redução de VIRK, P.S. (1967) e o perfil limite máximo.....	49

3.2.3 - Pesquisas gerais sobre o transporte hidráulico de suspensões de polímeros.....	58
3.3 - Modelos reológicos	66
4 - MATERIAL E MÉTODO.....	72
4.1 - Bancada de ensaio	72
4.1.1 - Bomba principal	72
4.1.2 - Bomba misturadora 1.....	79
4.1.3 - Bomba misturadora 2.....	79
4.1.4 - Bomba Misturadora 3.....	79
4.1.5 - Bomba de retorno.....	80
4.1.6 - Canalização de sucção.....	80
4.1.7 - Canalização de recalque.....	80
4.1.8 - Desviador rotacional de fluxo	81
4.1.9 - Seção de medidas de concentração e velocidade	81
4.1.10 - Reservatório principal	83
4.1.11 - Sistema de medidas gravimétricas.....	83
4.1.12 - Tanque de descarga ou de retorno.....	83
4.1.13 - Transdutores de pressão.....	84
4.1.14 - Medidor de vazão eletromagnético.....	84
4.2 - Procedimento Experimental.....	85
4.2.1 - Medidas da vazão e da concentração média do sólido na mistura.....	85
4.2.2 - Medidas de perda de carga	85
4.2.3 - Medidas de velocidade e concentração pontual	86
4.2.4 - Determinação da velocidade crítica	87
4.2.5 - O preparo das soluções de água e polímero.....	87
4.2.6 - A água utilizada.....	88
4.2.7 - O polímero e as concentrações utilizadas.....	88
4.2.8 - As areias utilizadas e o preparo das misturas sólido- líquidas água e areia.....	88
4.2.9 - Preparo das misturas de água, areia e polímero.....	89
4.2.10 - Troca de solução polimérica.....	89
4.3 - Metodologia de cálculos.....	90
4.3.1 - Cálculo da concentração média do sólido na mistura.....	90
4.3.2- Cálculo da concentração pontual	90

4.3.3 – Erros nas medidas.....	91
4.3.3.1 - Erro na concentração média de sólidos presente no fluxo.....	92
4.3.3.2. - Erro relativo na concentração pontual.....	95
4.3.3.3 - Erro relativo na velocidade pontual.....	96
4.3.3.4 - Erro relativo na velocidade média.....	97
4.3.3.5 - Erro relativo na perda de carga unitária.....	98
4.4 - Viscosidade e densidade da água e suspensões de polímero	98
4.5 - Ensaio de água e de água e areia.....	99
4.6 – Denominações de todos os ensaios.....	100
4.7 - Ensaio de soluções de polímero e de suspensões de polímero e areia.....	101
4.8 – Os experimentos com polímero.....	102
4.9 - A medição para suspensões de polímero com areia BC	103
 5 –RESULTADOS E CONCLUSÕES	 105
 5.1 - Ensaio com água.....	 105
5.1.1– Perda de Carga da água e o desgaste da tubulação devido aos diversos ensaios com misturas sólido-líquido.....	105
5.2 - Ensaio de água e areias.....	113
5.2.1 – Perda de Carga de Água e AreiaBC.....	113
5.2.2 – Perda de Carga de Água + Areia A.....	118
5.3 – Ensaio com soluções de polímero.....	124
5.3 1 - Ensaio com solução de polímero.....	124
5.3 1 1 – Perdas de Carga e degradação de soluções de polímero.....	124
5.3.1.2 - Distribuição de velocidade de solução de NALCO 4045.....	132
5.3.2 – Ensaio de soluções de polímero com areia BC.....	135
5.3.2.1– Perda de Carga de fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC.....	135
5.3.2 2– Distribuição de velocidade de solução de polímero e areia BC.....	155
5.4 – Perda de Carga, Velocidade Crítica de Sedimentação e Velocidade Crítica de misturas sólido-líquido.....	161
5.4.1 – Ensaio com água limpa.....	161
5.4.2– Ensaio com mistura de água + areia A.....	161

5.4.3 – Ensaio com mistura de água + areia BC.....	167
5.4.4 – Influência do tamanho do grão do sólido na perda de carga, na velocidade crítica de sedimentação, e na velocidade crítica.....	175
5.4.5 – Ensaio com soluções de polímero.....	179
5.4.6 – Ensaio com soluções de água – polímero - areia BC.....	184
5.4.6.1 – Concentrações: areia a 2%, e polímero a 100ppm e 400ppm.	184
5.4.6.2 – Concentrações: areia a 5%, e polímero a 100ppm, 200 e 400ppm.....	188
5.4.6.3 – Concentrações: areia BC a 10%, e polímero a 100ppm, 200 e 400ppm.....	192
5.4.6.4 – Concentrações: areia a 15%, e polímero a 100ppm, 200 e 400ppm.....	197
5.4.6.5 – Concentrações: areia a 7,2% e 14%, e polímero a 1.200ppm.....	201
5.4.6.6 – Concentrações: areia a 8,1% e polímero a 600 ppm.....	209
5.4.6.7 – Velocidade crítica de sedimentação – escoamento de misturas com polímero.....	212
5.4.6.8 – Velocidade crítica– escoamento de misturas com polímero.....	221
5.4.6.9 – Influência do polímero na velocidade crítica de sedimentação e na correspondente perda de carga unitária.....	225
5.4.6.10 – Influência do polímero na velocidade crítica e na correspondente perda de carga unitária.....	229
5.5 – Velocidade crítica de sedimentação.....	233
5.5.1 – Correlações de velocidade crítica de sedimentação.....	233
5.5.2 Dificuldade na padronização da velocidade crítica de sedimentação.....	241
5.5.3 Conclusões sobre efeito de solução polimérica sobre a velocidade crítica de sedimentação.....	243
5.5.3.1 – Efeito da adição de polímero sobre a velocidade crítica de sedimentação....	243

5.5.3.1.1 – Descrição das conclusões do efeito do polímero sobre a velocidade crítica de sedimentação.....	244
5.5.3.1.2 – Conclusões finais sobre a adição de polímero à velocidade crítica de sedimentação.....	246
5.5.4 – Conclusões sobre o escoamento de areia e água.....	250
5.5.4.1 – Programa de Soliman, R. H. e Collier, P. B.....	250
5.6 – Fator de atrito de Fanning.....	254
5.6.1 – Escoamento de água.....	254
5.6.2 – Escoamento de Água + Areia BC.....	256
5.6.3 – Escoamento de Água + Areia A.....	256
5.6.4 – Escoamento de soluções de polímero e de soluções de polímero com areia BC.....	258
5.7 - Distribuição vertical pontual de velocidades na seção do tubo.....	260
5.8 – Perfil adimensional de velocidades pontuais.....	266
5.8.1 - Escoamento de água e areia BC.....	266
5.8.2 – Escoamento de água e areia A.....	274
5.8.3 – Escoamento de água e areias BC e A, e escoamento de areia BC em solução de polímero.....	275
5.8.4 – Distribuição de velocidade de Einstein.....	280
5.9 - Distribuição vertical de concentração por amostragem isocinética.....	283
5.10 – Lei da Diferença de velocidade (“Law of Deficiency”)	303
5.10.1 - Lei da Diferença de velocidade (“Law of Deficiency”) para escoamento de água.....	303
5.10.2 – Lei da diferença de velocidade ou “Law of Deficiency” para Água + Areia BC.....	304
5.10.3 – Lei da diferença de velocidades ou “Law of Deficiency” para Água + Areia A.....	308
6 - CONCLUSÕES.....	310
7 - RECOMENDAÇÕES OU SUGESTÕES.....	335

ANEXO 1 - Programa Fortran para Cálculo de Velocidade Crítica de Sedimentação.	337
ANEXO 2 - Perfil Adimensional de Velocidade Para Água e Areias BC e A.....	344
ANEXO 3 - Distribuição Vertical de Velocidade para Água e areia BC.....	352
ANEXO 4 - Distribuição Vertical de Concentração Pontual.....	356
ANEXO 5 - Reologia das Suspensões de Polímero.....	365
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	369
ABSTRACT.....	378

5 – RESULTADOS E CONCLUSÕES

Neste capítulo encontram-se descritos os resultados e as conclusões finais.

5.1 Ensaios com água

Os ensaios de água foram realizados para a finalidade de verificação e calibração do sistema de bombeamento. Assim, são apresentados os resultados obtidos com a água a fim de que seja possível a realização de comparações entre os resultados obtidos de misturas sólido-líquido com os resultados deste líquido universal.

5.1.1– Perda de Carga da água e o desgaste da tubulação devido aos diversos ensaios com misturas sólido-líquido

Na Figura 5.1.1, apresentam-se as curvas de perda de carga unitária J (m/m) em função da velocidade média, v (m/s) para a água, nos ensaios **Água 1**, **Água 2** e **Água 3**. Os pontos indicados são os obtidos experimentalmente. Apresentam-se também as equações de melhor ajuste pelo método dos mínimos quadrados. Observa-se pelos coeficientes de correlação r^2 , excelente concordância entre os pontos experimentais e as curvas de ajuste.

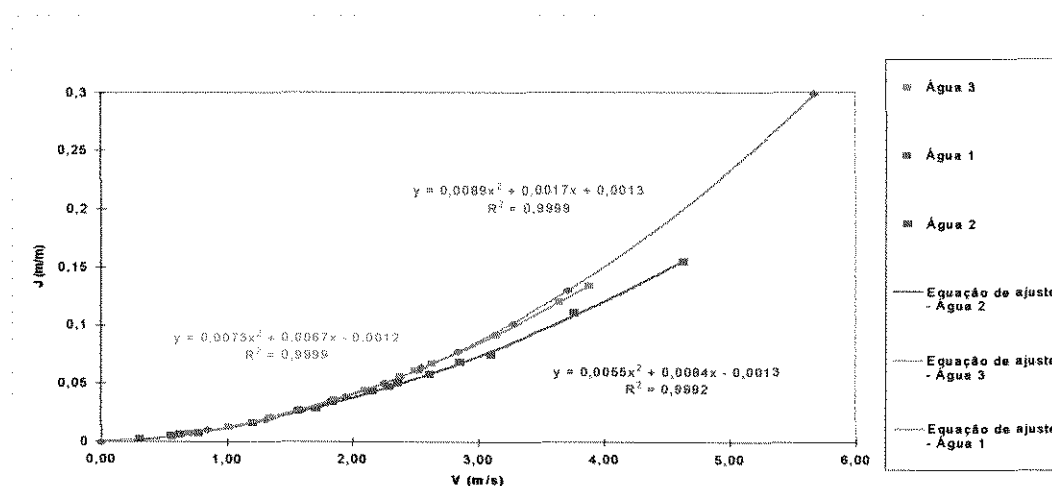


Figura 5.1.1 – Perda de carga de fluxo de água em tubo novo(Água 1), no tubo após ensaios com areia BC(Água 2) e após ensaios com areia A (Água 3)

Observa-se que para velocidade média nula, o valor de J é praticamente nulo (1 mm/m), valor este, situado na faixa dos erros experimentais.

Observa-se que houve diminuição da perda de carga do ensaio **Água 1** para o ensaio **Água 2**. Esta ocorrência encontra explicação na diminuição do fator de atrito f devido a um processo de polimento da parede interna com redução da rugosidade e um pequeno (desprezível) aumento do diâmetro do tubo. O ensaio (**Água + Areia BC**) provocou polimento nas tubulações de PVC e de acrílico, tornando-os mais lisos, e diminuindo o fator de atrito.

Foram realizados 350 testes com água e areia BC e 140 testes de água e areia A.

O ensaio (**Água + Areia A**) provocou desgastes desuniformes (ranhuras) no interior da tubulação, aumentando a rugosidade relativa média da tubulação e consequentemente aumentando o fator de atrito. Ressalta-se que a areia A é mais grossa e desuniforme que a areia BC, portanto possui maior poder abrasivo e de corte, e observou-se que mesmo ao final dos 140 testes realizados não foi possível a restituição da rugosidade verificada no ensaio **Água 1**.

A Figura 5.6.1.1 apresenta a alteração nos valores de fator de atrito de Fanning em função da velocidade para o tubo novo (**Água 1**) e após ensaios com areia BC (**Água 2**) e areia A (**Água 3**).

O efeito polidor da areia de menor diâmetro, foi o principal causador da diminuição na perda de carga, uma vez que apesar dos bombeamentos de areias, praticamente não houve alteração nos diâmetros internos dos tubos. O diâmetro do tubo PVC, respectivamente antes e após todos os ensaios com areias foi de 77,4325 mm e 77,6875 mm. Para o tubo acrílico, antes e após todos os ensaios o diâmetro foi 78,13 mm e 78,16 mm.

O ensaio denominado por **Água 3** foi realizado após os ensaios com água e areia A, em seguida foram realizados ensaios de outra pesquisa e então foi realizado o ensaio **Água 4**, e finalmente, o ensaio **Água 5** após a realização de todos os ensaios com polímero. Observou-se que não houve alteração nos valores de perda de carga dos três últimos ensaios com água. A Figura 5.1.1.2 apresenta as curvas de perda de carga unitária J em função da velocidade média do fluxo v , para os três ensaios: **Água 3**, **Água 4** e **Água 5**. Desta Figura, conclui-se que praticamente não houve desgaste na tubulação devido aos ensaios posteriores aos da areia A.

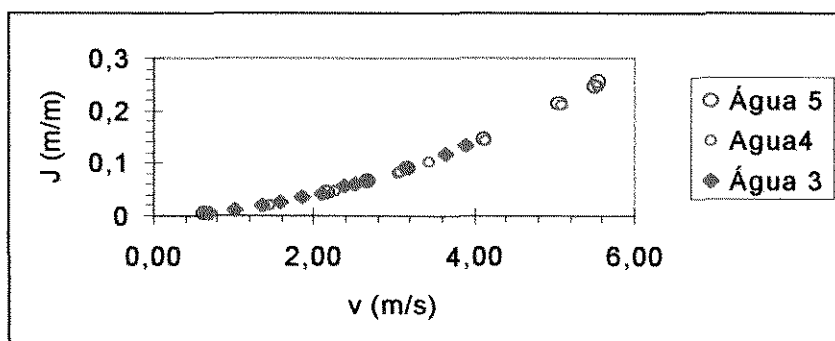


Figura 5.1.1.2 – $J = f(v)$ para os ensaios Água 3, Água 4 e Água 5.

5.1.2 – Perfil de velocidade na vertical que passa pelo centro do tubo

Os perfis adimensionais obtidos ao longo da vertical, com o tubo de Pitot, apresentam-se nas Figuras 5.1.2, 5.1.3, 5.1.4 e 5.1.5, referentes ao ensaio **Água 1**.

Na Figura 5.1.2, representam-se todos os pontos experimentais obtidos no ensaio **Água 1** com o tubo de Pitot, sem correção nos valores de velocidade. Neste gráfico é observada a concordância entre os resultados experimentais e o teórico da equação logarítmica de perfil adimensional, ou modelo Newtoniano de duas camadas para tubos lisos no centro turbulento. Observa-se assim um coeficiente de correção do Pitot próximo à unidade. O valor médio encontrado para o coeficiente de correção do tubo de Pitot foi $K_1 = 0,9644$, coeficiente este obtido por relação entre a vazão média teórica obtida da lei logarítmica e a vazão média obtida utilizando a velocidade do Pitot no ponto central.

Ou seja, utilizando-se a equação 3.5, $U = u_{\max} - 3,75 u^*$ onde U é a velocidade média, $u_{\max}$ é a velocidade pontual máxima na seção do tubo e u^* é a velocidade de atrito do fluxo correspondente.

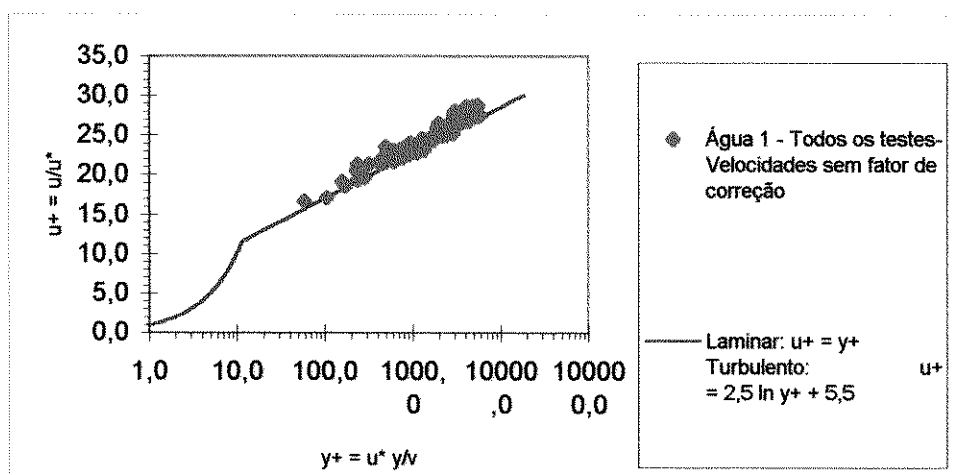


Figura 5.1.2 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas para Água 1

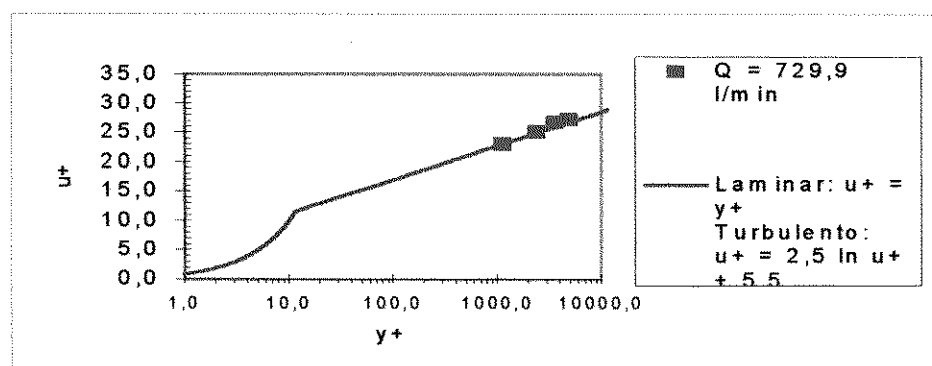


Figura 5.1.3 – Perfil adimensional Ensaio água 1

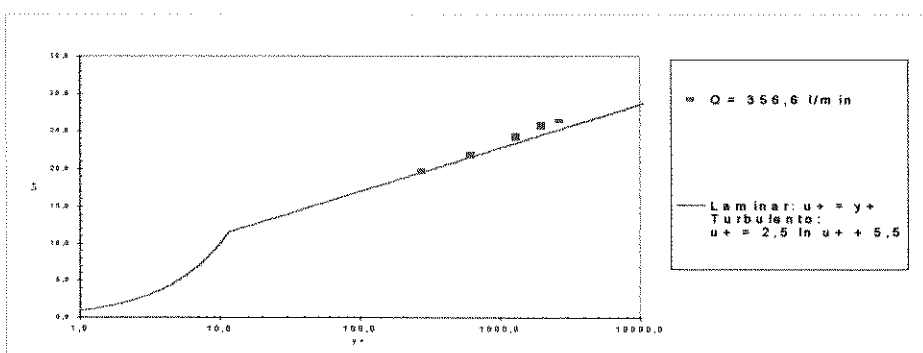


Figura 5.1.4 – Perfil adimensional de velocidades – Ensaio Água 1

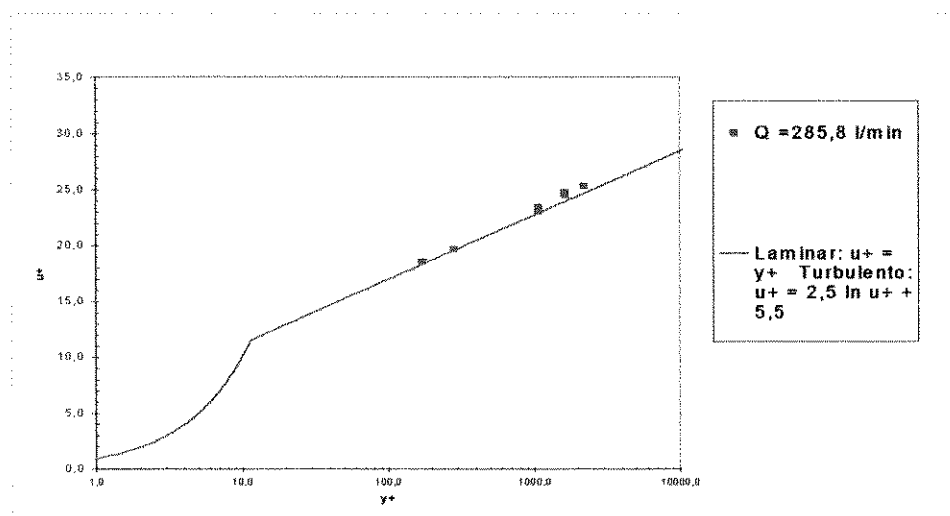


Figura 5.1.5 – Perfil adimensional de velocidades – Ensaio Água 1

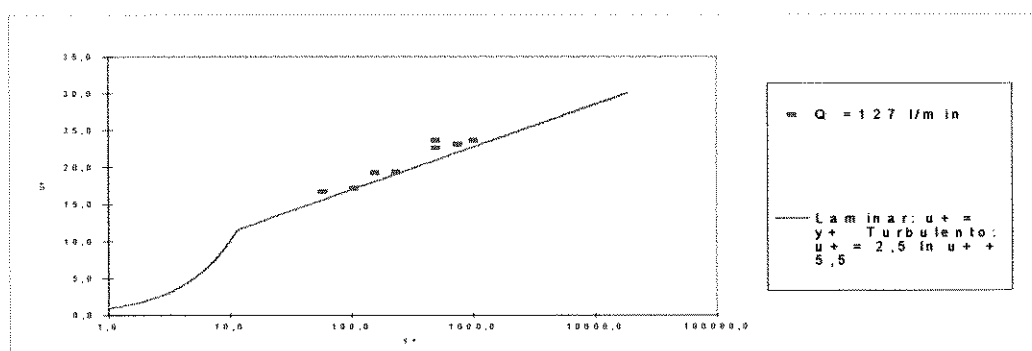


Figura 5.1.6 – Perfil adimensional de velocidades – Ensaio Água 1

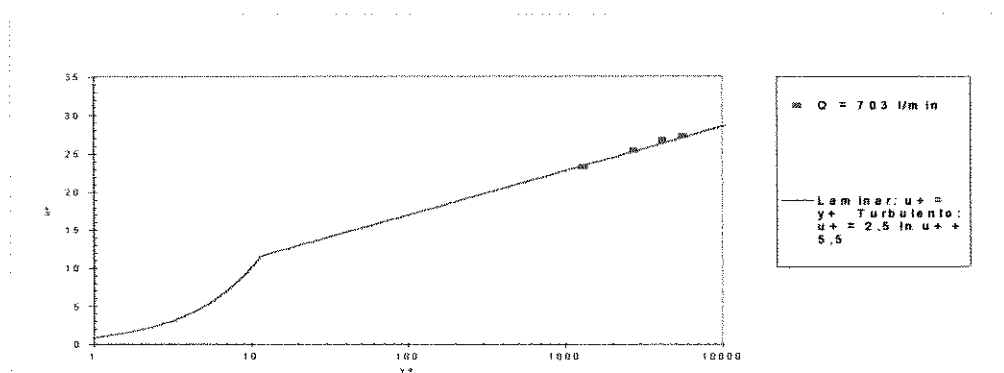


Figura 5.1.7 - Perfil adimensional de velocidades – Ensaio Água 2

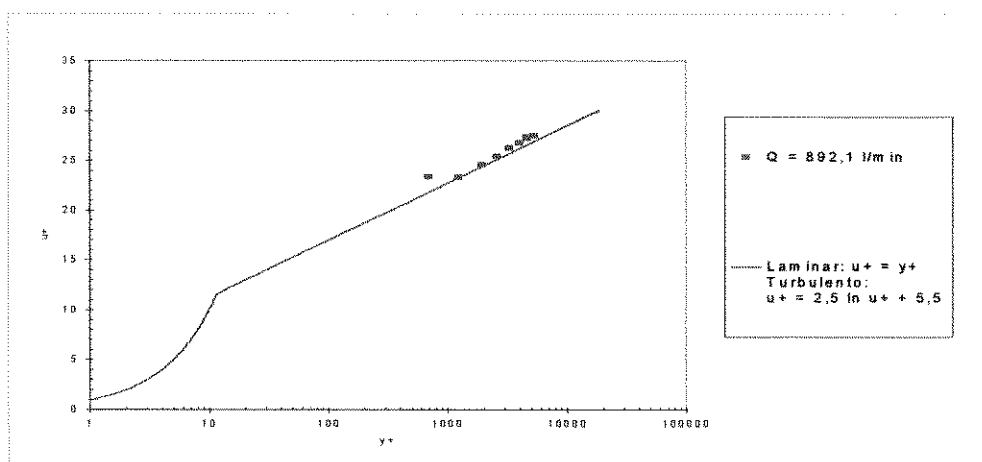


Figura 5.1.8 – Perfil adimensional de velocidade – Água 2

Perfil Adimensional - Modelo de duas camadas - Água 2

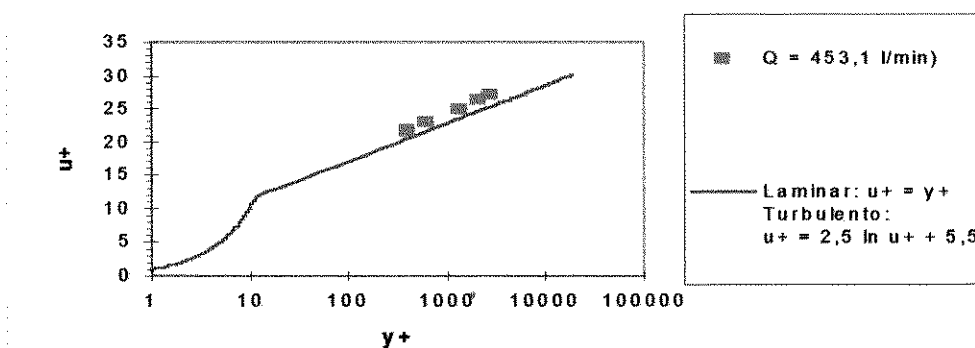


Figura 5.1.9 – Perfil adimensional de velocidade – Água 2

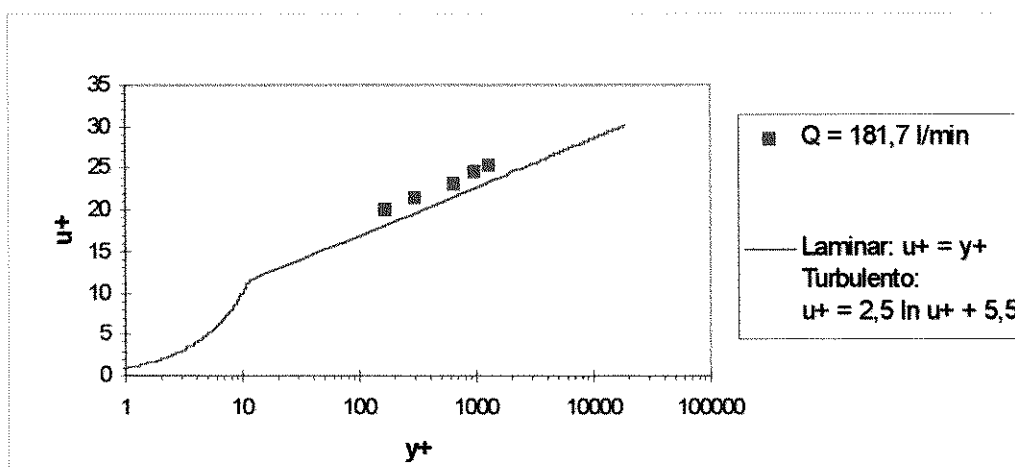


Figura 5.1.10 – Perfil adimensional de velocidade – Água 2

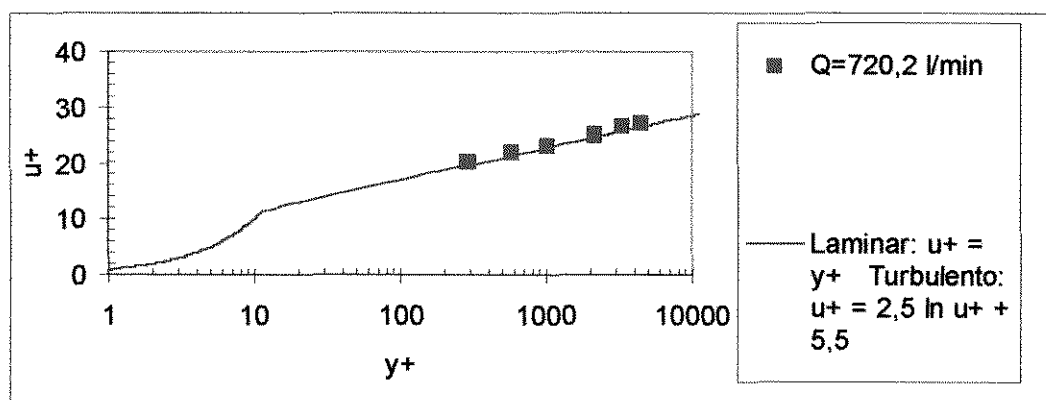


Figura 5.1.11 – Perfil adimensional de velocidade – Água 3

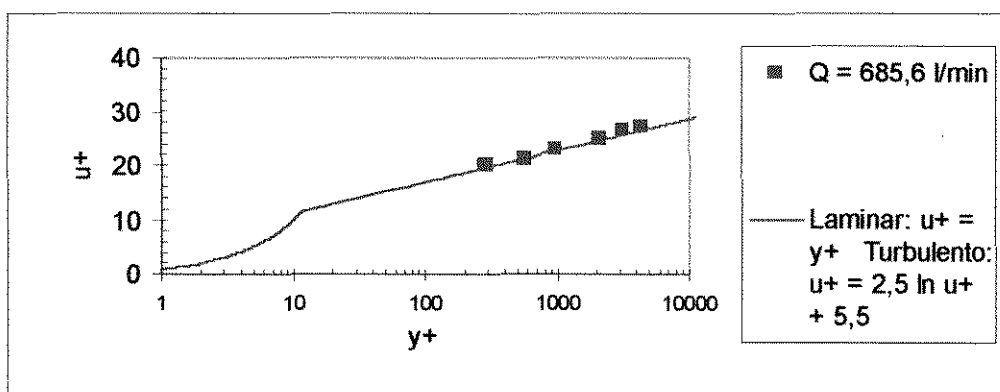


Figura 5.1.12 – Perfil adimensional de velocidade – Água 3

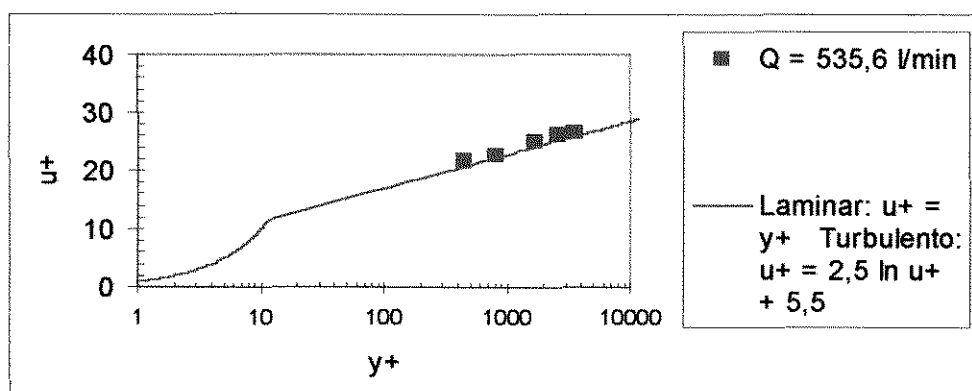


Figura 5.1.13 – Perfil adimensional de velocidade – Água 3

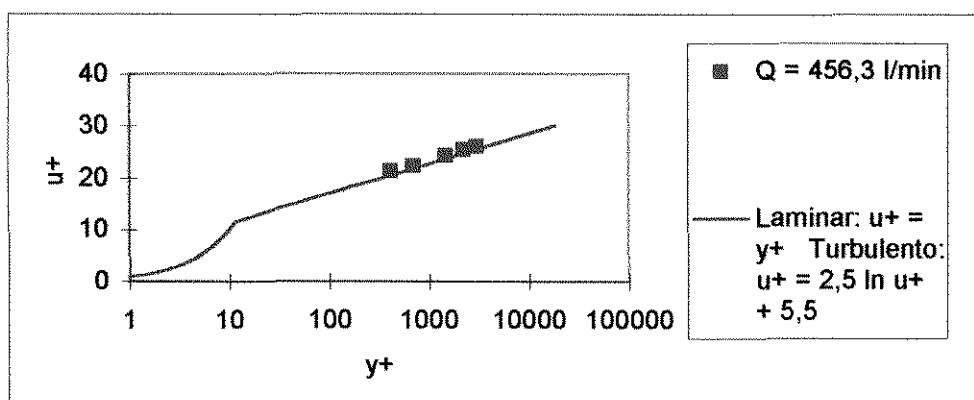


Figura 5.1.14 – Perfil adimensional de velocidade – Água 3

O coeficiente K_1 foi obtido da seguinte forma: para um dado valor fixo de u^* , K_1 é a relação entre a velocidade média teórica (calculada pelas equações 3.4 e 3.5) e a velocidade média experimental (calculada por equação 3.5 para $u_{\max}$ experimental).

A velocidade máxima experimental é obtida através do diferencial de pressão medido com tubo de Pitot no ponto central e utilizando a equação 4.1.

A velocidade máxima teórica foi obtida da lei logarítmica $u^+ = 2,5 \ln y^+ + 5,5$, (equação 3.4) para y igual a $D/2$.

As Figuras 5.1.3, 5.1.4, 5.1.5 e 5.1.6, representam as velocidades pontuais obtidas na vertical da seção do tubo, e respectivamente para as vazões de 729,9 l/min, 356,6 l/min, 285,8 l/min e 127,0 l/min. Nestes gráficos, com exceção do referente à menor vazão, observa-se nitidamente a variação do coeficiente do tubo de Pitot no centro do tubo em relação aos pontos mais próximos à parede. Na parede do tubo o coeficiente é próximo à unidade, enquanto na região central do tubo ele se torna menor. Para a menor vazão de 127,0 l/min, observa-se um maior desvio dos pontos experimentais em relação aos valores teóricos, de modo que vazões menores que cerca de 250 l/min foram evitadas no trabalho sobre tubo de Pitot.

As Figuras 5.1.7, 5.1.8, 5.1.9 e 5.1.10 representam as velocidades pontuais obtidas com tubo de Pitot no ensaio **Água 2**, e cujas vazões são respectivamente 703,0 l/min, 892,1 l/min,

453,1 l/min e 181,7 l/min. As pequenas diferenças entre os valores do ensaio **Água 1** e **Água 2**, devem-se provavelmente à diferença no tempo de batelada dos dois ensaios. Os testes de **Água 1** foram realizados com tempo de batelada igual a 60s para determinação da vazão e dos diversos diferenciais de pressão, e igual a 30 s nos demais pontos do tubo de Pitot, enquanto em **Água 2**, as bateladas foram de 60s e 40 s respectivamente.

As Figuras 5.1.11, 5.1.12, 5.1.13 e 5.1.14 representam as velocidades pontuais do ensaio **Água 3**, respectivamente para as vazões de 720,2 l/min, 685,6 l/min, 535,6 l/min e 456,3 l/min. Nestes, observa-se maior concordância de dados do que em **Água 1**. O tempo de batelada foi de 90 s para o primeiro teste e de 50 s para os demais pontos do Pitot, tempo este idêntico ao utilizado nos ensaios com as areias. O coeficiente médio do Pitot de relação entre a vazão teórica da lei logarítmica e a vazão obtida experimentalmente pelo ponto central, resultou em $K_1 = 0,9682$. Todos os ensaios posteriores à **Água 3**, obedeceram tempo de batelada de 90 s e 50 s, respectivamente para o primeiro teste e demais pontos da seção do tubo, devido aos resultados de maior coerência com valores teóricos.

Embora os resultados experimentais de **Água 3** encontrem-se mais próximos dos teóricos do que os de **Água 1**, os coeficientes de correção do Pitot de ambos os ensaios praticamente não diferem entre si. $K_1 = 0,9682$ para **Água 3** e $K_1 = 0,9644$ para **Água 1**, sendo o desvio relativo entre ambos igual a 0,4%.

5.2 Ensaio de água e areias

Apresentam-se a análise e conclusões sobre características hidrodinâmicas de fluxo de água e areia BC e de água e areia A.

5.2.1 – Perda de Carga de Água e AreiaBC

Apresenta-se nas Figuras 5.2.1.1, 5.2.1.2, 5.2.1.3 e 5.2.1.4, as perdas de carga unitária J (m/m) em função da velocidade média do tubo, para as misturas de água e areia BC.

Estes gráficos correspondem respectivamente às concentrações volumétricas de 2%, 5%, 10% e 15%.

A velocidade crítica de sedimentação foi determinada visualmente e por diminuição da velocidade do fluxo através do variador de velocidade. Ela foi visualmente reconhecida pela condição incipiente de aparecimento de um mínimo de sólidos ao longo do fundo do tubo, anterior à formação de um fino alinhamento de sólidos no fundo da tubulação..

Nestas Figuras 5.2.1.1, 5.2.1.2, 5.2.1.3 e 5.2.1.4, indica-se também a curva dos ensaios com água, obtida anteriormente aos ensaios com a areia BC. Observa-se que alguns pontos referentes à mistura de água e areia BC, possuem perda de carga menor que a da água. Porém isto não é real, uma vez que o desgaste por abrasão do tubo foi gradativamente diminuindo a rugosidade do tubo e consequentemente diminuindo o fator de atrito f . Para a melhor compreensão do fato deve-se observar a Figura 5.1.1.

Os testes realizados com água e areia BC foram realizados na sequência seguinte: iniciou-se com misturas a 5%, e a seguir foi-se aumentando a concentração para 10% e 15%. Procedeu-se então à retirada de quase toda a areia e finalmente foram realizados os testes para 2%. Como pode-se observar nas Figuras 5.2.1.1, 5.2.1.2, 5.2.1.3 e 5.2.1.4, os aumentos de concentração foram graduais e muitos pontos foram obtidos em concentrações intermediárias às apresentadas.

Assim, já que concentrações de 7%, em altas velocidades, apresentam perda de carga menor que a da água, há a indicação de que o desgaste inicia-se logo após o início dos ensaios.

Das Figuras 5.2.1.1, 5.2.1.2, 5.2.1.3 e 5.2.1.4, foram obtidos manualmente os traçados das curvas de perda de carga para equiconcentrações de $C_v = 0,02; 0,05; 0,10$ e $0,15$. Estes valores estão apresentados na Figura 5.2.1.5, e em conjunto com o traçado da reta ajustada por mínimos quadrados para os valores de velocidade crítica de deposição ou sedimentação (V_{cs}). As curvas de J em função da velocidade não se ajustaram bem à função polinomial de segundo grau, de modo que são apresentadas as curvas ajustadas de terceiro grau como se pode observar na própria Figura 5.2.1.5. Polinômios de graus maiores, como quarto ou quinto grau apresentaram melhores coeficientes de correlação.

Os pontos experimentais que resultaram a curva ajustada de velocidade crítica de sedimentação ou deposição da Figura 5.2.1.5 foram obtidos por diminuição da velocidade do fluxo.

Na Figura 5.2.1.6 apresentam-se os pontos de velocidade crítica de sedimentação e o ajuste linear a estes pontos. A reta de ajuste linear é a mesma apresentada na Figura 5.2.1.5 como v_{cs} .

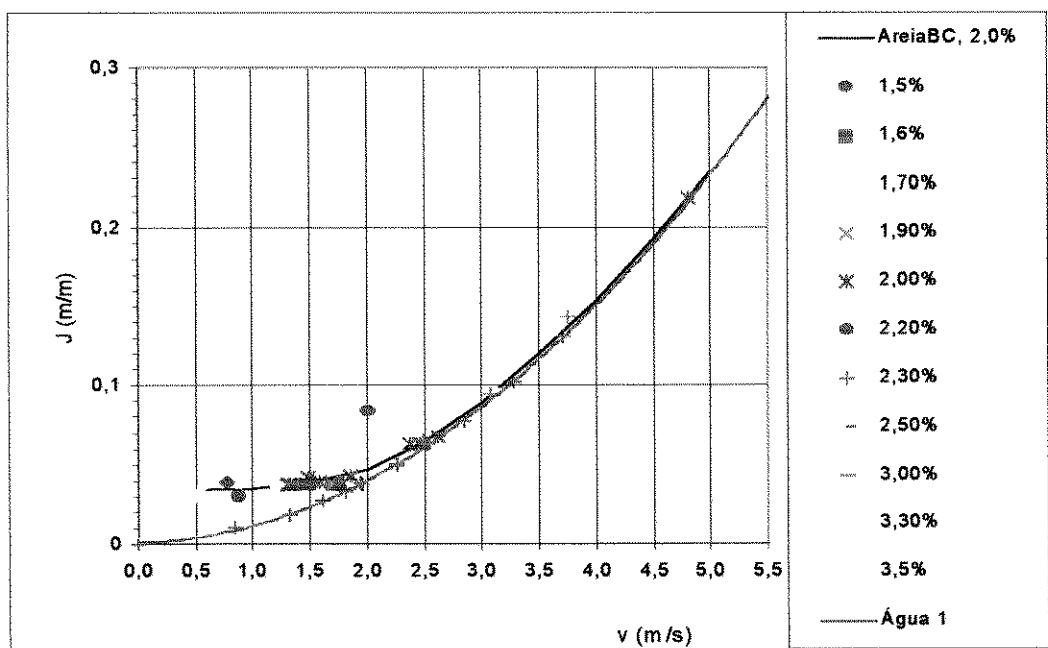


Figura 5.2.1.1 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo para 2% de areia BC.

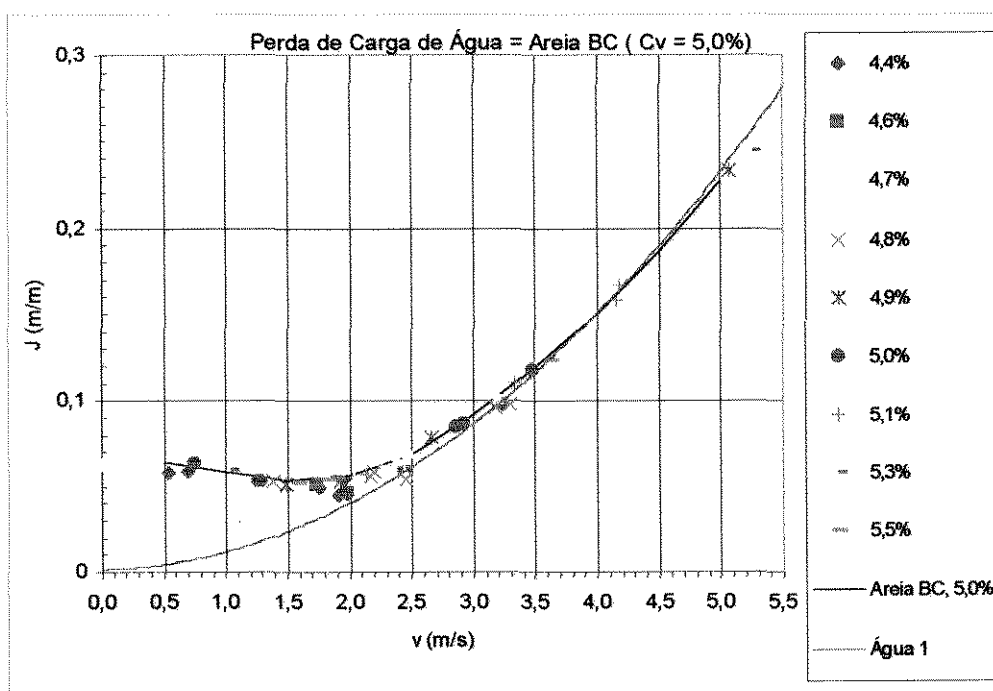


Figura 5.2.1.2 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo para 5% de areia BC.

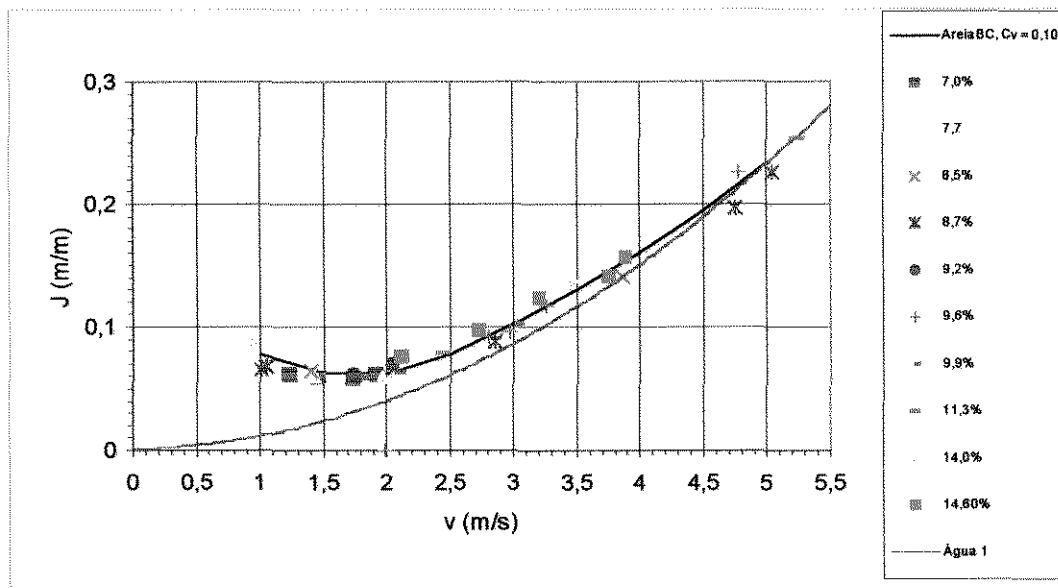


Figura 5.2.1.3 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo para 10% de areia BC.

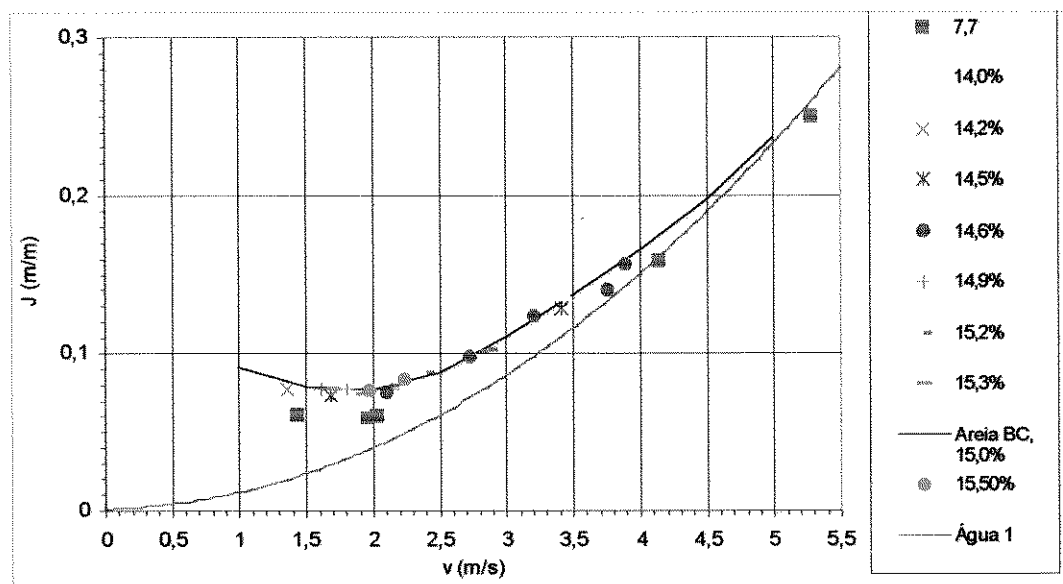


Figura 5.2.1.4 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo para 15% de areia BC.

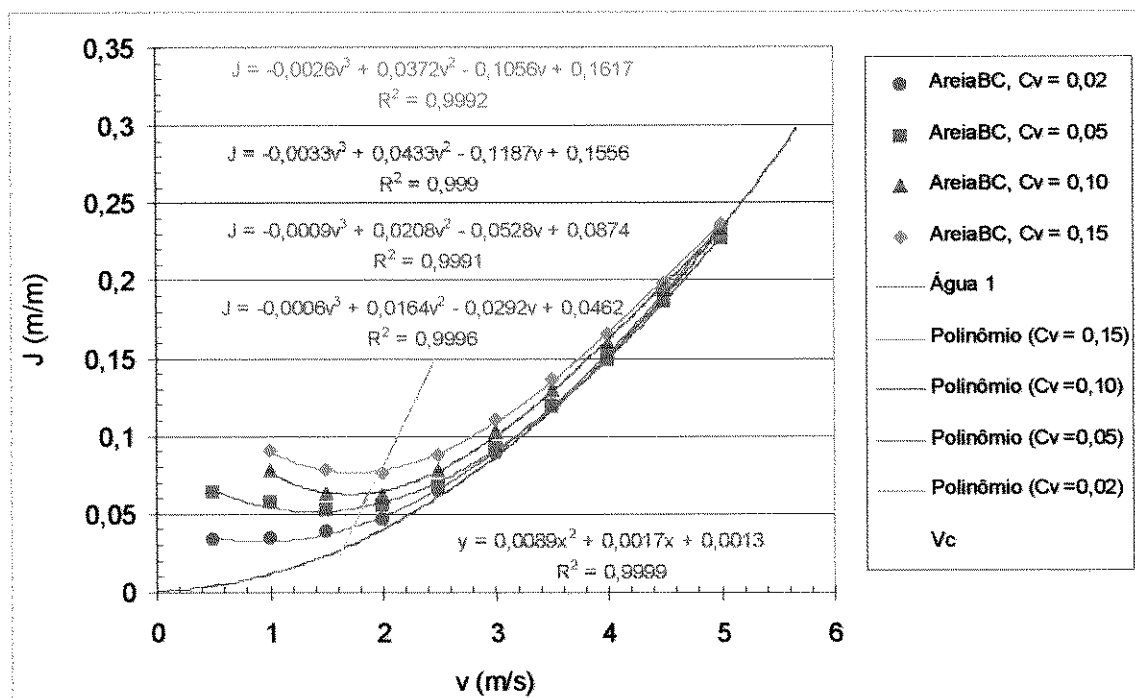


Figura 5.2.1.5 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo para 2%, 5%, 10% e 15% de areia BC. E curva de velocidade crítica de sedimentação. Curvas ajustadas.

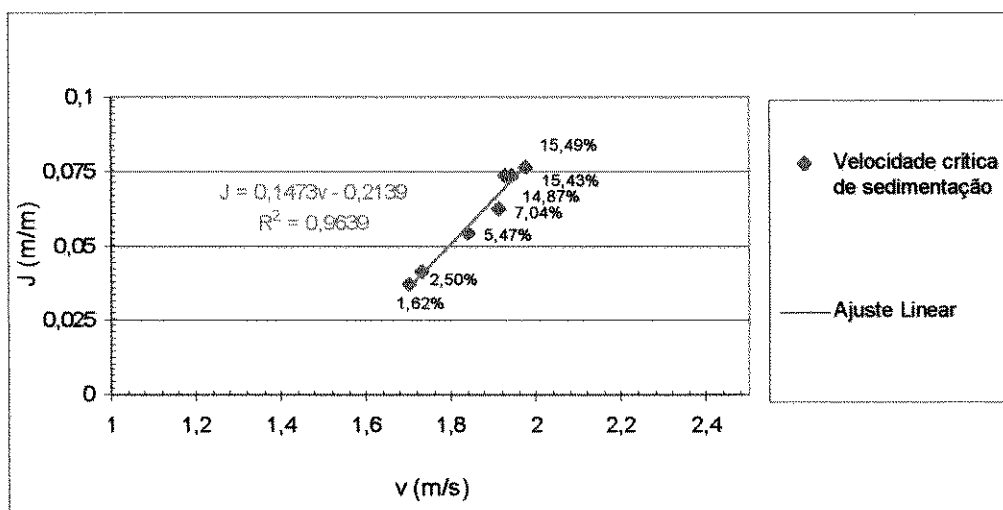


Figura 5.2.1.6 – Curva de $J = f(v)$ de velocidade crítica de sedimentação para diversas concentrações de areia BC.

5.2.2 – Perda de Carga de Água + Areia A

As Figuras 5.2.2.1, 5.2.2.2 e 5.2.2.3 são de perda de carga unitária em função da velocidade, para as misturas de água e areia A. Respectivamente referentes à concentrações de 2%, 5% e 10%.

As curvas de equiconcentração foram obtidas manualmente. Pode-se observar nos referidos gráficos que o sistema de bombeamento com a areia A comportou-se menos estável do que com a areia BC. Porém devido ao número razoável de pontos obtidos foi possível o traçado manual das curvas de J em função de velocidade para equiconcentrações.

A Figura 5.2.2.4 representa os pontos obtidos manualmente e as curvas polinomiais de terceiro grau a eles ajustados.

Indica-se também na Figura 5.2.2.4 a curva de velocidade crítica de sedimentação obtida pelo ajuste dos mínimos quadrados aos pontos experimentais. A Figura 5.2.2.5 apresenta os pontos experimentais de velocidade crítica de sedimentação por diminuição da

velocidade do fluxo e o ajuste polinomial. Esta equação de ajuste encontra-se apresentada na Figura 5.2.2.4 como v_{cs} .

Para pequenas concentrações de areia A, o reconhecimento da velocidade crítica de sedimentação foi semelhante ao utilizado para a areia fina BC. Neste caso a velocidade crítica de sedimentação representa um momento de transição do escoamento, ou seja, ocorre a transição do escoamento heterogêneo para o de leito móvel de sedimentos.

Outro momento de transição do escoamento, com a areia A, observado só em maiores concentrações refere-se ao instante em que os sólidos tendem a estacionar no fundo do tubo. Devido à alta concentração e à baixa velocidade, todos os sólidos presentes no tubo, se movem praticamente no fundo do tubo apresentando-se como uma massa única. Este é um ponto muito instável a todo o sistema e uma pequena diminuição de velocidade acarreta total e rápida sedimentação de sólidos ocasionando o bloqueio total da tubulação. Não fosse a rápida elevação de velocidade proporcionada pelo variador de velocidade, não se conseguiria evitar por diversas ocasiões o bloqueio total da tubulação.

Para concentrações menores que $\pm 4,5\%$, foi possível a anotação da altura do leito de sedimentos, e no instante de velocidade crítica de sedimentação era incipiente a formação de uma fina linha de sedimentos estáticos no fundo do tubo. Em concentrações maiores, esta linha deixava de ser estática e se movia por arrastamento, ou seja, havia alternância entre os estados estático e arrastamento.

Para concentrações maiores, entre $\pm 4,5\%$ e $\pm 11\%$ na velocidade crítica de sedimentação, observou-se que esta linha já não era mais estática. A partir desta velocidade, quando se diminuía a velocidade do fluxo, a medição da altura do leito de sedimentos tornava-se impossível, devido a uma constante alternância entre blocos de sólidos em leito e em arrastamento no fundo do tubo.

Para concentrações em torno de $\pm 4,5\%$ estes blocos ocorriam em gradientes de concentração, sendo que as partículas mais próximas do centro do tubo se moviam com maior velocidade.

Porém nas maiores concentrações, superiores a $\pm 7,0\%$, aparentemente toda a massa de sólidos escoava à um mínimo gradiente de concentração e velocidade, ocorrência esta devido à maior quantidade de sólidos presentes no tubo. Assim, uma pequena diminuição de velocidade do fluxo, a partir do instante em que se percebe um início de sedimentação no tubo, não levava

a uma formação de um pequeno leito estático de sedimentos e uma camada de sólidos escoando acima dele, mas toda a massa sólida se depositava rapidamente levando à obstrução total do tubo. Esta operação do sistema deve ser feita cuidadosamente. A obstrução do tubo foi sempre evitada com uma rápida operação do variador de velocidade.

Outro fator a influenciar esta tendência à obstrução total do tubo foi causado pelo sistema de medição de concentração. As concentrações foram medidas pelo desvio do fluxo, de modo que em baixas velocidades, o tempo de desvio variou de 32 s a 87 s, respectivamente para as velocidades de 1,16 m/s e 0,53 m/s.

Observou-se que para a areia BC a velocidade crítica de sedimentação encontra-se à direita do ponto de mínima perda de carga (Figura 5.2.1.5), enquanto que para a areia A, excetuando a concentração de 2,0%, ela se encontra à esquerda do ponto de mínima perda de carga (Figura 5.2.2.5). O que indica a não coincidência entre a velocidade crítica (ponto de mínima perda de carga) e a velocidade crítica de sedimentação (ponto em que se inicia o processo de deposição de material no fundo do tubo).

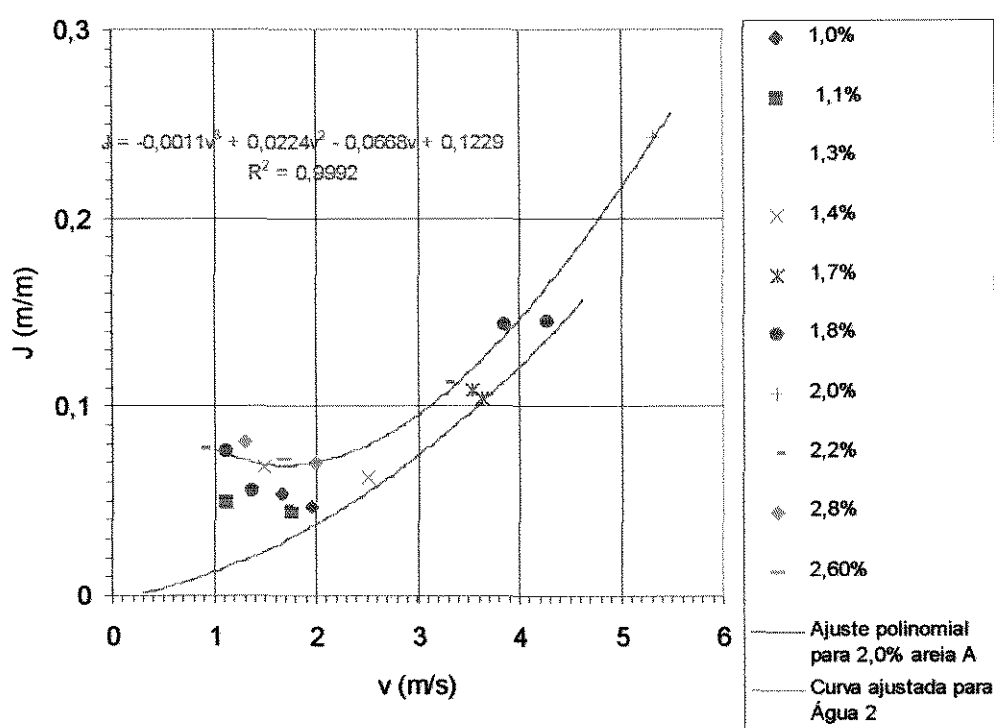


Figura 5.2.2.1 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo de água e areia A em concentração de 2%.

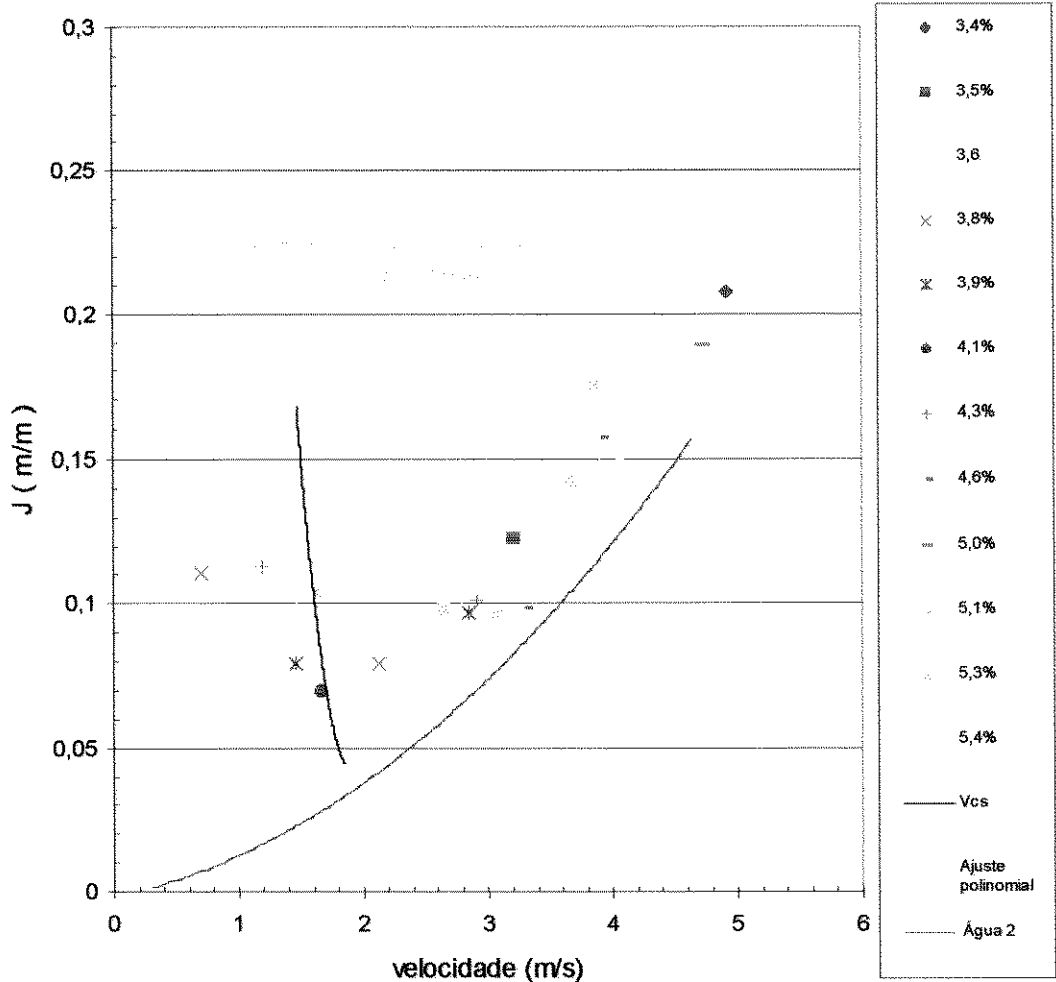


Figura 5.2.2.2 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo de água e areia A em concentração de 5%.

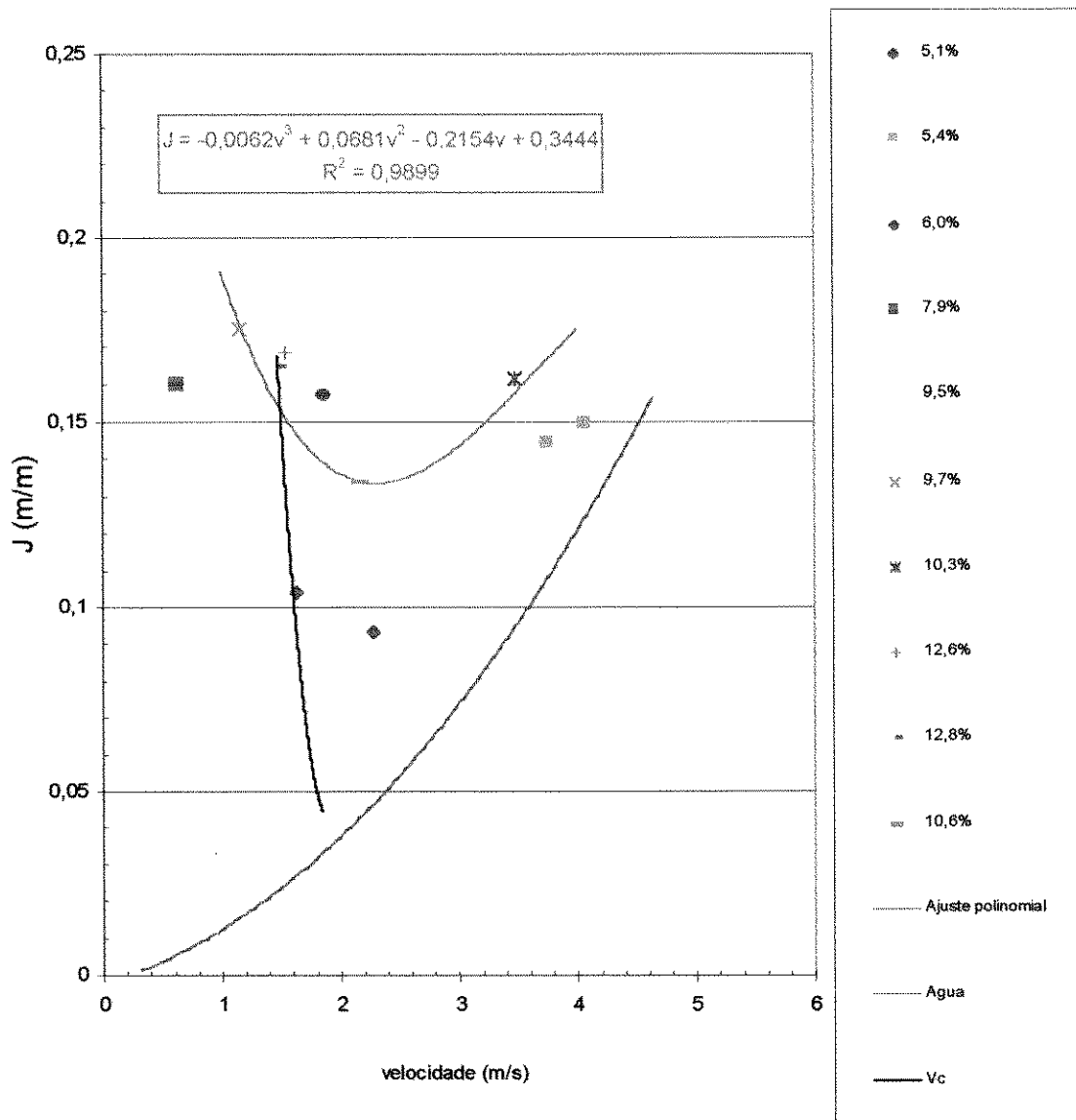


Figura 5.2.2.3 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo de água e areia A em concentração de 10%.

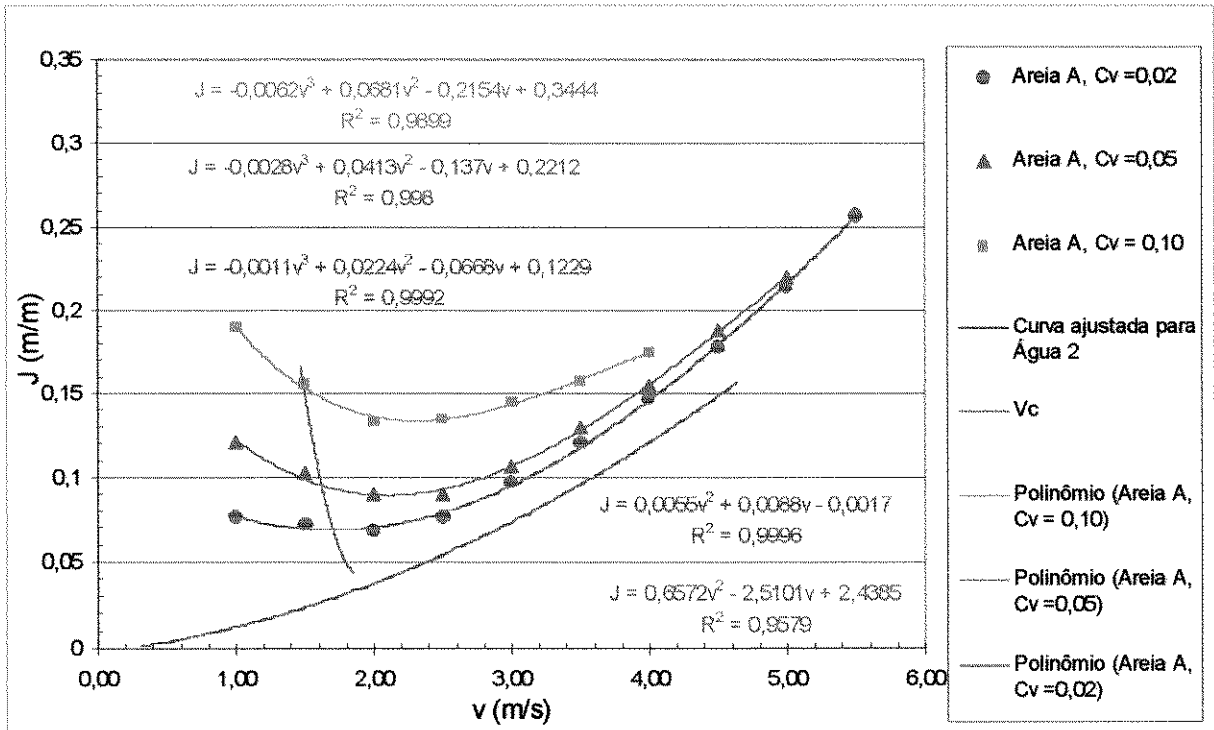


Figura 5.2.2.4 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo de água e areia A em concentração de 2%, 5% e 10%. Indicação da curva de velocidade crítica de sedimentação e das curvas de ajuste.

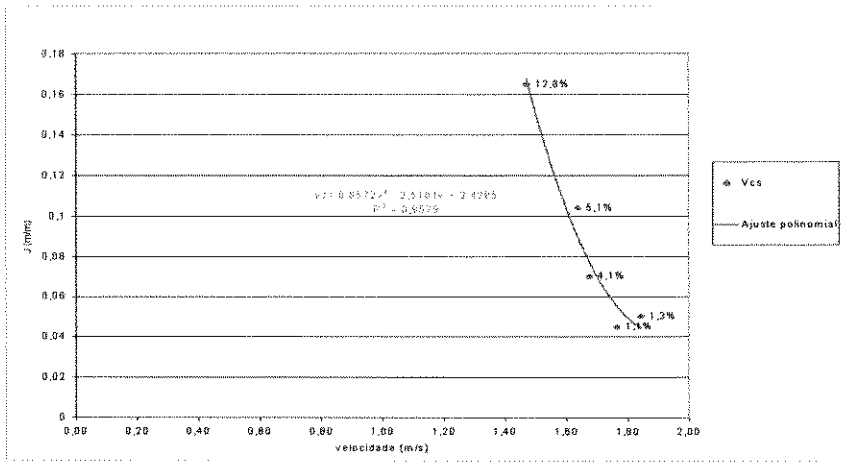


Figura 5.2.2.5 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo de água e areia A na condição crítica de sedimentação.

5.3 – Ensaios com soluções de polímero

A seguir apresenta-se a análise e as conclusões dos experimentos com o polímero NALCO 4045. No item 5.3.1 encontram-se análises e conclusões sobre escoamento de soluções de NALCO 4045 e no item 5.3.2 as referentes às soluções de NALCO 4045 em presença de areia BC.

5.3 1 - Ensaios com solução de polímero

Apresentam-se conclusões gerais sobre os ensaios realizados com suspensões de polímero, abordando a perda de carga, a degradação e a distribuição de velocidade.

5.3 1 1– Perdas de Carga e degradação de soluções de polímero

A perda de carga unitária J (m/m) em função da velocidade média do fluxo v (m/s) foi determinada experimentalmente através da diminuição gradual da rotação do motor, ou seja, com metodologia experimental de diminuição gradual da velocidade do fluxo, através de diminuição da rotação do motor da bomba principal. A Figura 5.3.1.1.1, apresenta estes valores de J (m/m) em função de v (m/s) para as soluções de 100, 200 e 400 ppm de NALCO 4045 em comparação à água. A denominação ÁGUA 4 refere-se ao ensaio realizado com água, ensaio este anterior aos ensaios realizados com polímero, e posterior aos ensaios realizados com mistura de água e areia A.

Na Figura 5.3.1.1.1, observa-se nas altas velocidades (início dos ensaios) uma maior redução na perda de carga em comparação à água, comportamento este observado em todas as medições de perda de carga por diminuição de velocidade e solução de polímero fresca. As soluções de polímero apresentam maior redução de arraste em escoamentos turbulentos, VIRK, P. S. (1975) apresentou resultados experimentais de solução aquosa de PEO, e concluiu que para números de Reynolds (Re) menores que 2000 (fluxo laminar), o solvente e a solução apresentaram idêntico fator de atrito, para $3000 < Re < 12000$, não se verificou a redução de arraste e para $Re > 12000$, o fator de atrito da solução diverge do fator de atrito da água, na direção de menores valores.

O polímero utilizado também apresentou maiores reduções de arraste em maiores velocidades. Para as velocidades de 1,0 m/s e 5,5 m/s, e 100 ppm de polímero, tem-se respectivamente, número de Reynolds igual a $12,5 \cdot 10^3$ e $67 \cdot 10^3$. E para 400 ppm, respectivamente para as mesmas velocidades, tem-se Re igual a $9,9 \cdot 10^3$ e $55 \cdot 10^3$. E se observa na Figura 5.3.1.1.1, que ocorre redução de arraste nesta faixa de velocidades.

As curvas de perda de carga em função da velocidade são sempre curvas suaves e não apresentam bruscas variações. As bruscas variações vistas neste gráfico referem-se às medições intermediárias realizadas com tubo de Pitot para determinação de perfil de velocidade.

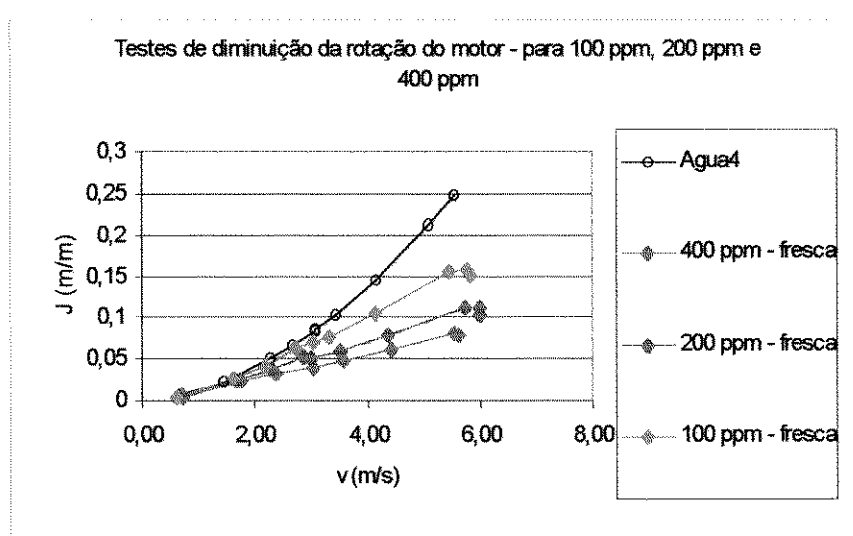


Figura 5.3.1.1.1 – Perda de carga unitária em função de velocidade média do fluxo, em testes de diminuição da rotação do motor, para 100 ppm, 200 ppm e 400 ppm de polímero.

Observa-se nestas curvas de perda de carga em função da velocidade média do fluxo, que um ou outro primeiros pontos de medição, apresentam alta redução de perda de carga. Estas perdas de carga muito reduzidas verificadas para as velocidades altas, logo no início dos ensaios, acredita-se ser função da instabilidade inicial do sistema, pela não homogeneização total da mistura, ou seja, parece que mesmo sem a homogeneização total da mistura, o efeito de redução de arraste já se apresenta em elevados valores.

Do ponto de vista prático trata-se de uma situação muito favorável, uma vez que quando se inicia a operação de um sistema com velocidades altas, sem polímero, o sistema solicita uma quantidade muito elevada de energia. Energia esta que poderá ser consideravelmente reduzida com presença de polímero.

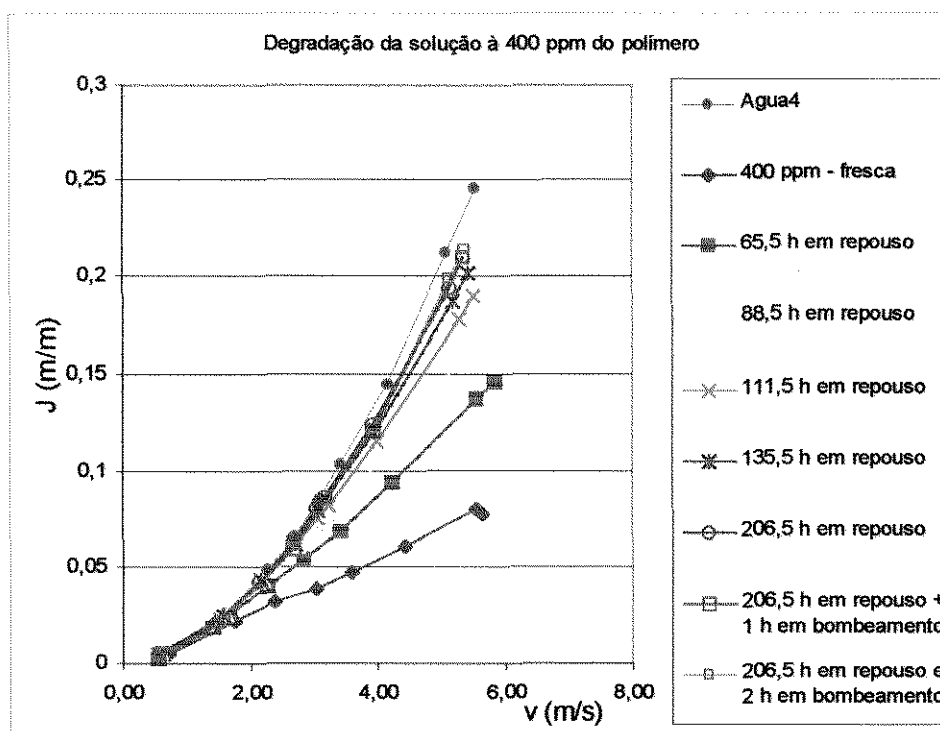


Figura 5.3.1.1.2 – Degradação da solução à 400 ppm de polímero em função de horas de repouso e de bombeamento.

A Figura 5.3.1.1.2, apresenta a degradação da solução de 400 ppm de NALCO 4045 em testes realizados por diminuição da velocidade do fluxo. Observa-se que apesar de deixado em repouso por cerca de 206,5 horas, 2 horas em bombeamento constante e sete bateladas de cerca de 30 minutos cada, a solução ainda não atinge em altas velocidades, os mesmos valores de perda de carga do fluxo de água.

A Figura 5.3.1.1.3 apresenta valores de perda de carga unitária em função da velocidade em testes de aumento de velocidade pelo aumento da rotação do motor. Observa-se neste gráfico que, para uma dada concentração de polímero, as perdas de carga são maiores do que no teste por diminuição da rotação do motor, fenômeno este denominado histerese, e que se verificou neste tipo de polímero.

Conclui-se que apesar das curvas de $J = f(v)$ se apresentarem diferentes no aumento e na diminuição de velocidade do fluxo, a máxima redução de arraste apresentada no teste por diminuição (para 400 ppm) parece praticamente coincidente com a curva de 1200 ppm que apresenta a maior redução de atrito no teste por aumento de velocidade do fluxo.

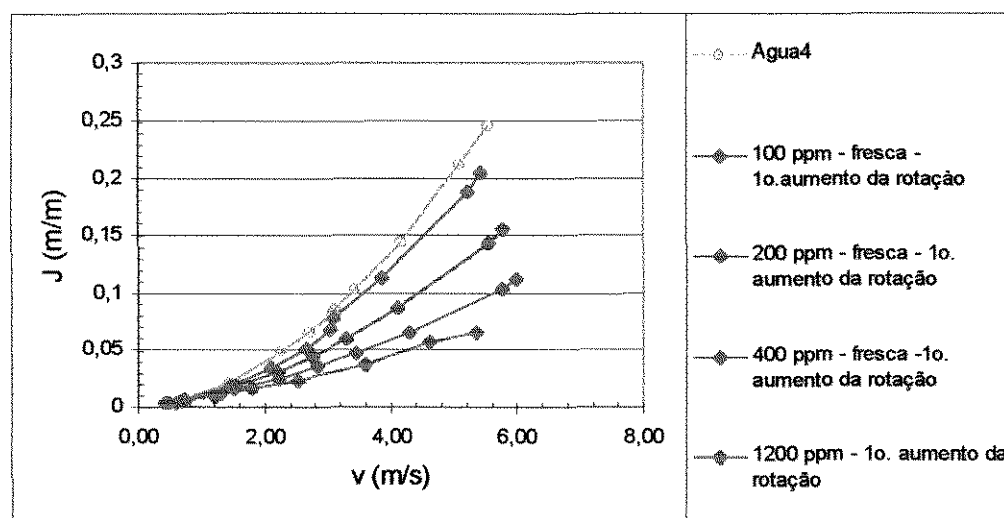


Figura 5.3.1.1.3 – $J = f(v)$ em testes de aumento de rotação do motor para soluções frescas de 100, 200, 400 e 1200 ppm de polímero.

As Figuras 5.3.1.1.4, 5.3.1.1.5 e 5.3.1.1.6 apresentam esta observação de histerese respectivamente para as soluções de 100, 200 e 400 ppm de NALCO 4045. Isto leva a sugerir que as operações de sistemas de bombeamento utilizando soluções poliméricas, devem preferencialmente se iniciar com velocidade alta.

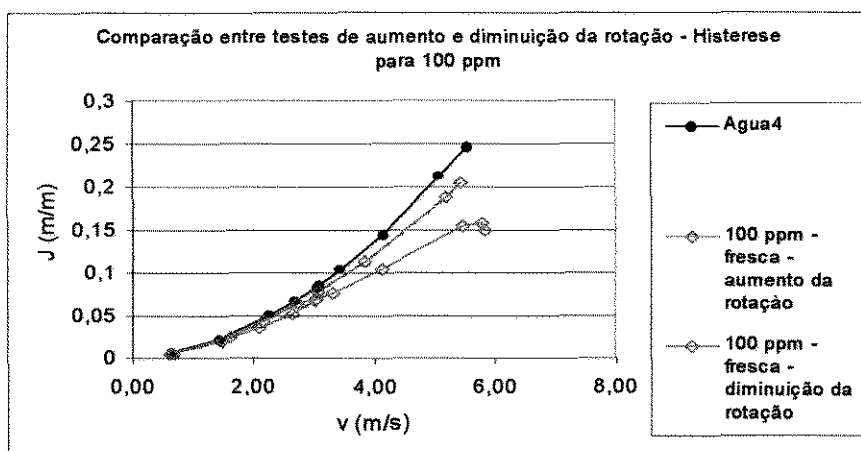


Figura 5.3.1.1.4 - $J = f(v)$ para testes, com solução fresca à 100 ppm de polímero, de aumento e de diminuição da rotação do motor.

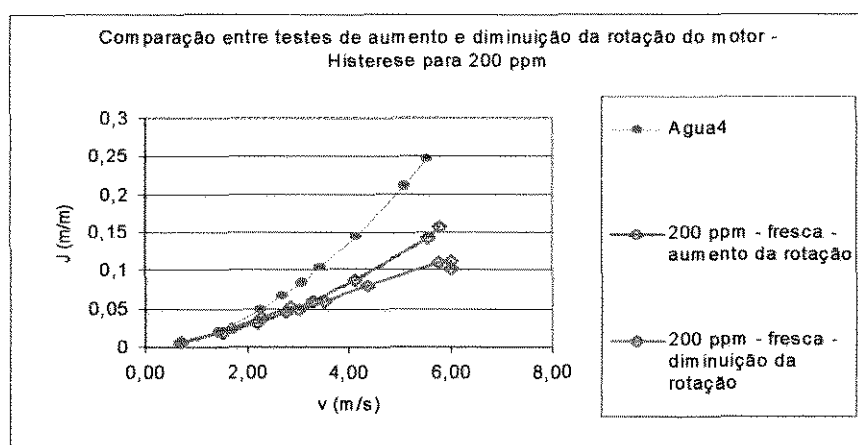


Figura 5.3.1.1.5 - $J = f(v)$ para testes, com solução fresca à 200 ppm de polímero, de aumento e de diminuição da rotação do motor.

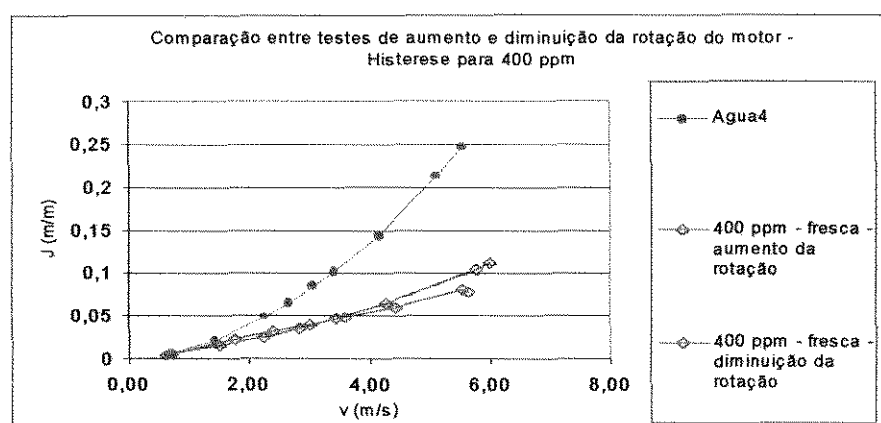


Figura 5.3.1.1.6 - $J = f(v)$ para testes, com solução fresca à 400 ppm de polímero, de aumento e de diminuição da rotação do motor.

Para melhor conhecimento do comportamento da solução de NALCO 4045, foram realizadas seqüências de testes aumentando a velocidade do fluxo até determinado valor e em seguida reduzindo-a. Isto, dependendo da concentração do polímero foi repetido várias vezes.

A Figura 5.3.1.1.7 apresenta para 100 ppm um aumento seguido de uma diminuição da rotação do motor. Observa-se que praticamente não houve degradação nesta concentração de polímero.

A Figura 5.3.1.1.8 apresenta para 200 ppm o aumento, a diminuição, o segundo aumento, a segunda diminuição e o terceiro aumento da rotação do motor. Pode-se observar a degradação da solução a 200 ppm nesta sequencia de cisalhamentos.

A Figura 5.3.1.1.9 apresenta para 400 ppm o aumento, a diminuição e o segundo aumento da rotação do motor.

A Figura 5.3.1.1.10 apresenta para 600 ppm o aumento, a diminuição e o segundo aumento da rotação do motor.

A Figura 5.3.1.1.11 apresenta para 1200 ppm, o aumento, a diminuição e o segundo aumento da rotação do motor. Neste gráfico observa-se menor apresentação de degradação.

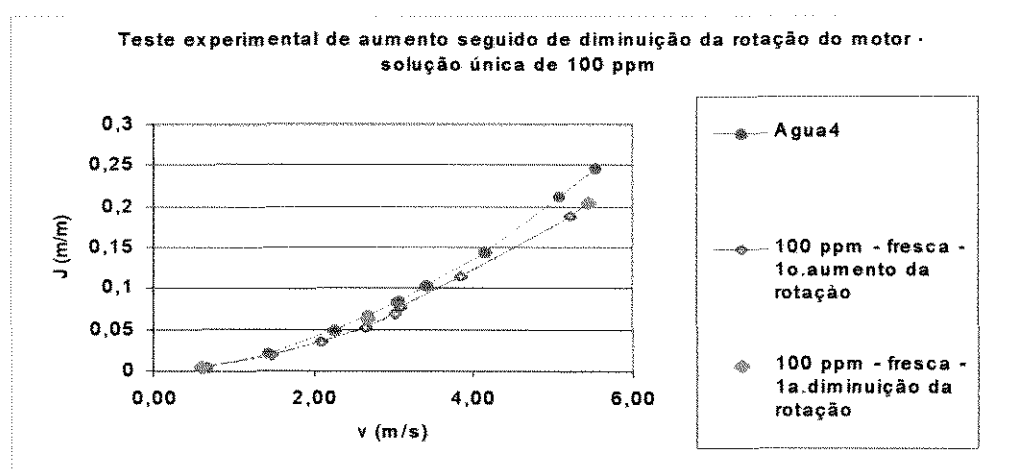


Figura 5.3.1.1.7 – $J = f(v)$ para solução única de 100 ppm em teste de aumento seguido de diminuição da rotação do motor.

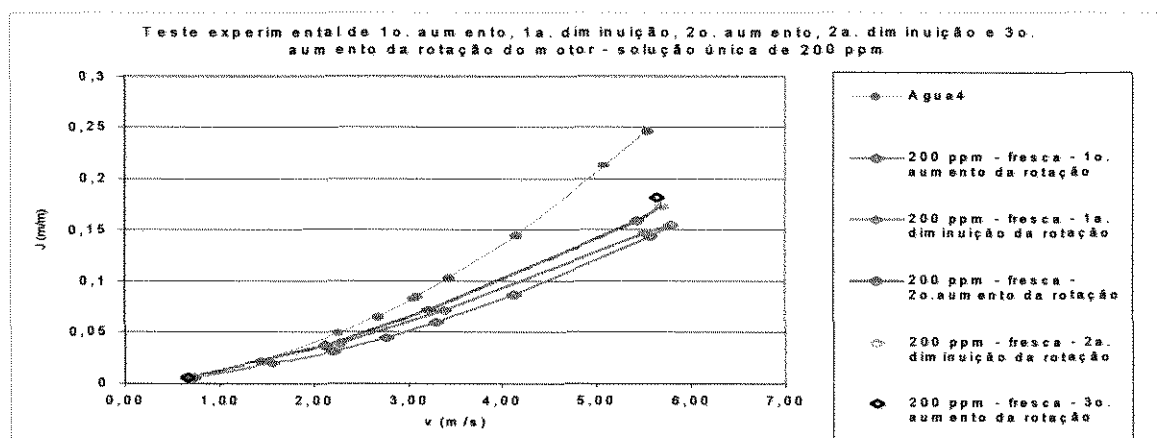


Figura 5.3.1.1.8 – $J = f(v)$ para solução única de 200 ppm em teste de aumento seguido de diminuição da rotação do motor.

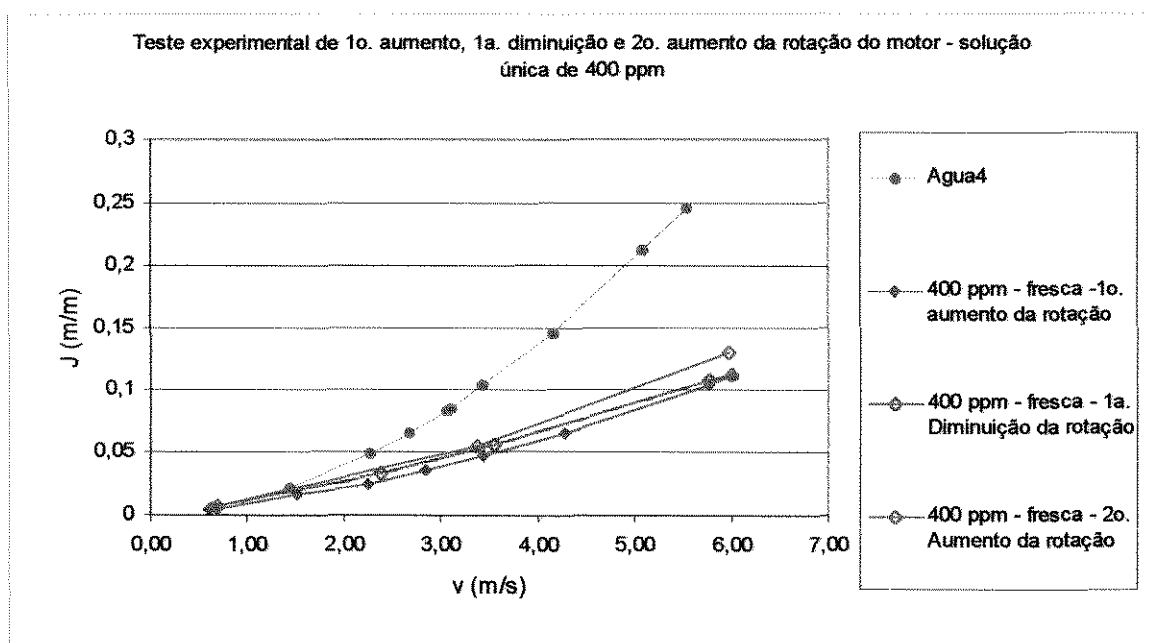


Figura 5.3.1.1.9 – $J = f(v)$ para solução única de 400 ppm em teste de aumento seguido de diminuição da rotação do motor.

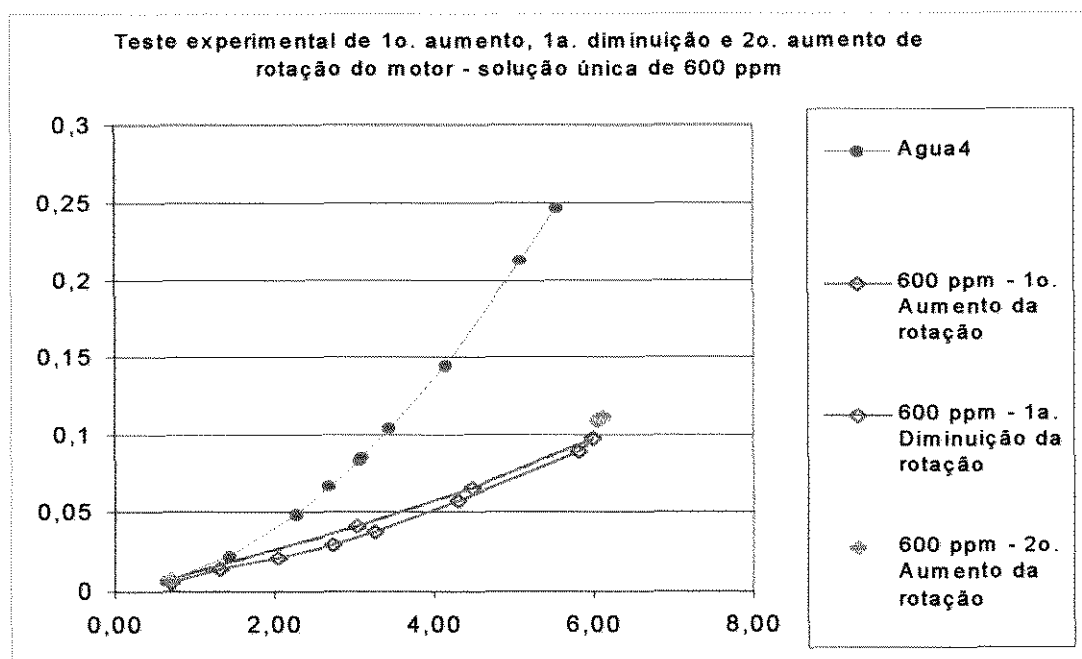


Figura 5.3.1.1.10 – $J = f(v)$ para solução única de 600 ppm em teste de aumento seguido de diminuição da rotação do motor.

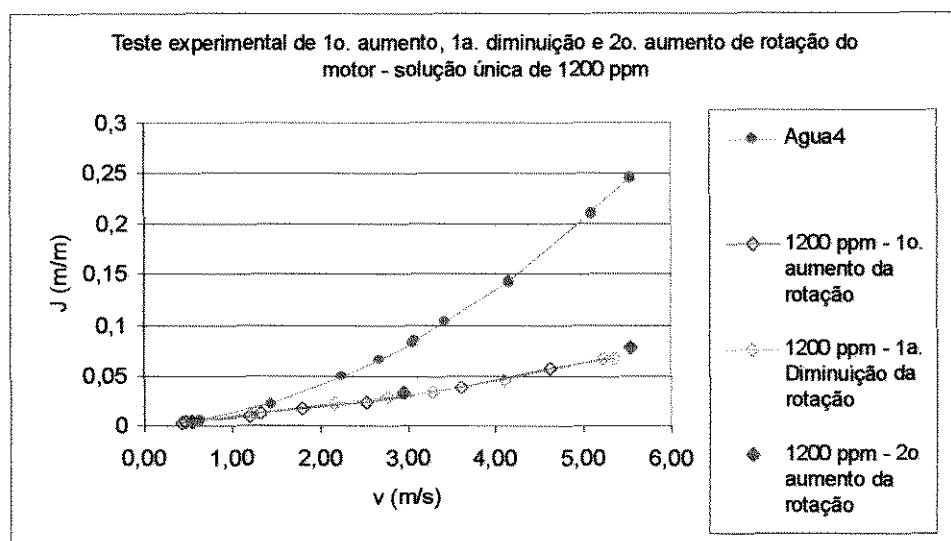


Figura 5.3.1.1.11 – $J = f(v)$ para solução única de 1200 ppm em teste de aumento seguido de diminuição da rotação do motor.

Estes testes das Figuras 5.3.1.1.7 a 5.3.1.1.11 foram realizados para verificação de degradação mecânica por constante bombeamento da solução. Verificou-se que a solução à 1200 ppm apresentou insignificante degradação quando comparada às demais concentrações. Verificou-se também que apesar dos graduais aumentos e diminuições da rotação do motor, ainda as soluções apresentam elevados valores de redução de arraste em altas velocidades.

5.3.1.2 – Distribuição de velocidade de solução de NALCO 4045

A partir dos diferenciais de pressão obtidos nas medições por bateladas, calculou-se cada velocidade pontual da linha vertical da seção do tubo. Os valores de velocidades pontuais e velocidade adimensional u^+ apresentados são os originais fornecidos nas medições, ou seja, são valores de velocidade sem qualquer fator de correção do tubo de Pitot.

A Figura 5.3.1.2.1 representa para 100 ppm de NALCO 4045, o perfil adimensional de velocidades u^+ em função de y^+ , para diversas vazões.

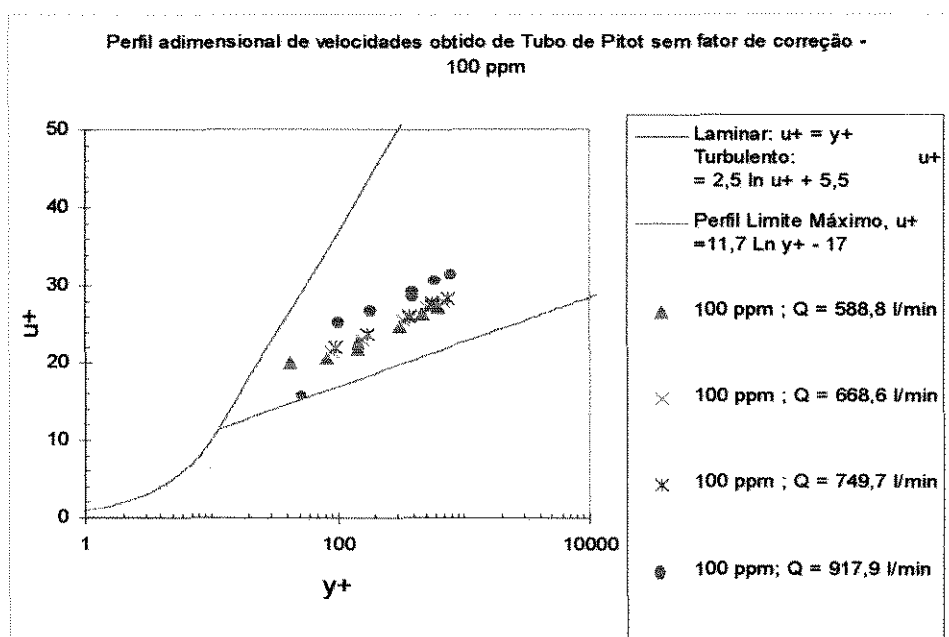


Figura 5.3.1.2.1 – Perfil adimensional obtido de tubo de Pitot sem fator de correção para 100 ppm de polímero.

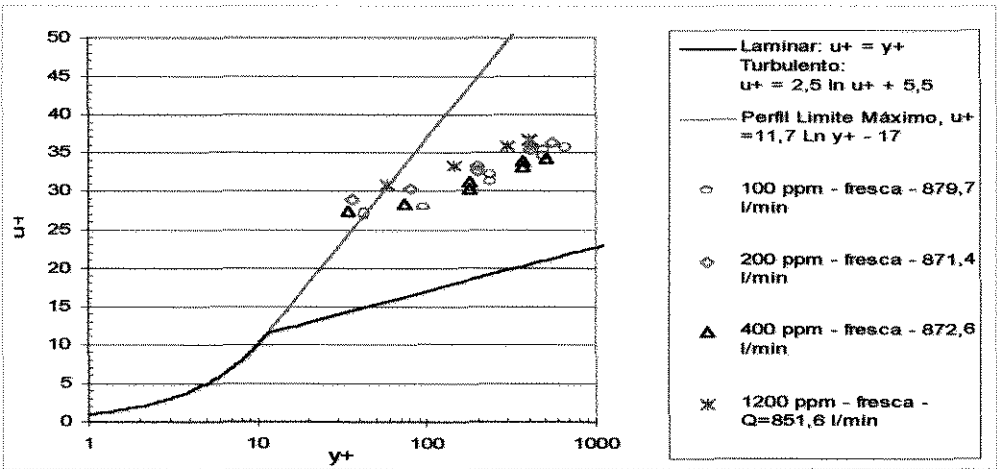


Figura 5.3.1.2.2 – Perfil adimensional de velocidades obtido de tubo de Pitot, sem fator de correção nos valores de velocidade. Obtido para 100, 200, 400 e 1200 ppm de polímero.

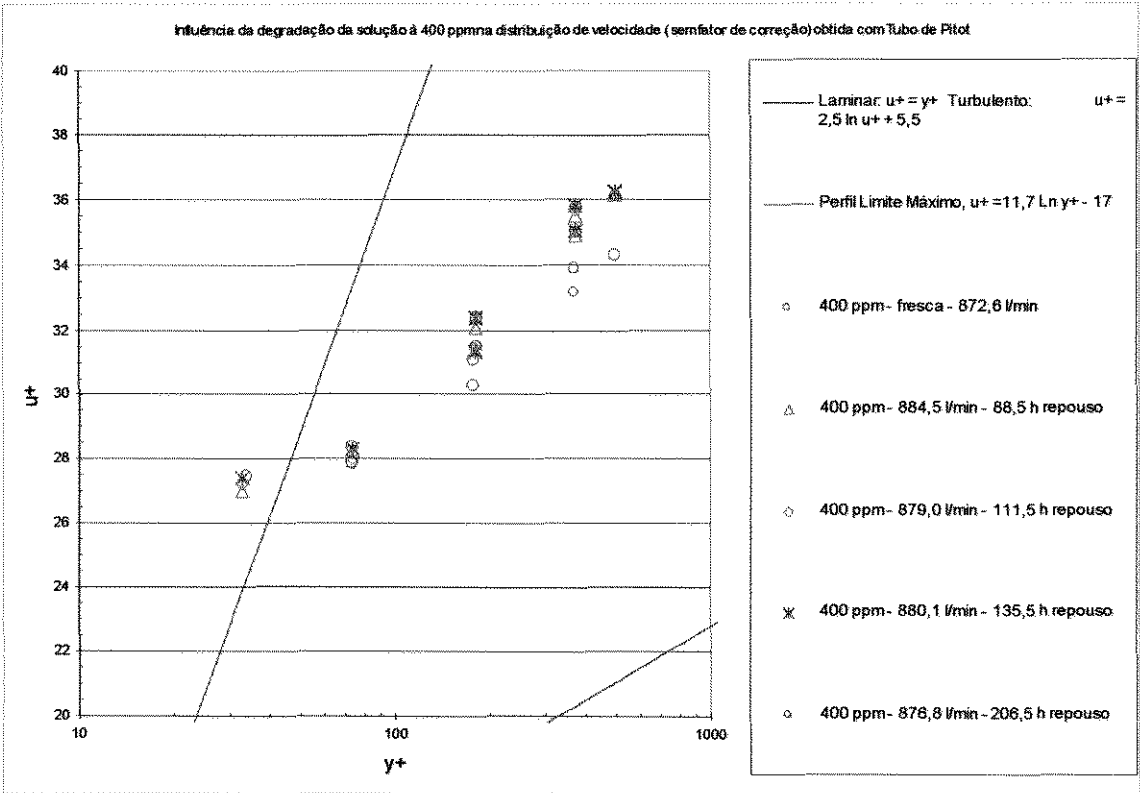


Figura 5.3.1.2.3 – Perfil adimensional de velocidades obtido de tubo de Pitot, sem fator de correção para observação da degradação da solução à 400 ppm em função de horas de repouso

Uma vez que o teste experimental de obtenção dos dados foi iniciado com a maior vazão, nesta, observou-se uma maior influência do polímero sobre as velocidades. Observa-se o aumento da velocidade adimensional u^+ para maiores vazões médias no tubo. O comprimento de mistura permanece constante e igual ao da água. Maiores velocidades médias do escoamento apresentam maior redução de arraste e consequente camada elástica maior. Na Figura 5.3.1.2.1 observa-se a maior camada elástica para a maior vazão.

Na Figura 5.3.1.2.2, apresenta-se o perfil adimensional para vazões praticamente iguais e soluções de 100, 200, 400 e 1200 ppm de NALCO 4045. As soluções frescas foram submetidas à medição, respectivamente, 13, 13, 15 e 13 minutos após o início das bateladas. Observa-se o aumento da velocidade e da subcamada elástica causados pelo aumento da concentração do polímero.

Na Figura 5.3.1.2.3, apresenta-se o perfil adimensional para a solução fresca de 400 ppm e após horas de repouso no tanque principal. Observa-se que para uma mesma vazão, a solução degrada-se aumentando a velocidade no centro do tubo, e em menor grau, diminuindo-a nas proximidades da camada elástica do escoamento.

Devido à degradação, ocorreu aumento na perda de carga e consequentemente, pela Equação 3.4a, deveria ocorrer a diminuição de u^+ e pela Equação 3.4b, aumento em y^+ (devido ao aumento na perda de carga e diminuição na viscosidade), para uma mesma vazão de transporte. Porém as medidas experimentais revelaram aumento em u^+ na região do centro turbulento, com compensação de diminuição na região da subcamada elástica, para uma mesma vazão de transporte aproximadamente igual.

Conclui-se que para a vazão aproximada de 875 l/min (Figura 5.3.1.2.3), a solução de 400 ppm degrada-se (por horas de repouso) apresentando maior perda de carga, diminuindo a subcamada elástica (e a velocidade nesta subcamada) e aumentando a velocidade no centro turbulento.

5.3.2 – Ensaios de soluções de polímero com areia BC

Apresentam-se resultados e conclusões referentes ao escoamento de soluções de polímero com areia BC.

5.3.2.1– Perda de Carga de fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC

As Figuras numeradas de 5.3.2.1.1 até 5.3.2.1.15 apresentam as medições experimentais de perda de carga unitária em função da velocidade média do fluxo. Os valores percentuais indicados próximos aos pontos experimentais, são os valores reais de concentração média no fluxo.

A seguir discrimina-se a concentração de NALCO 4045 e areia BC para cada Figura:

Figura 5.3.2.1.1: solução fresca de 100 ppm e cerca de 5% de areia BC.

Figura 5.3.2.1.2: solução fresca de 200 ppm e cerca de 5% de areia BC.

Figura 5.3.2.1.3: solução fresca de 400 ppm e cerca de 5% de areia BC.

Figura 5.3.2.1.4: solução fresca de 100 ppm e cerca de 10% de areia BC.

Figura 5.3.2.1.5: solução fresca de 200 ppm e cerca de 10% de areia BC.

Figura 5.3.2.1.6: solução fresca de 400 ppm e cerca de 10% de areia BC.

Figura 5.3.2.1.7: solução fresca de 600 ppm e cerca de 10% de areia BC.

Figura 5.3.2.1.8: solução fresca de 800 ppm e cerca de 10% de areia BC.

Figura 5.3.2.1.9: solução fresca de 1200 ppm e cerca de 10% de areia BC.

Figura 5.3.2.1.10: solução fresca de 100 ppm e cerca de 15% de areia BC.

Figura 5.3.2.1.11: solução fresca de 200 ppm e cerca de 15% de areia BC.

Figura 5.3.2.1.12: solução fresca de 400 ppm e cerca de 15% de areia BC.

Figura 5.3.2.1.13: solução fresca de 800 ppm e cerca de 15% de areia BC.

Figura 5.3.2.1.14: solução fresca de 1200 ppm e cerca de 15% de areia BC.

Figura 5.3.2.1.15: solução degradada 30 minutos em bombeamento de 1200 ppm e cerca de 15% de areia BC.

Nestas Figuras de 5.3.2.1.1 até 5.3.2.1.15, observou-se que a presença do polímero diminui a variação da concentração em um dado teste, em comparação aos testes realizados apenas com água e areia. E existe geralmente uma tendência de aumento da concentração média do fluxo em valores próximos à velocidade crítica de sedimentação. Do ponto de vista prático, este fato é muito interessante, já que os sistemas de recalque devem funcionar com velocidade média próxima desta velocidade.

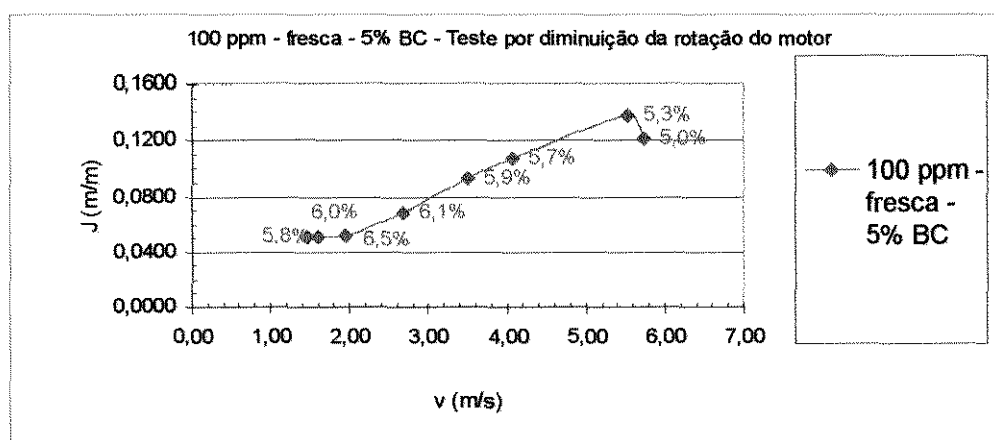


Figura 5.3.2.1.1 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 100 ppm com cerca de 5% de areia BC.

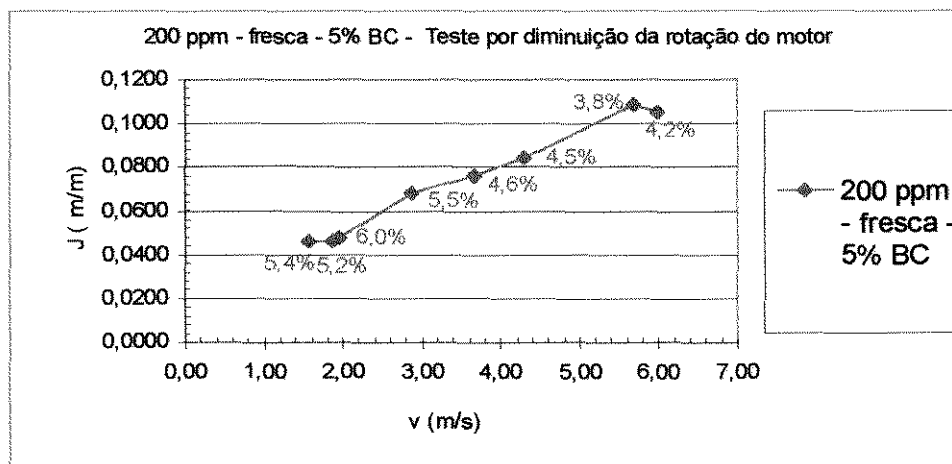


Figura 5.3.2.1.2 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 200 ppm com cerca de 5% de areia BC.

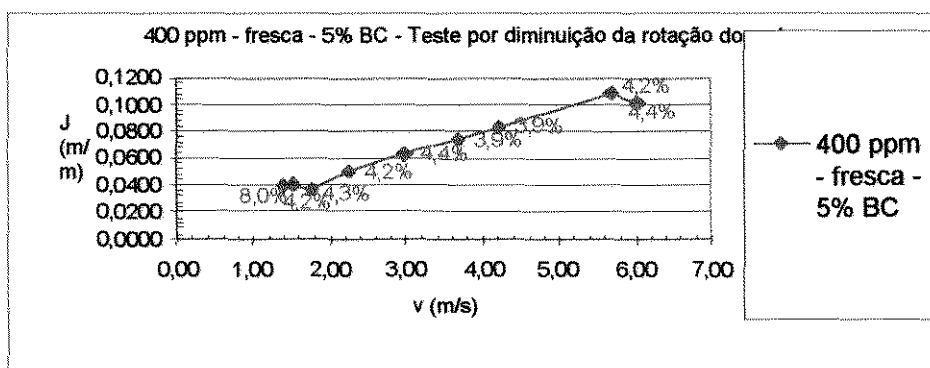


Figura 5.3.2.1.3 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 400 ppm com cerca de 5% de areia BC.

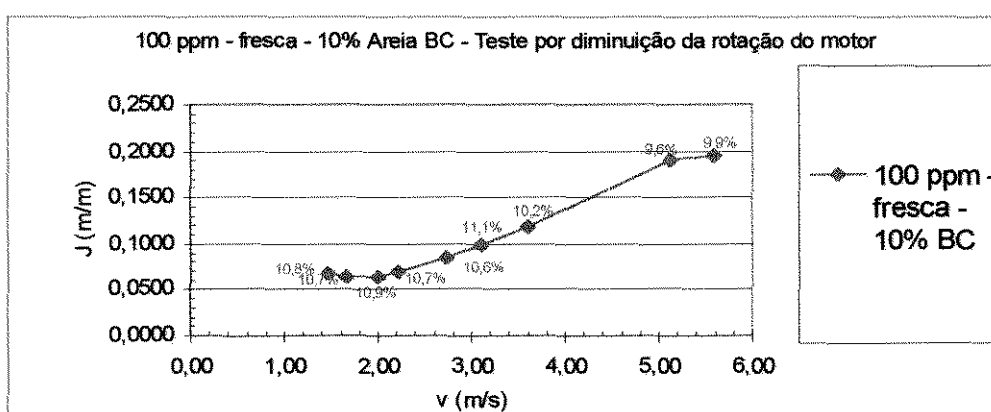


Figura 5.3.2.1.4 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 100 ppm com cerca de 10% de areia BC.

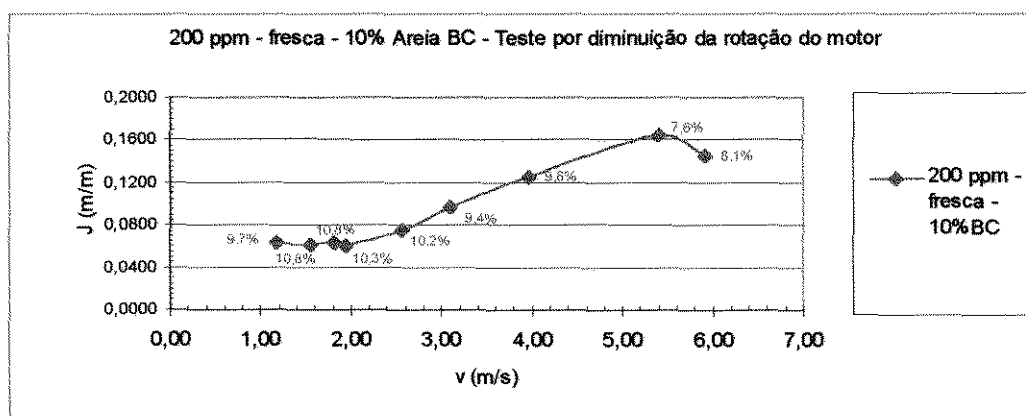


Figura 5.3.2.1.5 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 200 ppm com cerca de 10% de areia BC.

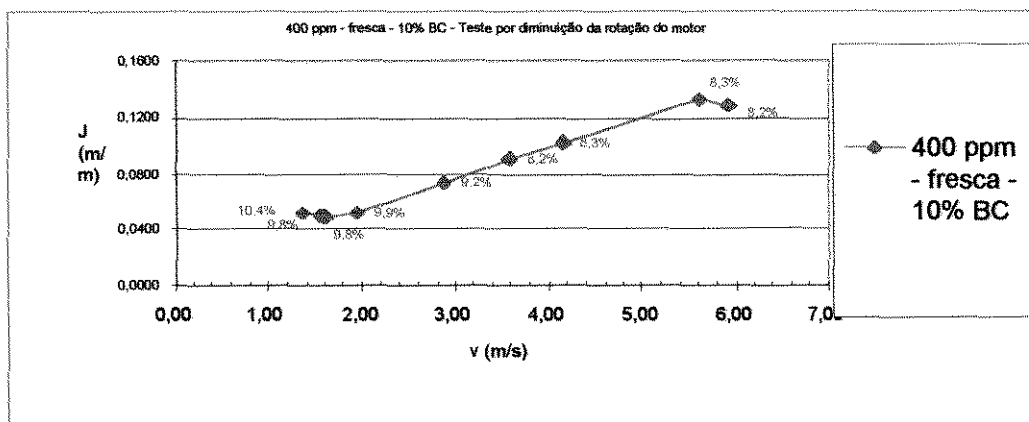


Figura 5.3.2.1.6 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 400 ppm com cerca de 10% de areia BC.

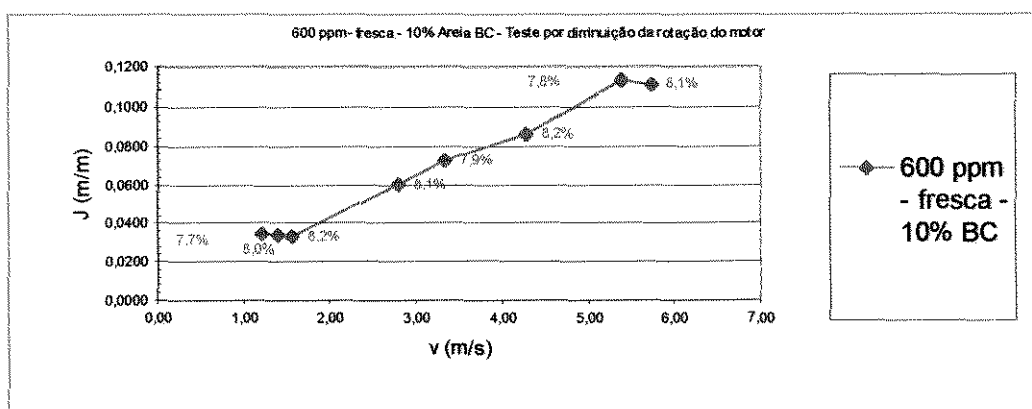


Figura 5.3.2.1.7 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 600 ppm com cerca de 10% de areia BC.

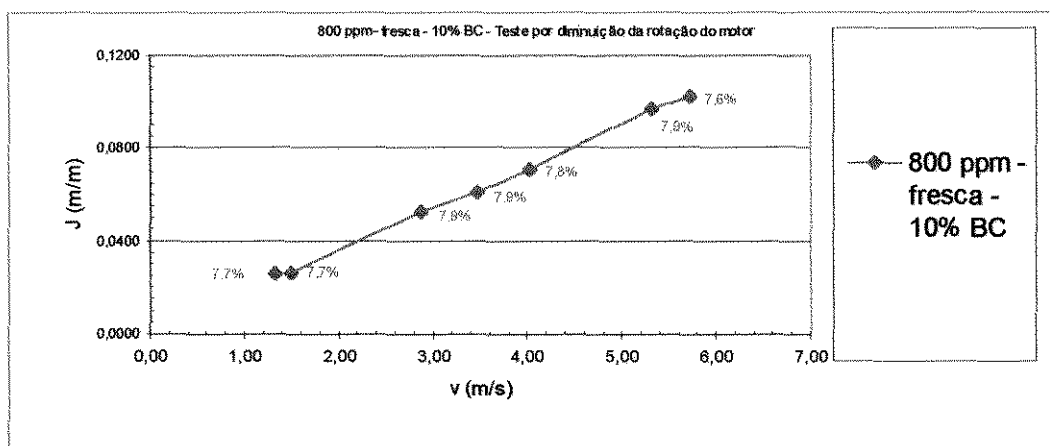


Figura 5.3.2.1.8 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 800 ppm com cerca de 10% de areia BC.

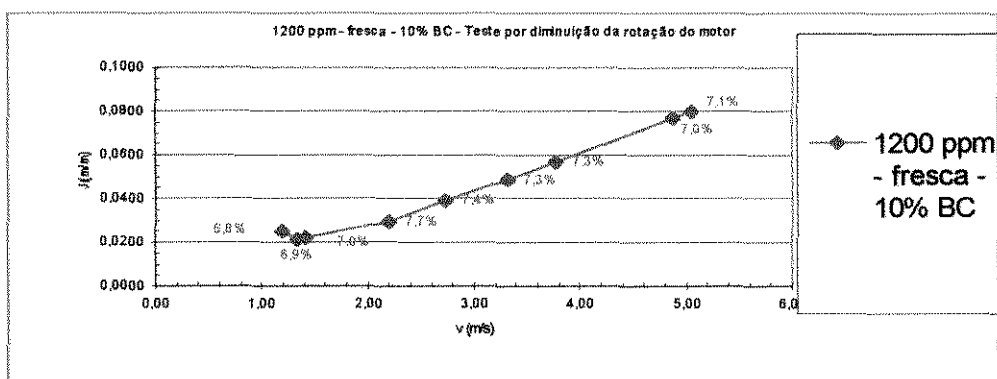


Figura 5.3.2.1.9 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 1200 ppm com cerca de 10% de areia BC.

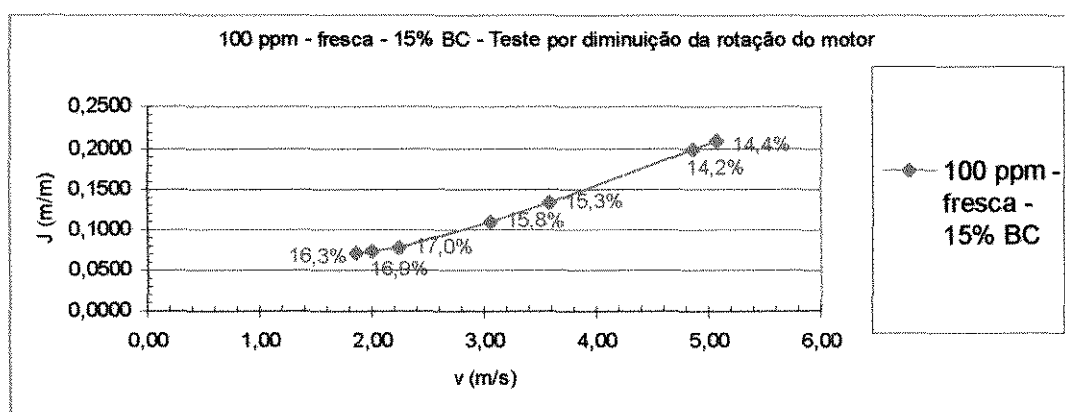


Figura 5.3.2.1.10 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 100 ppm com cerca de 15% de areia BC.

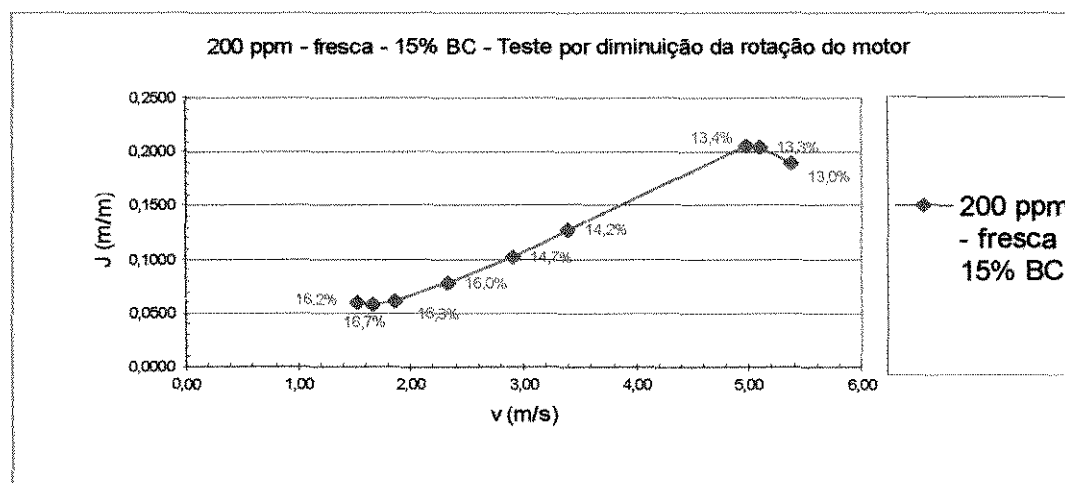


Figura 5.3.2.1.11 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 200 ppm com cerca de 15% de areia BC.

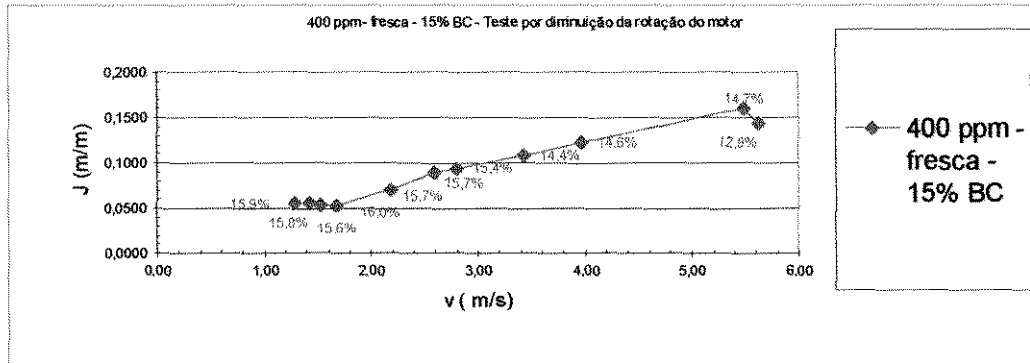


Figura 5.3.2.1.12 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 400 ppm com cerca de 15% de areia BC.

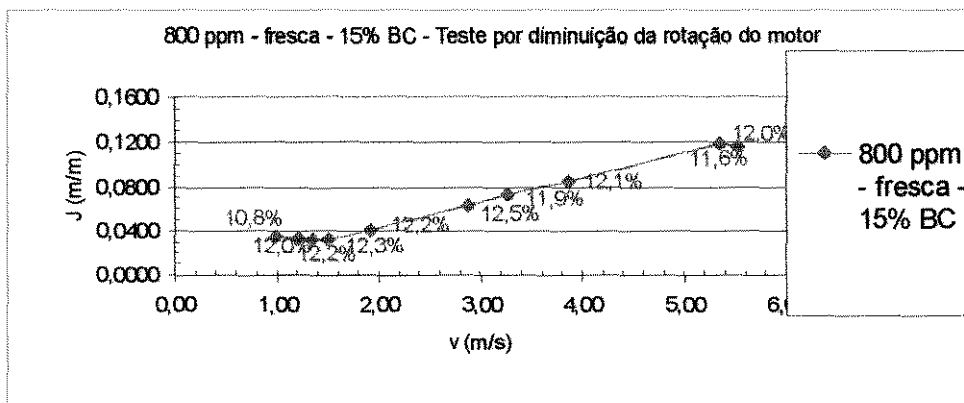


Figura 5.3.2.1.13 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 800 ppm com cerca de 15% de areia BC.

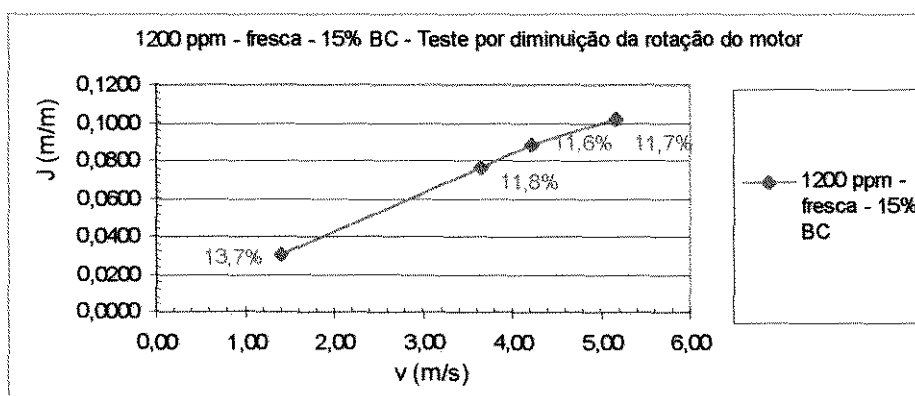


Figura 5.3.2.1.14 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução fresca à 1200 ppm com cerca de 15% de areia BC.

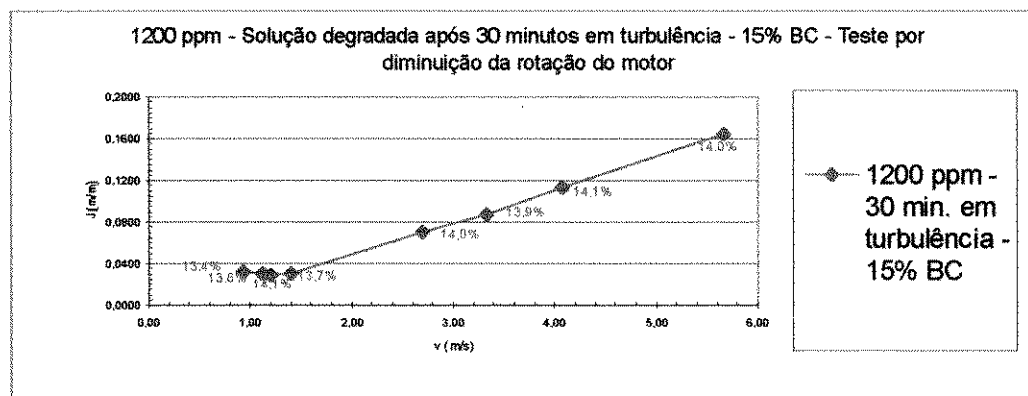


Figura 5.3.2.1.15 – $J = f(v)$ em teste de diminuição da rotação do motor para solução degradada após 30 minutos em turbulência à 1200 ppm com cerca de 15% de areia BC.

Estas Figuras 5.3.2.1.1 até 5.3.2.1.15 apresentam um valor mínimo de perda de carga, valor este próximo à velocidade crítica de sedimentação (v_{cs}).

Para cada solução de 100, 200 e 400 ppm com 5% de areia BC, obteve-se experimentalmente um valor de velocidade crítica de sedimentação. A estes três pontos de velocidade crítica de sedimentação, ajustou-se uma reta pelo processo dos mínimos quadrados. A Figura 5.3.2.1.16 apresenta este ajuste e o coeficiente de correlação.

Na Figura 5.3.2.1.17 apresenta-se o gráfico $J = f(v)$ para 100, 200 e 400 ppm com cerca de 5% de areia BC e a reta de ajuste linear à velocidade crítica de sedimentação da Figura 5.3.2.1.16.

Para cada solução de 100, 200, 400, 600, 800 e 1200 ppm com 10% de areia BC, obteve-se experimentalmente um valor de velocidade crítica de sedimentação. A estes seis pontos de velocidade crítica ajustou-se uma reta pelo processo dos mínimos quadrados. A Figura 5.3.2.1.18 apresenta este ajuste e o coeficiente de correlação.

Na Figura 5.3.2.1.19 apresenta-se o gráfico $J = f(v)$ para 100, 200, 400, 600, 800 e 1200 ppm com cerca de 10% de areia BC e a reta de ajuste linear à velocidade crítica de sedimentação da Figura 5.3.2.1.18.

Para cada solução de 100, 200, 400, 800 e 1200 ppm com 15% de areia BC, obteve-se experimentalmente um valor de velocidade crítica de sedimentação. A estes cinco pontos

de velocidade crítica ajustou-se uma reta pelo processo dos mínimos quadrados. A Figura 5.3.2.1.20 apresenta este ajuste e o coeficiente de correlação.

Na Figura 5.3.2.1.21 apresenta-se o gráfico $J = f(v)$ para 100, 200, 400, 800 e 1200 ppm com cerca de 15% de areia BC e a reta de ajuste linear à velocidade crítica de sedimentação da Figura 5.3.2.1.20.

Nas Figuras 5.3.2.1.17, 5.3.2.1.19 e 5.3.2.1.21, observa-se que quanto maior a concentração do polímero, menor é a perda de carga apresentada.

As perdas de carga em altas velocidades, apesar de presença de areia, são sempre menores que à da água, com exceção apenas de 100 e 200 ppm com cerca de 15% de areia BC. E em baixas velocidades, a perda de carga é sempre maior que à da água.

Procedeu-se também a um ajuste linear aos pontos de velocidade crítica de sedimentação para cerca de 5%, 10% e 15% de areia BC em solução a 100 ppm. Este encontra-se na Figura 5.3.2.1.22.

Na Figura 5.3.2.1.23, apresenta-se o ajuste linear para cerca de 5%, 10% e 15% de areia BC em 200 ppm. O coeficiente de correlação neste caso resultou muito pequeno, significando que a função linear não é adequada à situação. Ocorre porém que em gráficos de $J = f(v)$, para diversas concentrações de areia, existe geralmente um valor máximo de velocidade crítica de sedimentação, correspondente a cerca de 10% de areia, de acordo com Sinclair (1962), e conforme verificado para a areia BC nos itens 5.4 e 5.5.1 deste trabalho.

Assim, existindo este ponto de V_{cs} máximo, não há possibilidade de ajuste de função à $J = f(V_{cs})$, desde que existem dois valores de J para duas concentrações diferentes e um mesmo valor de V_{cs} . Assim, deve-se entender que a representação por função de $J = f(V_{cs})$, é com certeza uma aproximação muito grosseira, devendo-se então recorrer-se à função mais realista de $V_{cs} = f(C_v)$. A função de $J = f(V_{cs})$, para misturas sólido líquido, com areia, pelo fato de apresentar dois (ou mais) valores J para um mesmo valor de V_{cs} (em diferentes concentrações), não existe e portanto quando há interesse em sua representação pode-se representá-la manualmente indicando as concentrações ou através da função inversa, $V_{cs} = f(J)$.

Na Figura 5.3.2.1.24, apresenta-se o ajuste linear para cerca de 5% e 15% de areia BC em 400 ppm. Neste ajuste não se utilizou a v_{cs} para 10% de areia pois como se pode observar na Figura 5.3.2.1.28, este ponto desviou-se consideravelmente. Devido a esta

ocorrência podemos concluir que para cerca de 10% de areia em solução de 400 ppm, a velocidade crítica de sedimentação parece atingir um valor máximo. Conclusão idêntica foi obtida por Sinclair (1962), para escoamento de água e areia, ou seja, o valor máximo de V_{cs} ocorre para concentração de cerca de 10%. Como haviam apenas dois pontos experimentais, isto é, 5% e 15% de areia, optou-se pelo ajuste linear, onde por motivos óbvios resultou em $R^2 = 1$. Porém deve-se lembrar na utilização deste gráfico que aqui, este ajuste, apenas representa uma forma de representação aproximada, conforme o descrito no parágrafo anterior.

Na Figura 5.3.2.1.25, apresenta-se o ajuste linear para cerca de 10% e 15% de areia BC em 1200 ppm. Como haviam apenas dois pontos experimentais, isto é, 10% e 15% de areia, optou-se pelo ajuste linear, onde por motivos óbvios resultou em $R^2 = 1$. Porém deve-se lembrar na utilização deste gráfico que aqui, este ajuste, apenas significa uma forma de representação aproximada (ver considerações dos dois parágrafos anteriores).

As Figuras 5.3.2.1.26, 5.3.2.1.27, 5.3.2.1.28 e 5.3.2.1.29 apresentam $J = f(v)$ para respectivamente 100 ppm, 200 ppm, 400 ppm e 1200 ppm em presença de areia e os ajustes lineares anteriormente descritos.

Nestas Figuras 5.3.2.1.26, 5.3.2.1.27, 5.3.2.1.28 e 5.3.2.1.29 observa-se a grande redução de perda de carga devido à presença de polímero em sólidos, em comparação ao transporte de água limpa, nas altas velocidades de transporte.

Para uma dada concentração de polímero, maiores concentrações de areia causam maiores perdas de carga.

Observou-se que nas Figuras 5.3.2.1.17, 5.3.2.1.19 e 5.3.2.1.21, construídas respectivamente para 5%, 10% e 15% de areia e para variadas concentrações de polímero, as equações de ajuste para $J = f(V_{cs})$, resultaram em relativamente altos coeficientes de correlação (Figuras 5.3.2.1.16, 5.3.2.1.18 e 5.3.2.1.20). Porém, apesar dos dados serem exatamente os mesmos, surgiram as dificuldades anteriormente descritas nas equações de ajuste de $J = f(V_{cs})$, para as Figuras 5.3.2.1.26, 5.3.2.1.27, 5.3.2.1.28 e 5.3.2.1.29 de $J = f(v)$ para respectivamente 100 ppm, 200 ppm, 400 ppm e 1200 ppm com variadas concentrações de areia.

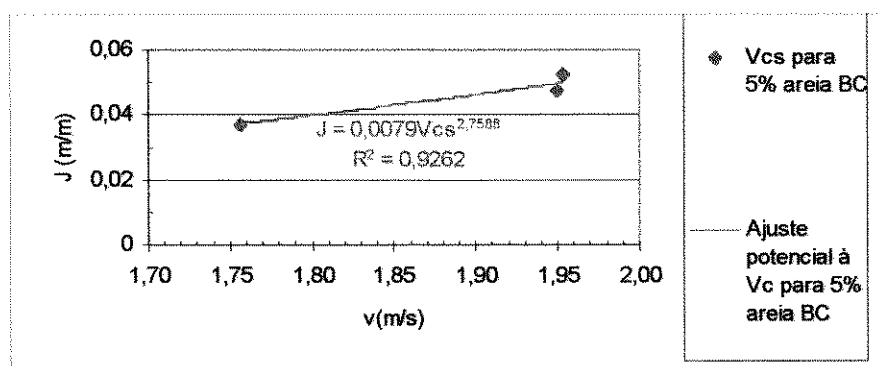


Figura 5.3.2.1.16 – $J = f(v)$ para a condição crítica de sedimentação para soluções de polímero em cerca de 5% de areia BC

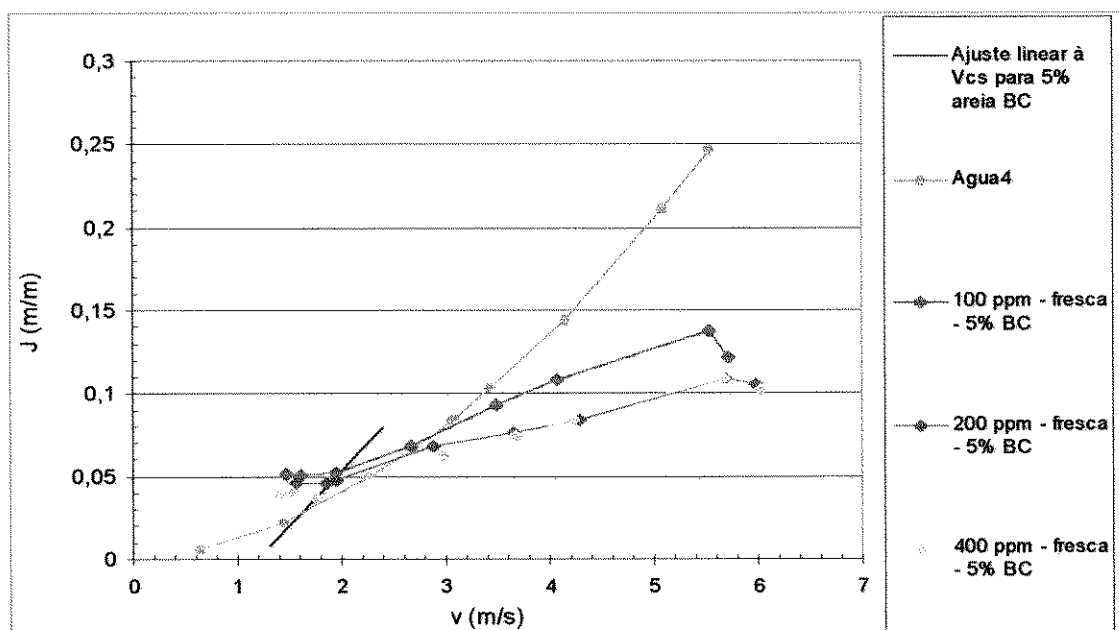


Figura 5.3.2.1.17 – $J = f(v)$ para cerca de 5% de areia BC em 100, 200 e 400 ppm de polímero.

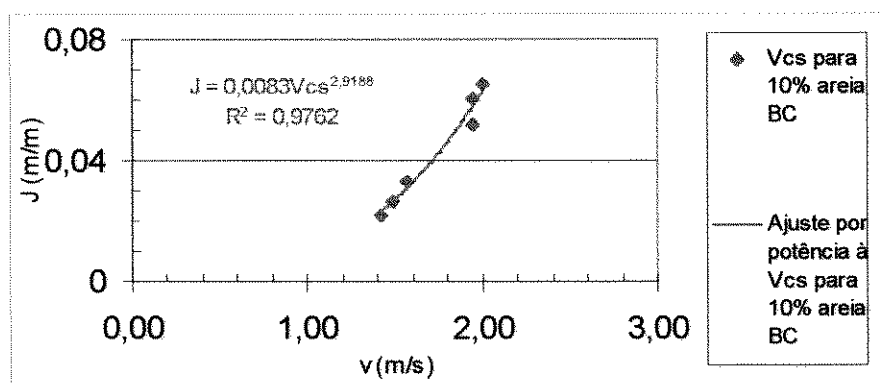


Figura 5.3.2.1.18 – $J = f(v)$ para a condição crítica de sedimentação para soluções de polímero em cerca de 10% de areia BC

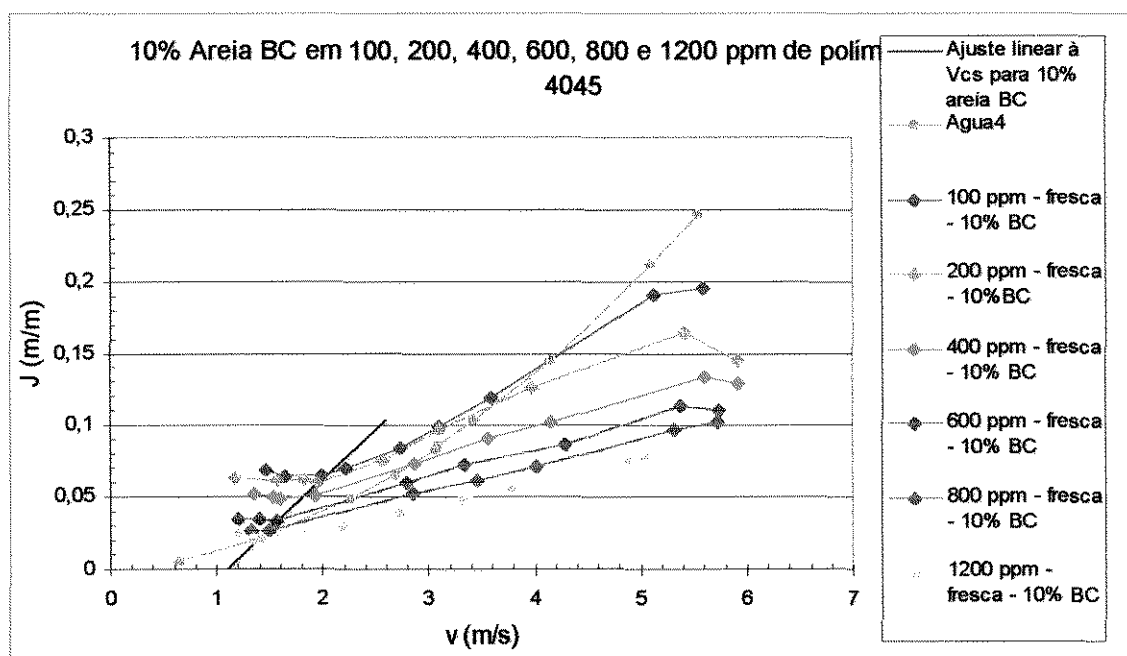


Figura 5.3.2.1.19 – $J = f(v)$ para cerca de 10% de areia BC em 100, 200, 400, 600, 800 e 1200 ppm de polímero.

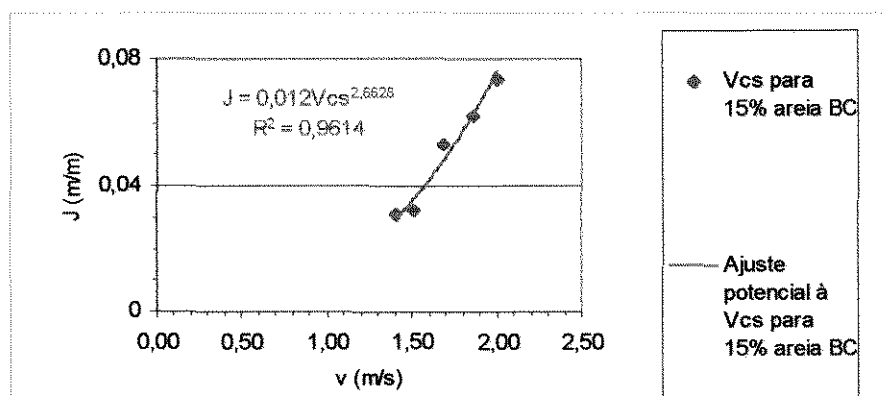


Figura 5.3.2.1.20 – $J = f(v)$ para a condição crítica de sedimentação para soluções de polímero em cerca de 15% de areia BC

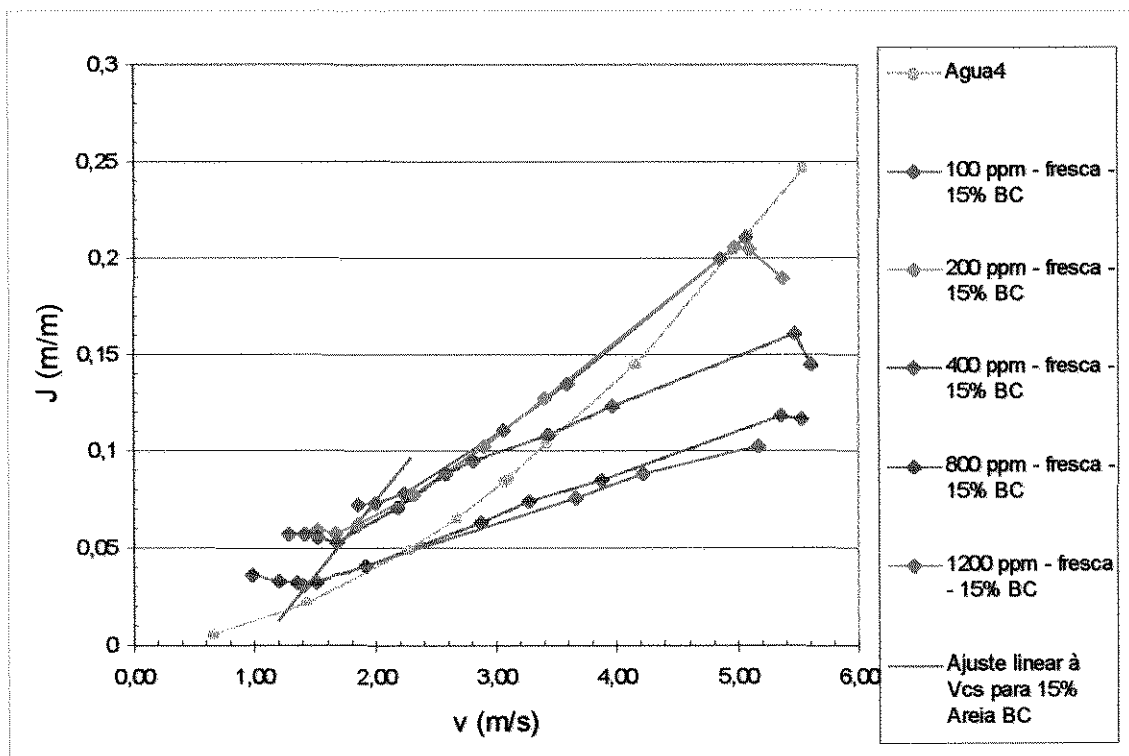


Figura 5.3.2.1.21 – $J = f(v)$ para cerca de 15% de areia BC em 100, 200, 400, 800 e 1200 ppm de polímero.

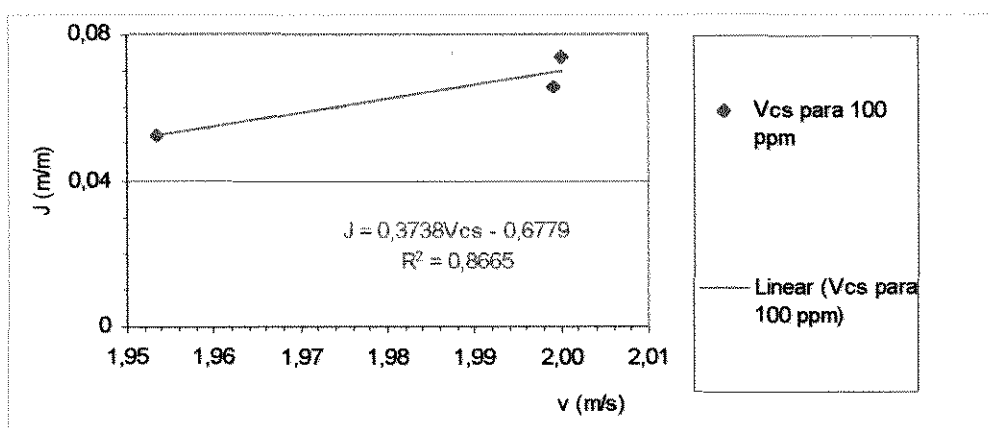


Figura 5.3.2.1.22 – $J = f(v)$ para a condição crítica de sedimentação para soluções de 100 ppm polímero em três concentrações de areia BC

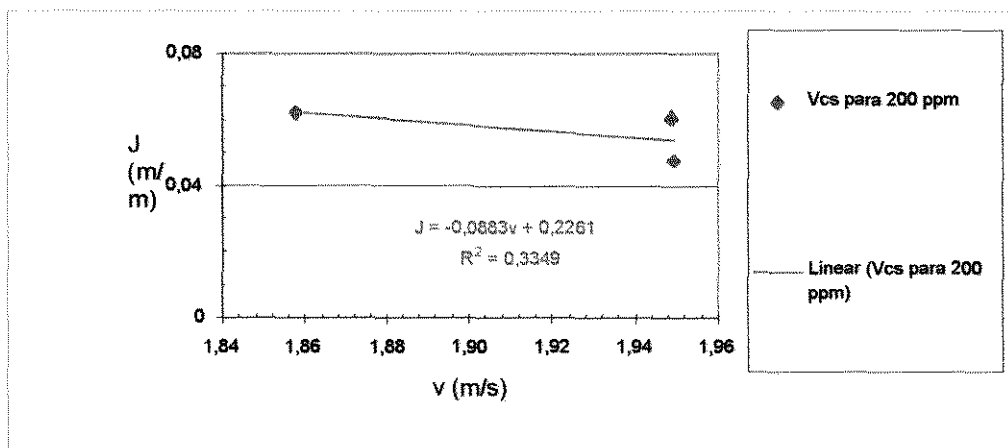


Figura 5.3.2.1.23 $-J = f(v)$ para a condição crítica de sedimentação para soluções de 200 ppm polímero em três concentrações de areia BC

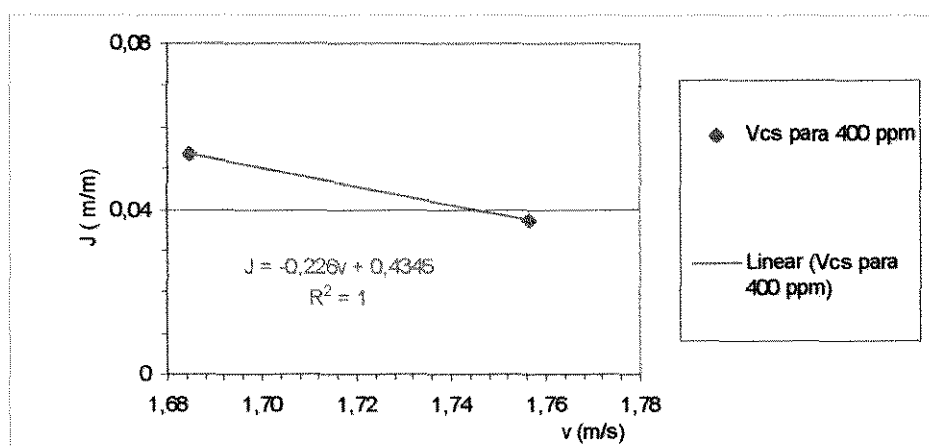


Figura 5.3.2.1.24 $-J = f(v)$ para a condição crítica de sedimentação para soluções de 400 ppm polímero em duas concentrações de areia BC

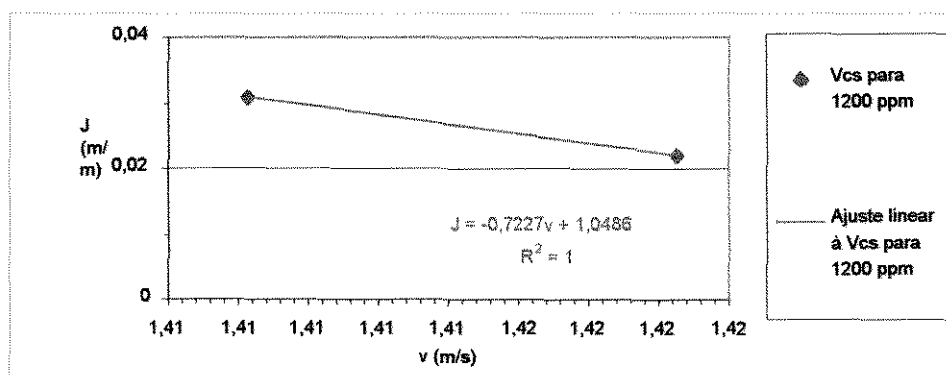


Figura 5.3.2.1.25 $-J = f(v)$ para a condição crítica de sedimentação para soluções de 1200 ppm polímero em duas concentrações de areia BC

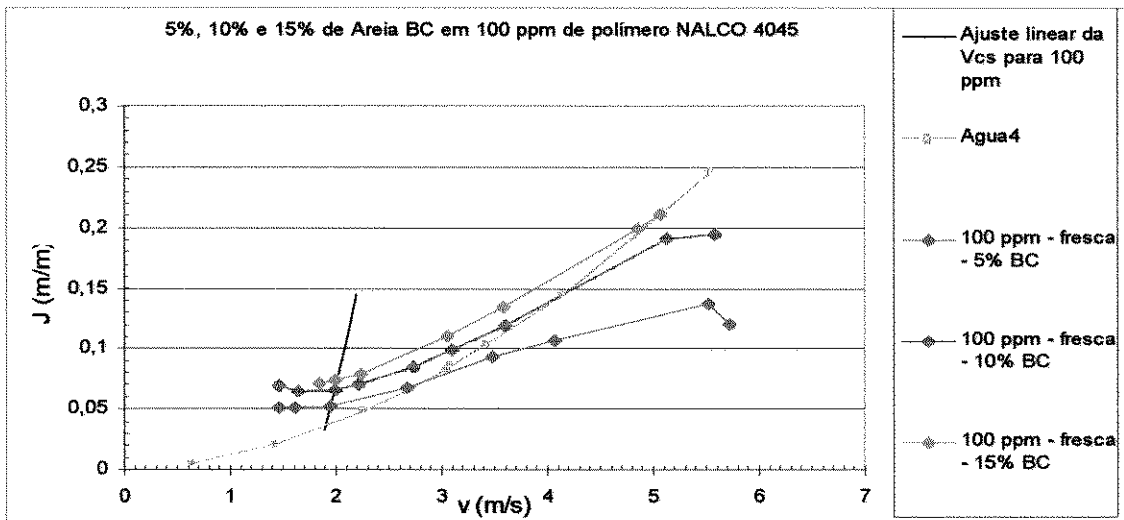


Figura 5.3.2.1.26 – $J = f(v)$ para cerca de 5%, 10%, e 15% de areia BC em 100 ppm de polímero.

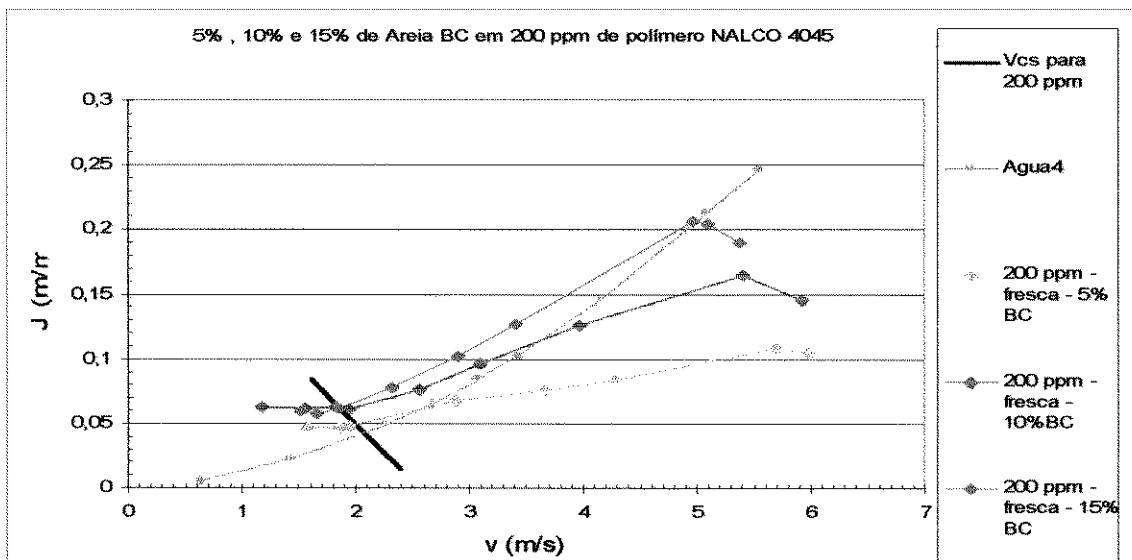


Figura 5.3.2.1.27 – $J = f(v)$ para cerca de 5%, 10%, e 15% de areia BC em 200 ppm de polímero.

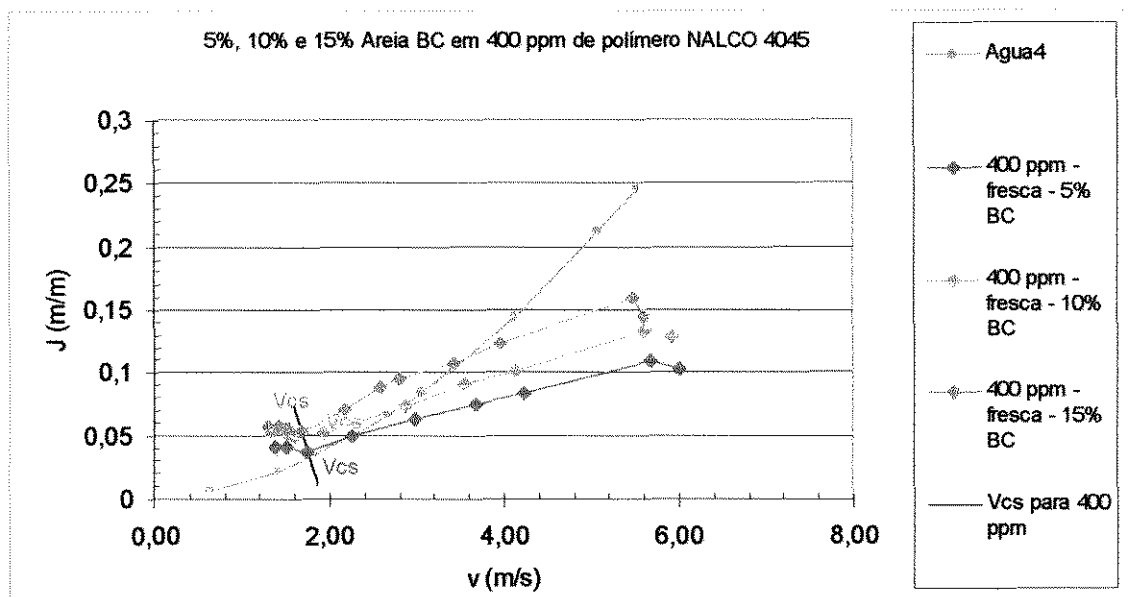


Figura 5.3.2.1.28 – $J = f(v)$ para cerca de 5%, 10%, e 15% de areia BC em 400 ppm de polímero.

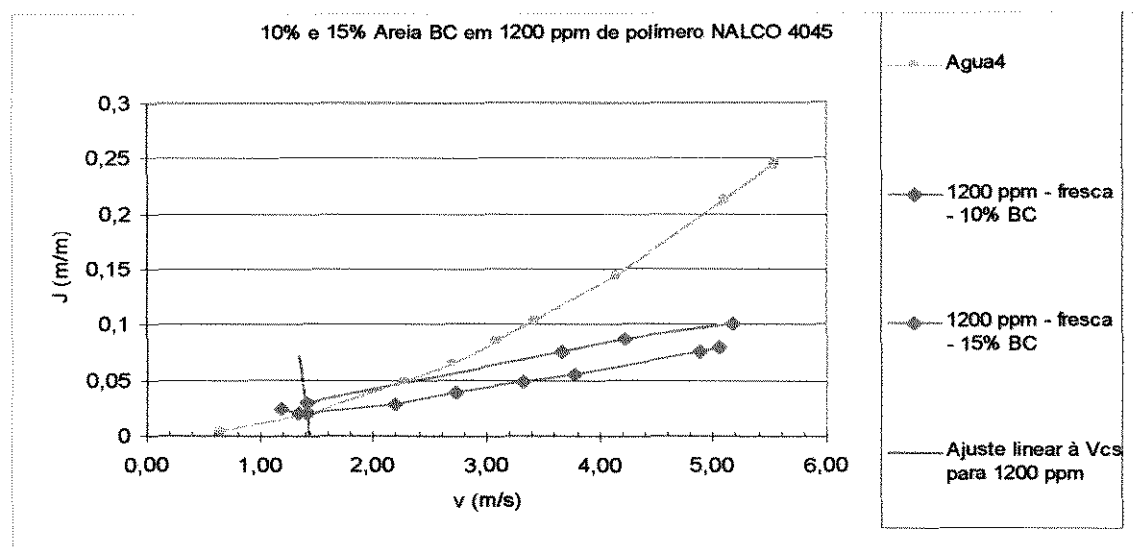


Figura 5.3.2.1.29 – $J = f(v)$ para cerca de 10%, e 15% de areia BC em 1200 ppm de polímero.

Algumas misturas de solução fresca de polímero com areia, após medições por bateladas, foram deixadas em repouso no tanque principal por algumas horas. Outra ou

outras medições por batelada foram então realizadas. A degradação em estudo, visa a medição da redução de perda de carga em função do envelhecimento da solução.

Segundo Sellin et al (1982), polímeros catiônicos são mais adequados para floculações em tratamentos de esgoto, enquanto os aniônicos são melhores para redução de arraste em transportes, sendo que os aniônicos custam aproximadamente a metade dos catiônicos.

O polímero utilizado foi do tipo aniônico, solúvel em água. Avalia-se no transporte de areia e solução de polímero, alguns parâmetros hidráulicos como perda de carga, distribuição de velocidade e distribuição de concentração. Estes parâmetros também são avaliados em decorrência da degradação mecânica da solução por bombeamento durante a fase de medições e também a degradação da solução por permanência em repouso no tanque principal.

As Figuras 5.3.2.1.30, 5.3.2.1.31, 5.3.2.1.32 e 5.3.2.1.33 apresentam os resultados dos testes experimentais de misturas de solução de polímero e areia, após horas em repouso.

Figura 5.3.2.1.30: 200 ppm com cerca de 5% areia BC, após 16 horas em repouso.

Figura 5.3.2.1.31: 400 ppm com cerca de 5% areia BC, após 69,5 horas em repouso.

Figura 5.3.2.1.32: 400 ppm com cerca de 10% areia BC, após 22 horas em repouso.

Figura 5.3.2.1.33: 400 ppm com cerca de 15% areia BC, após 65,5 horas em repouso.

Observa-se nestas Figuras que a degradação do polímero é muito mais rápida em presença de areia.

Na Figura 5.3.1.1.2 observou-se que a degradação da solução 400 ppm de polímero sem areia após 206,5 horas em repouso com 2 horas em bombeamento e sete medições por batelada, ainda não foi total, isto é não atingiu os mesmos valores que os do solvente. Até 10% de areia BC e no tempo de repouso de 22 horas, Figura 5.3.2.1.32, em altas vazões, o polímero ainda apresenta redução de perda de carga, em relação à água limpa. Para 15% de areia em 400 ppm e 65,5 horas em repouso, Figura 5.3.2.1.33, observa-se que a perda de carga é maior que da água.

Para 1200 ppm e cerca de 15% de areia BC, foram realizadas experimentações de degradação.

Observou-se que quanto maior a concentração de polímero no fluxo, era necessário adicionar cerca de 10 litros de areia ao tanque principal para obtenção da concentração esperada na tubulação de ensaio, ou seja, para obter a partir de 5% em 200 ppm, para 5% em 400 ppm de areia no fluxo era suficiente a adição de cerca de 10 litros de areia ao tanque principal. Enquanto que a areia presente no tanque era do ensaio anterior, 400 ppm com 15% de areia. De acordo com procedimentos anteriores, para obtenção de 15% em 1200 ppm, adicionou-se areia até o volume aproximado de 70 litros e não foi atingida ainda a concentração de 15%, o que pode ser verificado nas Figuras 5.3.2.1.12 e 5.3.2.1.15. Esta colocação de areia foi realizada durante os primeiros 30 minutos de medições por bateladas.

Concluiu-se que o aumento de viscosidade da solução fresca devido ao aumento da concentração do polímero, provoca uma maior dificuldade de suspensão das partículas presentes no tanque, ou seja, o aumento da viscosidade do fluido provoca menor homogeneização da mistura dentro do tanque principal.

Nas Figuras 5.3.2.1.34, 5.3.2.1.35 e 5.3.2.1.36 apresenta-se a variação da concentração média de areia na tubulação e a função $J = f(v)$ em função da idade da solução. Na Figura 5.3.2.1.37 apresenta-se a composição das Figuras 5.3.2.1.34, 5.3.2.1.35 e 5.3.2.1.36, sem a indicação da concentração de areia. Observa-se o aumento da perda de carga em função da idade da solução. A solução de 1200 ppm com cerca de 15% de areia, degradada após 82,5 horas em repouso, atingiu os mesmos valores de perda de carga que a mistura de água e areia.

Na Figura 5.3.2.1.37, verifica-se que só após 42 horas em repouso, em velocidade de 5,4 m/s, o transporte de cerca de 15% de areia BC em 1200 ppm, atingiu o valor de perda de carga igual à da água limpa.

Da análise das Figuras 5.3.2.1.30 até 5.3.2.1.35, observa-se que a solução degradada transporta em suspensão mais facilmente, maior quantidade de partículas sólidas do que a solução fresca, uma vez que para uma mesma vazão do fluxo, a solução degradada transporta sempre maior concentração de areia do que a solução fresca. Esta conclusão é válida para todas as concentrações de polímero em ensaio, de 200 ppm, 400 ppm e 1200 ppm e de 5%, 10% e 15% de areia BC. Assim embora ocorra maior perda de carga por degradação, ocorre uma compensação em aumento na capacidade de transporte de sólidos.

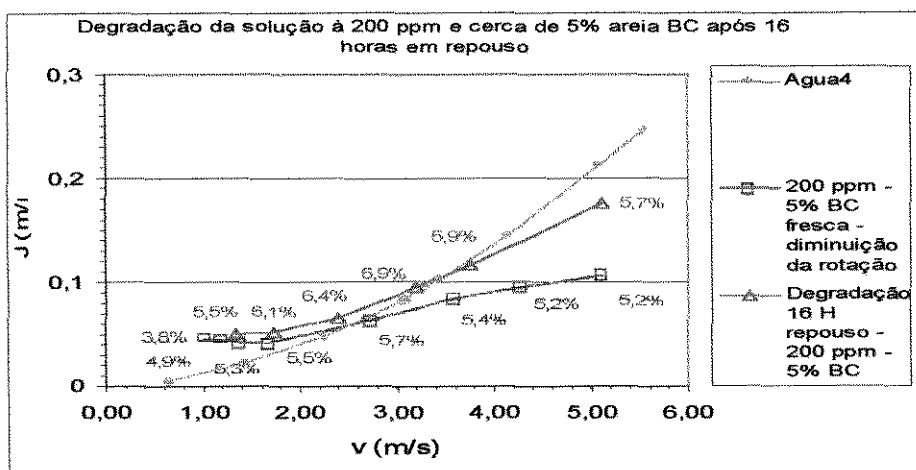


Figura 5.3.2.1.30 – $J = f(v)$ na degradação de 200 ppm com cerca de 5% de areia BC, após 16 horas em repouso.

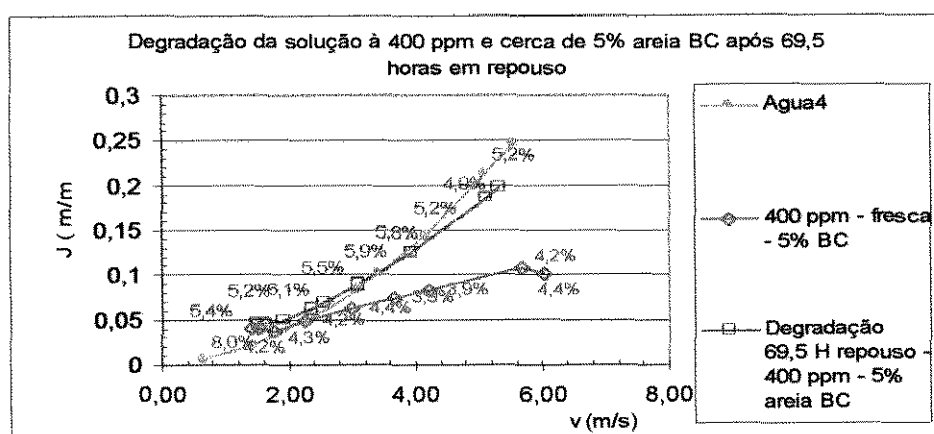


Figura 5.3.2.1.31 – $J = f(v)$ na degradação de 400 ppm com cerca de 5% de areia BC, após 69,5 horas em repouso.

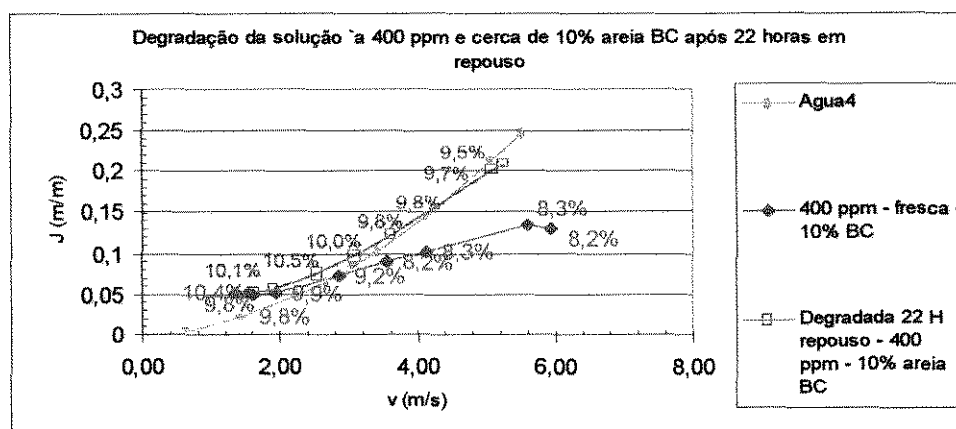


Figura 5.3.2.1.32 – $J = f(v)$ na degradação de 400 ppm com cerca de 10% de areia BC, após 22 horas em repouso.

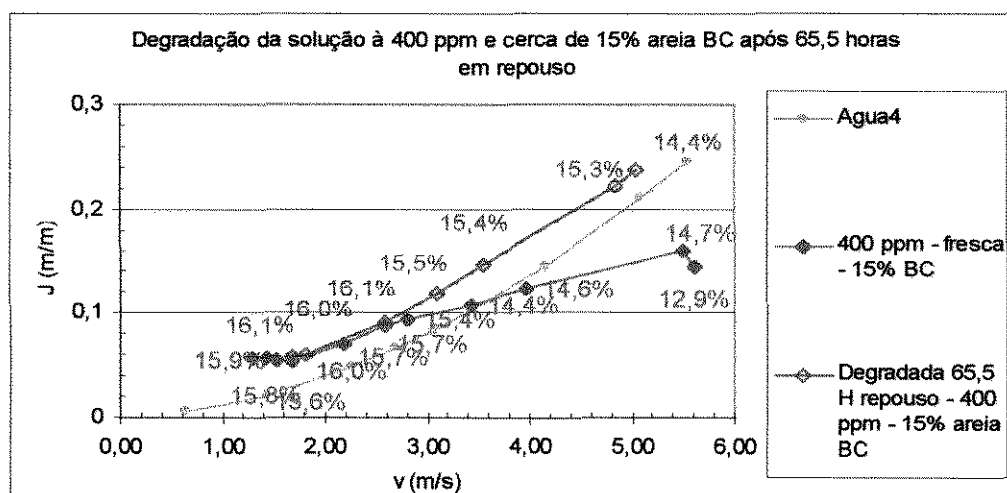


Figura 5.3.2.1.33 – $J = f(v)$ na degradação de 400 ppm com cerca de 15% de areia BC, após 65,5 horas em repouso.

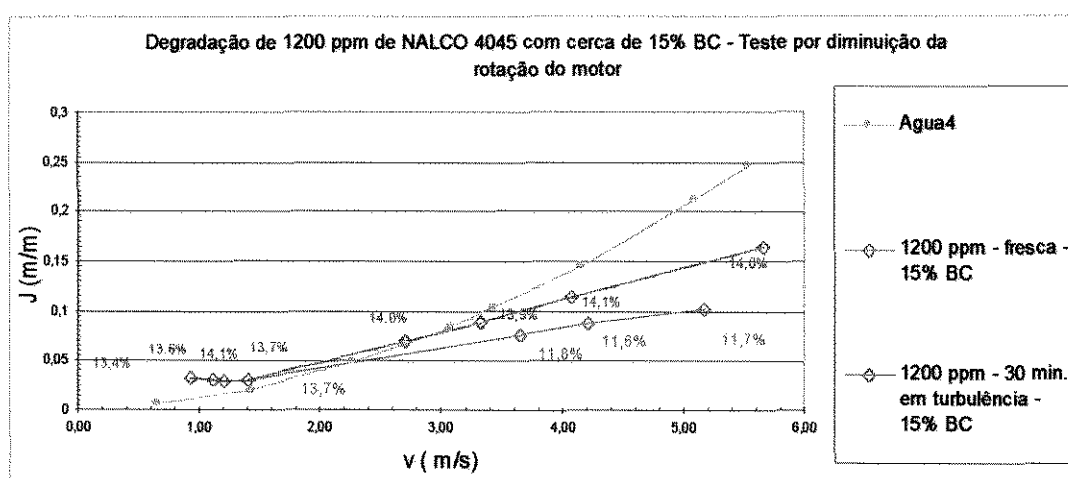


Figura 5.3.2.1.34 – $J = f(v)$ na degradação de 1200 ppm com cerca de 15% de areia BC, após 30 minutos em bombeamento.

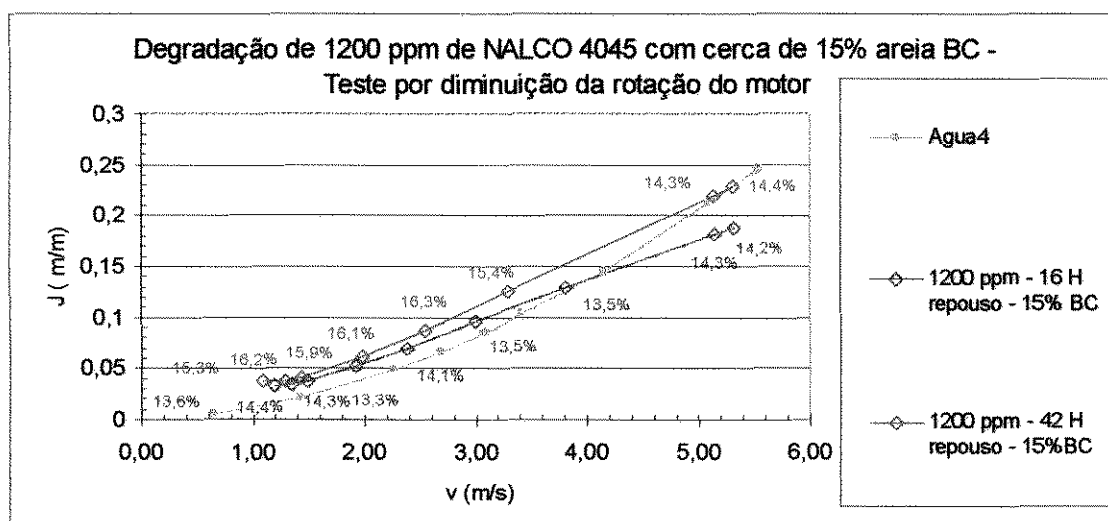


Figura 5.3.2.1.35 – $J = f(v)$ na degradação de 1200 ppm com cerca de 15% de areia BC, após 16 e 42 horas em repouso.

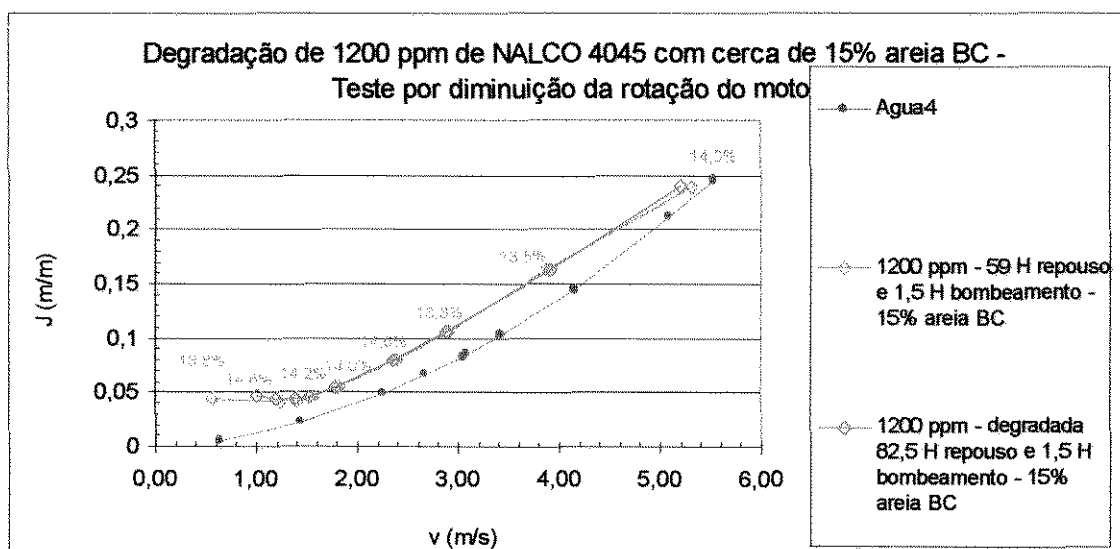


Figura 5.3.2.1.36 – $J = f(v)$ na degradação de 1200 ppm com cerca de 15% de areia BC, após 59 horas em repouso e 1,5 h em bombeamento e após 82,5 h em repouso e 1,5 h em bombeamento.

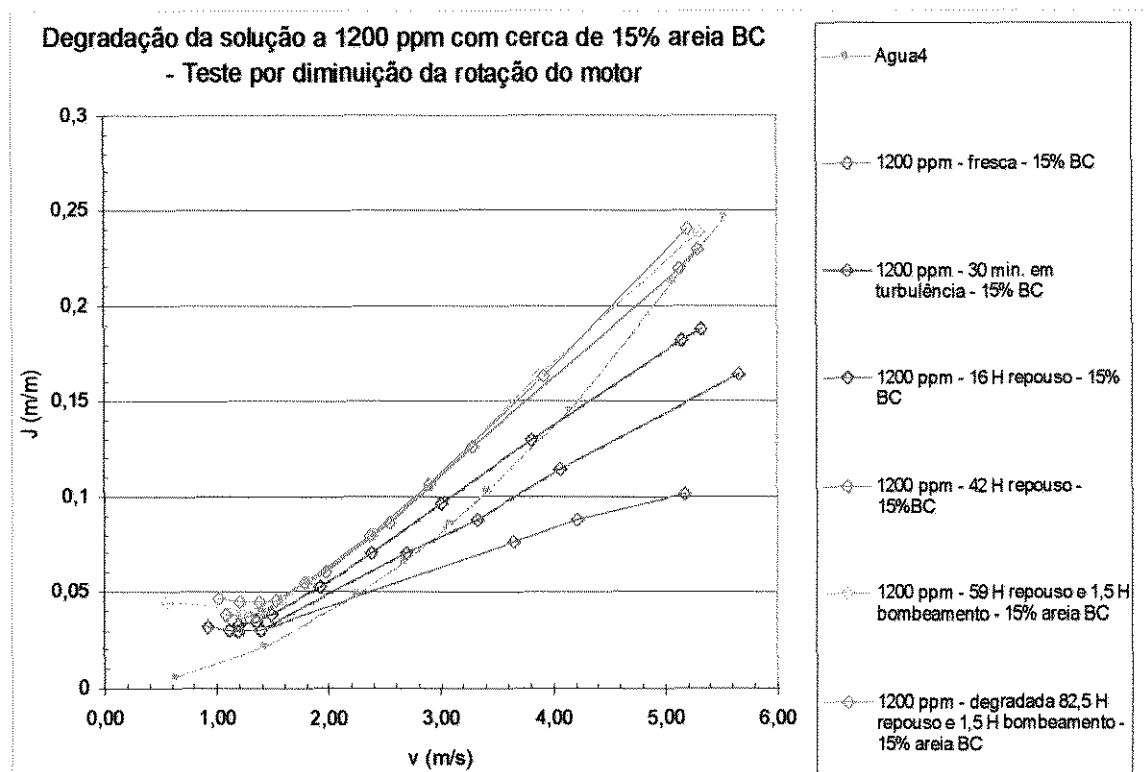


Figura 5.3.2.1.37 – $J = f(v)$ na degradação de uma mesma solução de 1200 ppm de polímero com cerca de 15% de areia BC. Composição das Figuras 5.3.2.1.34, 5.3.2.1.35 e 5.3.2.1.36.

5.3.2 2– Distribuição de velocidade de solução de polímero e areia BC

As medições por bateladas realizadas com tubo de Pitot, foram realizadas cerca de 15 minutos após o início da operação de medição. Esta metodologia foi adotada para assegurar igual tempo de degradação das diversas suspensões utilizadas nos testes de medição.

Na Figura 5.3.2.1.38 apresenta-se uma comparação entre o perfil adimensional de 100 ppm, 200 ppm e 400 ppm com cerca de 5% de areia BC, e em altas vazões. Observa-se que para 400 ppm, a subcamada elástica é maior e diminui para 200 ppm e para 100 ppm. O comprimento de mistura, para as três soluções, em posições superiores à máxima

velocidade pontual, permanece praticamente constante e igual a 0,4. Em posições inferiores à velocidade pontual máxima, embora com valores diferentes para cada concentração de NALCO 4045, também permanece praticamente constante, sendo menores os valores de constante de Von Karman (comprimento de mistura).

Na Figura 5.3.2.1.39 compara-se duas concentrações diferentes de areia, 6,1% e 10,6% em 100 ppm de NALCO 4045 e vazões aproximadamente iguais. O comprimento de mistura em posições superiores do tubo mantém-se constante e em posições inferiores à velocidade máxima pontual presente no tubo, observa-se que para concentração de 6,1% de areia BC o comprimento de mistura permanece praticamente constante, enquanto que para 10,6% de areia BC, observa-se o comportamento semelhante ao de uma subcamada viscosa.

Para concentrações aproximadamente iguais a 10% de areia, compara-se na Figura 5.3.2.1.40, o perfil adimensional de 200 ppm e 400 ppm, na velocidade crítica de sedimentação. A subcamada elástica é maior para 400 ppm do que para 200 ppm. Poucos são os pontos apresentados devido às dificuldades ocasionais de entupimentos no tubo de Pitot.

Para concentrações aproximadamente iguais a 10% de areia, compara-se na Figura 5.3.2.1.41, o perfil adimensional de 100 ppm e 400 ppm, em altas vazões. A subcamada elástica é maior para 400 ppm do que para 100 ppm. Observa-se que para posições inferiores à máxima velocidade adimensional, 400 ppm apresenta comprimento de mistura constante para os pontos medidos, e que 100 ppm apresenta comportamento semelhante ao da subcamada viscosa.

Na Figura 5.3.2.1.42, são apresentados os perfis adimensionais de diferentes concentrações de areia em 400 ppm, em altas vazões, e em regime de escoamento heterogêneo. Nota-se para as posições acima da máxima velocidade adimensional, o constante valor do comprimento de mistura e a diminuição da subcamada elástica para maiores concentrações de areia. Em posições abaixo da máxima velocidade adimensional, nota-se comprimento de mistura praticamente constante para concentração de areia de 4,4% e 9,2% e comportamento semelhante ao da subcamada viscosa para 15,7% e 16,1% de areia BC.

Na Figura 5.3.2.1.43 apresenta-se o perfil adimensional para 200 ppm com 5,5%, 10,3% e 16,0% de areia BC. As medidas referem-se a posições acima do eixo central do tubo. Para as posições acima da máxima velocidade adimensional, observa-se comprimento de mistura constante igual a 0,4 porém verifica-se a presença da subcamada elástica, maior para 5,5% e menor para 10,3% de areia, e a ausência dela para 16,0% de areia.

Na Figura 5.3.2.1.44 apresenta-se o perfil adimensional para 400 ppm em 4,3%, 9,9% e 16,0% de areia BC, na velocidade crítica de sedimentação. Nestas curvas observa-se que a partir da máxima velocidade para a parte inferior do tubo, a diminuição de velocidade ocorre segundo curva semelhante à $u^+ = y^+$, ou seja, segundo uma curva linear do tipo $u^+ = (\text{constante}) \cdot y^+$, de comportamento semelhante ao da subcamada viscosa. Para posições acima da máxima velocidade adimensional, verifica-se comprimento de mistura praticamente constante.

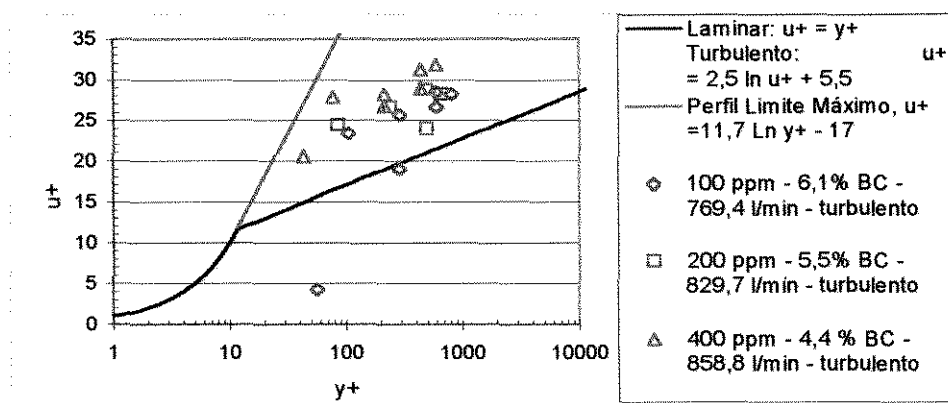


Figura 5.3.2.1.38 – $u^+ = f(y^+)$ para fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC, medidas experimentalmente com tubo de Pitot.

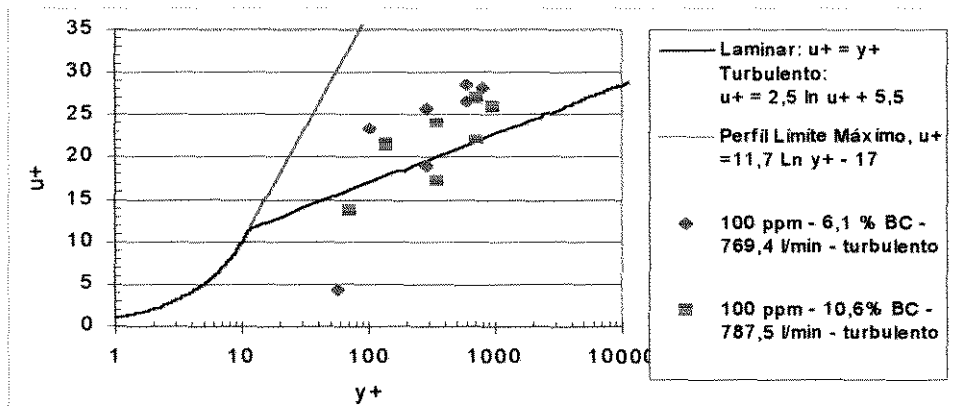


Figura 5.3.2.1.39 – $u^+ = f(y^+)$ para fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC, medidas experimentalmente com tubo de Pitot.

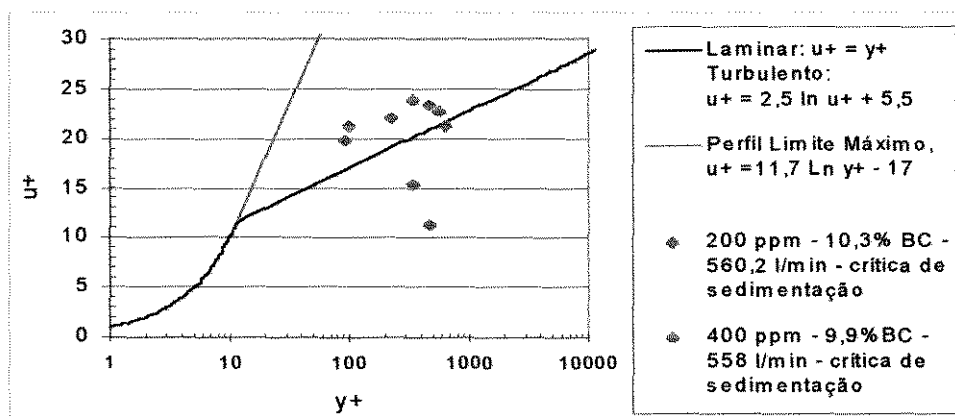


Figura 5.3.2.1.40 – $u^+ = f(y^+)$ para fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC, medidas experimentalmente com tubo de Pitot.

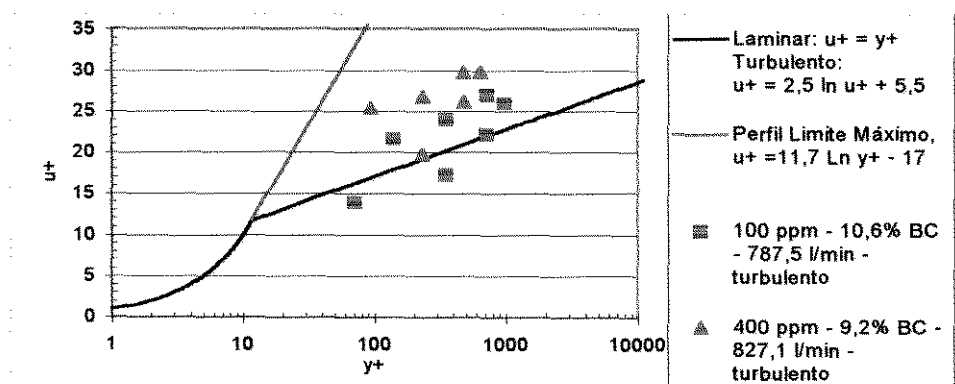


Figura 5.3.2.1.41 – $u^+ = f(y^+)$ para fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC, medidas experimentalmente com tubo de Pitot.

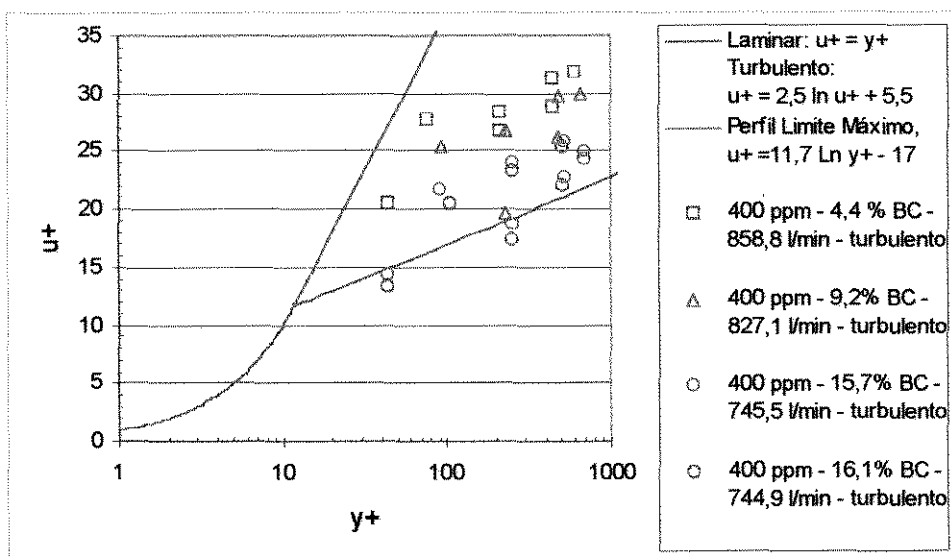


Figura 5.3.2.1.42 – $u^+ = f(y^+)$ para fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC, medidas experimentalmente com tubo de Pitot.

De modo geral pode-se afirmar que os perfis adimensionais de velocidade $u^+ = f(y^+)$, para soluções de polímero com areia BC, nas concentrações ensaiadas de 5% a 15% de areia e de 100 a 1200 ppm de polímero, tem o seguinte comportamento: 1) Para pontos acima da máxima velocidade adimensional, o comprimento de mistura permanece constante e igual a 0,4., 2) Para uma mesma concentração de sólidos, a subcamada elástica é maior em maior concentração de polímero, 3) Em 100 ppm, e posições abaixo da velocidade u^+ máxima, o comprimento de mistura é constante e menor que 0,4 para concentrações de até 6,1% de areia, enquanto para 400 ppm, ocorre para até cerca de 9,2%, 4) Para posições abaixo da velocidade u^+ máxima, o comportamento semelhante ao de uma subcamada viscosa ocorre para 100 ppm, em concentração aproximadamente superior a 10,6% e para 400 ppm em concentrações aproximadamente superiores a 15,7%.

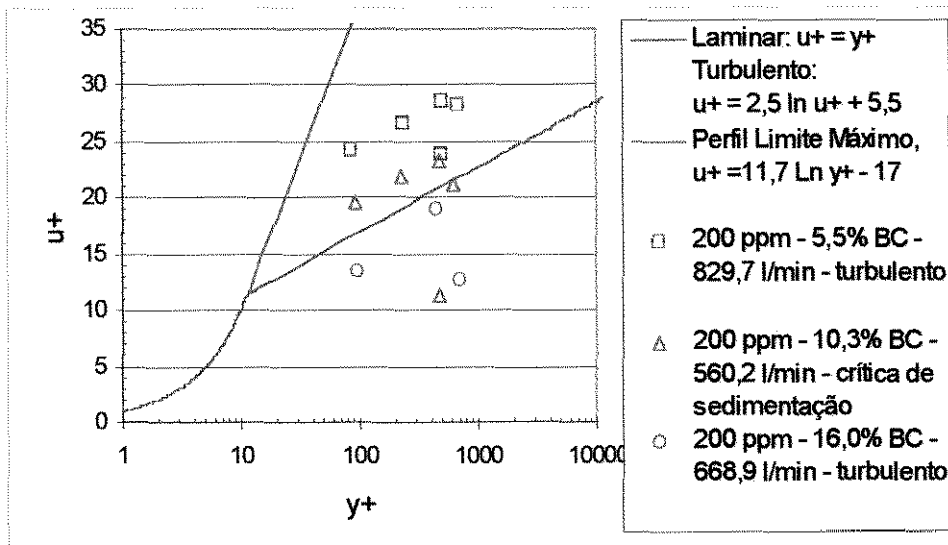


Figura 5.3.2.1.43 – $u^+ = f(y^+)$ para fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC, medidas experimentalmente com tubo de Pitot.

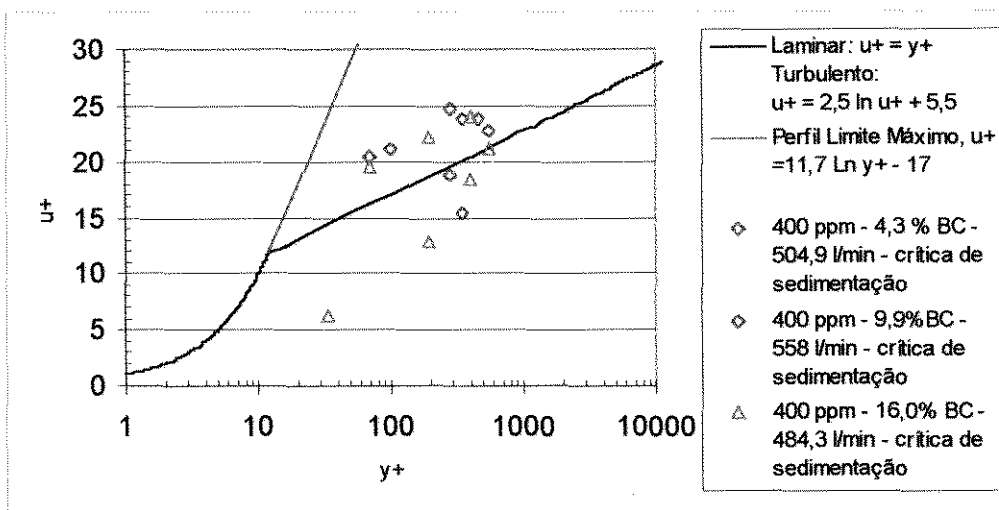


Figura 5.3.2.1.44 – $u^+ = f(y^+)$ para fluxo de solução de NALCO 4045 e areia BC, medidas experimentalmente com tubo de Pitot.

5.4 – Perda de Carga, Velocidade Crítica de Sedimentação e Velocidade Crítica de misturas sólido-líquido

Aborda-se neste item, o efeito que a adição de polímero às misturas de água e areia exerce sobre a perda de carga, sobre a velocidade crítica de sedimentação e sobre a velocidade crítica.

5.4.1 – Ensaio com água limpa

A partir dos valores médios da perda de carga unitária e da velocidade do escoamento de água limpa levantou-se a curva Água 2, apresentada na Figura 5.1.1. Utiliza-se esta curva para a realização de comparação entre as velocidades de escoamento verificadas nos fluxos de água e areia, de soluções água e polímero, e de soluções de água polímero e areia.

Os pontos que relacionam a perda de carga unitária com a velocidade média do ensaio com água, foram ajustados, resultando na equação (5.4.1) e apresenta um coeficiente de correlação muito próximo da unidade.

$$J = 0,0055.V^2 + 0,0088.V - 0,0017 \quad (5.4.1)$$

$$Cc=0,9996$$

Na qual: J (m/m); V (m/s).

5.4.2– Ensaio com mistura de água + areia A.

Os dados obtidos nos ensaios de misturas água e areia A permitiram a elaboração do gráfico da Figura 5.2.2.4, de curvas de isoconcentrações para 2%, 5% e 10% de areia A.

Nesta figura verifica-se, para uma mesma velocidade média, aumentos significativos da perda de carga à medida que se eleva a concentração da mistura, principalmente para o intervalo de velocidades próxima à velocidade crítica de sedimentação.

Traçou-se também nestas figuras, a partir dos valores determinados experimentalmente, funções ajustadas para a velocidade crítica de sedimentação.

Na Figura 5.2.2.4, foram obtidas as curvas de ajuste polinomial indicadas. As funções obtidas permitiram a elaboração da Tabela 5.4.1, onde são apresentados os acréscimos da perda de carga em função da concentração, expressos em diferenças percentuais relativas.

Os valores da Tabela 5.4.1 são apresentados na Figura 5.4.2.1, onde se verifica para as velocidades mais baixas grandes acréscimos na perda de carga, e a medida que se aumenta a velocidade as diferenças percentuais relativas vão diminuindo. Ou seja à medida que a mistura vai tornando-se homogênea as isoconcentrações aproximam-se da curva de perda de carga da água limpa. Esta tendência é verificada na Figura 5.2.2.4.

Na Figura 5.4.2.2 são apresentadas as curvas de isoconcentrações, e as curvas que relacionam a perda de carga com as velocidades crítica de sedimentação e crítica.

Observa-se que as curvas que relacionam a perda de carga com as velocidades crítica de sedimentação e crítica, à medida que se aumenta a concentração do sólido da mistura, elas vão divergindo-se. A curva referente a velocidade crítica de sedimentação abre para a esquerda e a da velocidade crítica para a direita. Neste caso para efeito de dimensionamento da instalação deve-se tomar a velocidade crítica como parâmetro, uma vez que, além de se ter a condição de mínima energia dissipada, tem-se assegurada também a não formação do leito estacionário e consequentemente a não obstrução da canalização.

Na Figura 5.4.2.3 foram plotados os pontos que relacionam a velocidade crítica de sedimentação com a perda de carga. Observa-se que a velocidade crítica de sedimentação, para a faixa de concentrações da mistura, encontra-se entre os valores 1,45 a 1,80 m/s. Para este intervalo, tem-se na Tabela 5.4.1 os seguintes acréscimos médios da perda de carga unitária: para concentração de 2%, 171,5%; para a concentração de 5%, 283,1%, e para a concentração de 10%, 492,0%.

O aumento da energia dissipada, ao elevar a concentração do sólido da mistura, na faixa de dimensionamento da instalação, leva o projetista a utilizar mecanismo que amenize estes aumentos. Um dos mecanismos é adicionar substâncias redutoras de arraste como os polímeros.

Observa-se ainda, na Figura 5.4.2.3, uma redução da velocidade crítica de sedimentação ao aumentar a concentração do sólido da mistura.

Na Figura 5.4.2.4, os pontos que relacionam a velocidade crítica de sedimentação e a concentração do sólido da mistura (areia A) foram ajustados obtendo a equação 5.4.2, que permite calcular a velocidade crítica para a concentração desejada.

$$V_{cs} = 0,0009.Ci^2 - 0,0422.Ci + 1,8673 \quad (5.4.2)$$

$$Cc = 0,96$$

Na qual: V_{cs} (m/s); Ci (%).

Na Figura 5.4.2.5, apresentam-se os pontos que relacionam a velocidade crítica e a perda de carga. Estes pontos foram ajustados obtendo-se a equação (5.4.3):

$$Jc = 0,0229.Vc^{2,01} \quad (5.4.3)$$

$$Cc = 0,89$$

Na qual: Jc (m/m); Vc (m/s).

Na Figura 5.4.2.6, os pontos que relacionam a velocidade crítica e a concentração do sólido da mistura (areia A) foram ajustados obtendo-se a equação 5.4.4, que permite calcular a velocidade crítica para a concentração desejada. Tem-se nessa figura que a velocidade crítica eleva-se ao aumentar a concentração da mistura.

$$Vc = 0,376.\ln Ci + 1,456 \quad (5.4.4)$$

$$Cc = 0,99$$

Na qual: Vc (m/s); Ci (%).

Tabela 5.4.1 – Acréscimos em termos de diferenças percentuais relativas em função da concentração do sólido da mistura. (Areia A)

V (m/s)	J2%-JH20/JH20	J5%-JH20/JH20	J10%-JH20/JH20
0,5	2230,4	3892,0	6107,4
1	514,3	873,8	1415,1
1,45	208,4	345,8	591,1
1,5	190,6	315,4	543,4
1,8	115,3	188,1	341,7
2	85,0	137,5	259,9
2,5	44,0	70,2	146,3
3	27,2	43,3	93,7
3,5	20,6	32,2	64,7
4	18,3	27,4	44,5
4,5	17,7	24,5	26,7
5	17,6	21,6	8,4

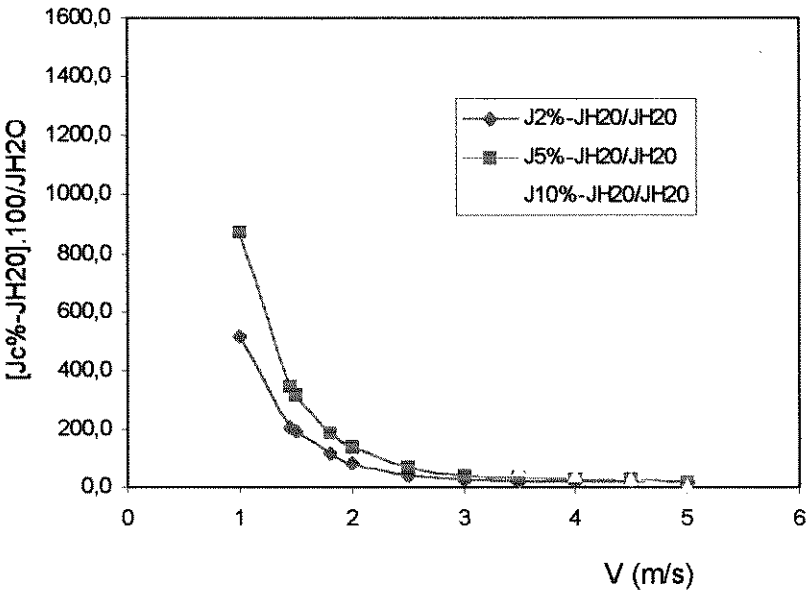


Figura 5.4.2.1 – Acréscimos percentuais relativos da perda de carga ao elevar a concentração da mistura.

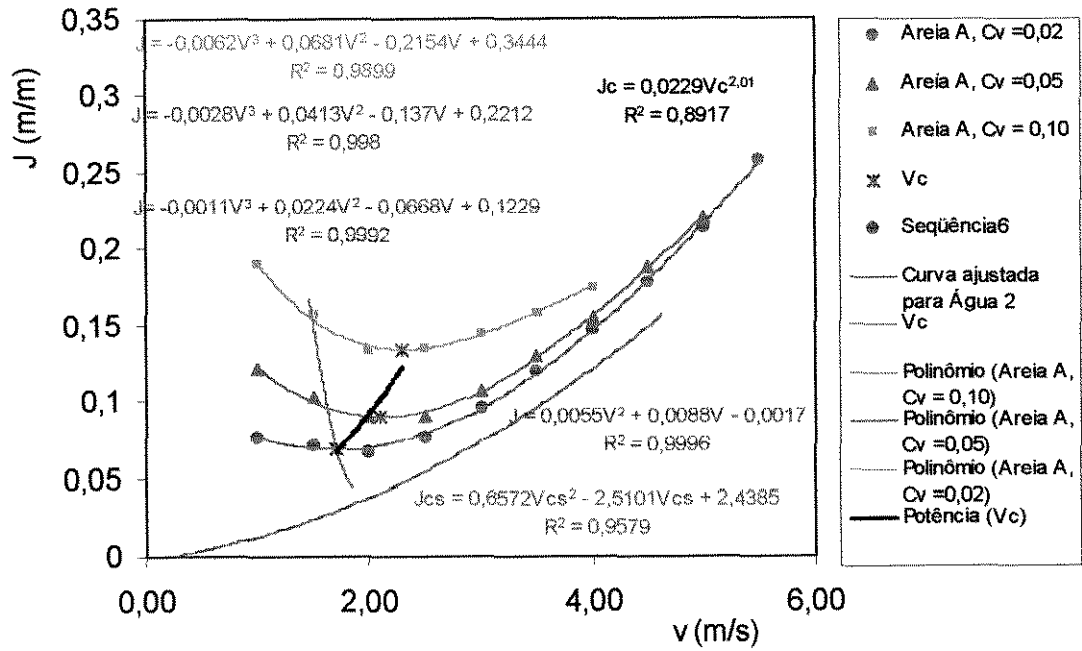


Figura 5.4.2.2 – Perda de carga em função da velocidade média e da concentração média do sólido na mistura. Curvas ajustadas.

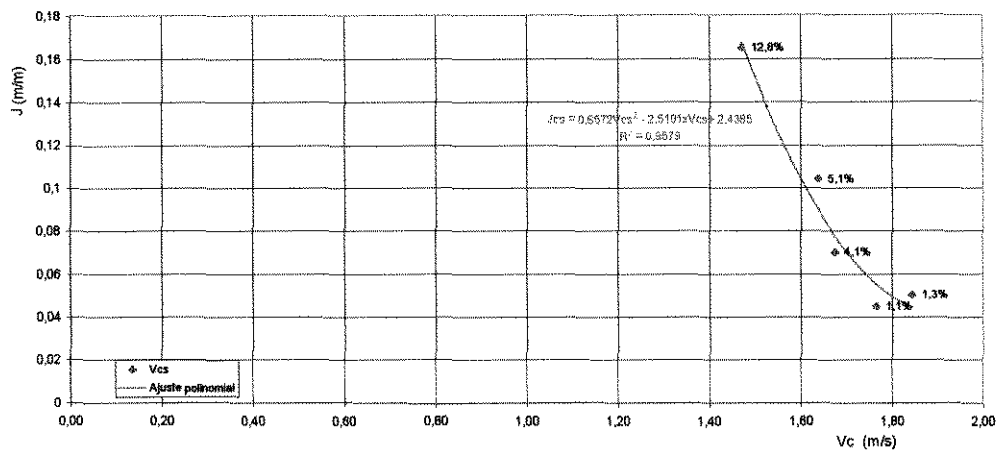


Figura 5.4.2.3: Perda de carga em função da velocidade crítica de sedimentação para a areia A.

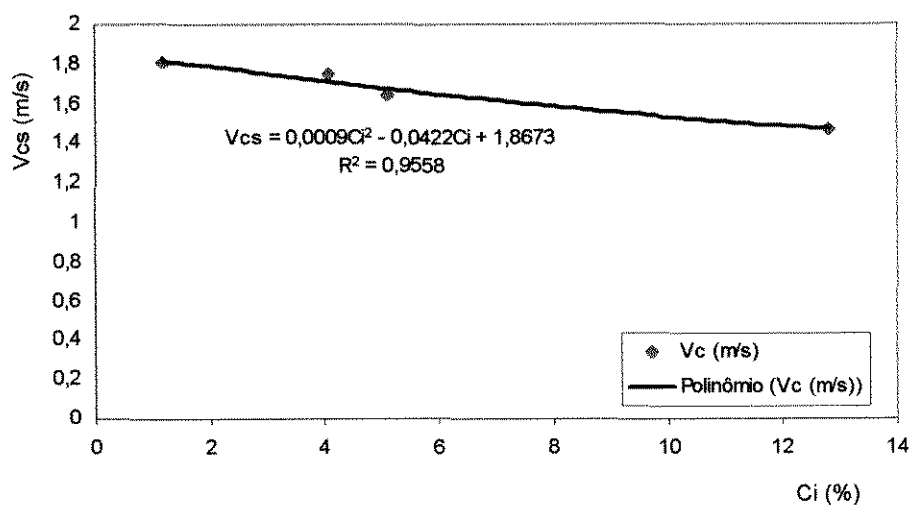


Figura 5.4.2.4: Velocidade crítica de sedimentação em função da concentração do sólido da mistura (areia A).

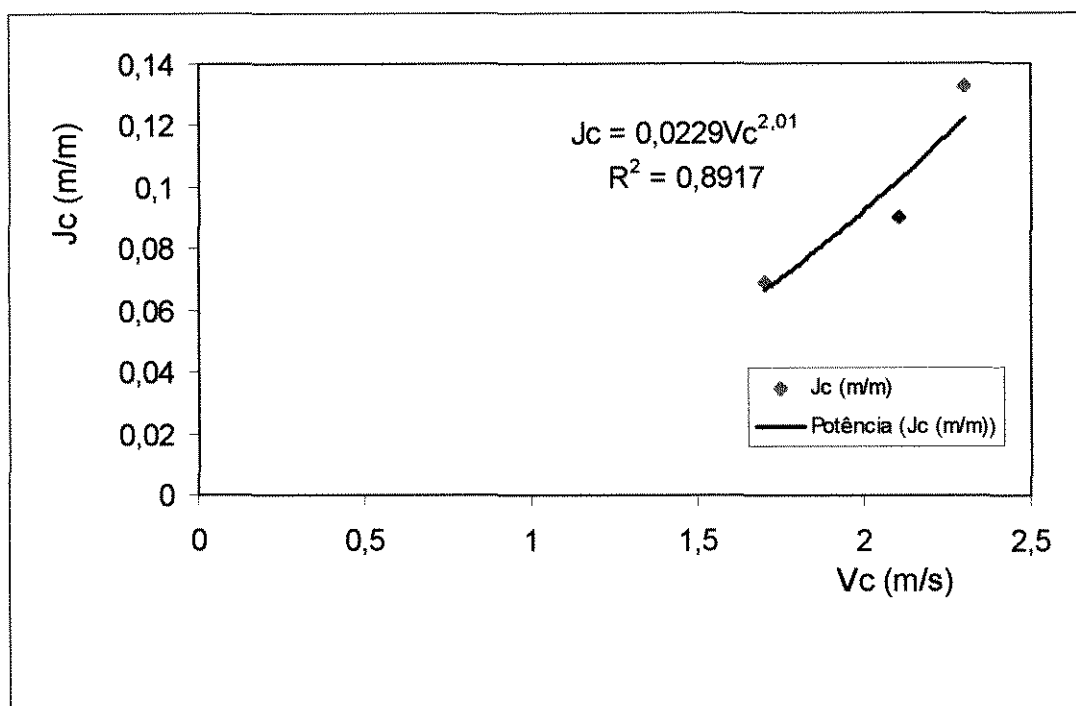


Figura 5.4.2.5: Perda de carga em função da velocidade crítica para a areia A.

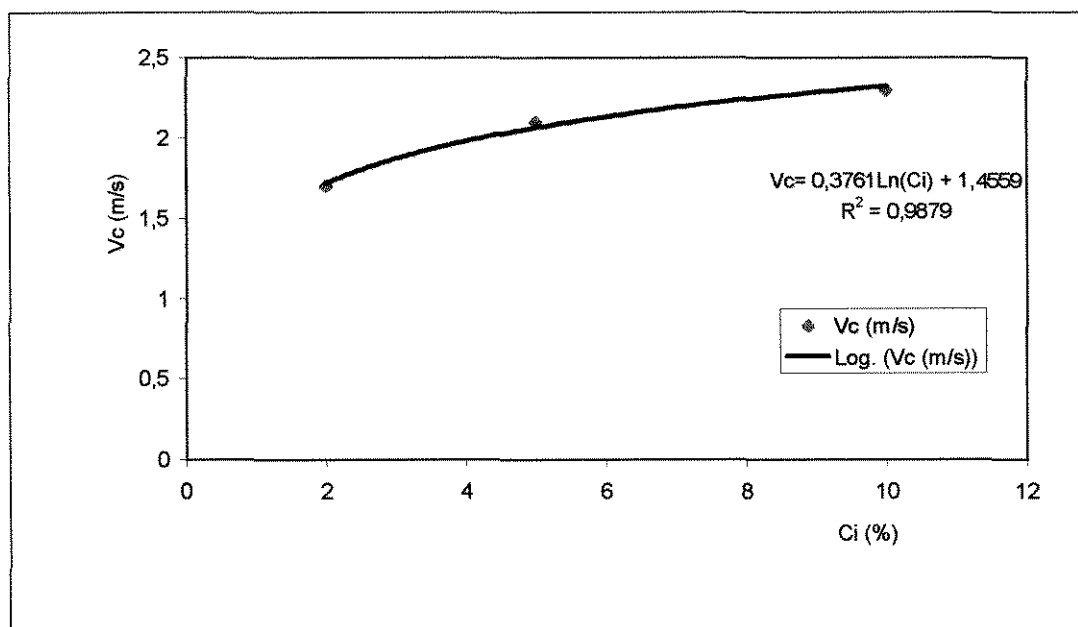


Figura 5.4.2.6: Velocidade crítica em função da conc. do sólido da mistura (areia A).

5.4.3 – Ensaio com mistura de água + areia BC.

Na Figura 5.4.3.1, os pontos que relacionam a perda de carga e a velocidade crítica de sedimentação foram ajustados resultando a equação 5.4.5:

$$J_{cs} = 0,1826 \cdot \ln(V_{cs}) - 0,069 \quad (5.4.5)$$

$$C_c = 0,99$$

Na qual: J_{cs} (m/m); V_{cs} (m/s).

Na Figura 5.4.3.2, os pontos que relacionam a perda de carga, referente à velocidade crítica de sedimentação, e a concentração do sólido da mistura foram ajustados resultando a equação 5.4.6:

$$J_{cs} = 0,0179 \cdot \ln(C\%) + 0,0243 \quad (5.4.6)$$

$$C_c = 0,90$$

Na qual: J_c (m/m); $C\%$ (concentração do sólido em porcentagem do volume da mistura).

Na Figura 5.4.3.3, os pontos que relacionam a perda de carga e a velocidade crítica foram ajustados resultando a equação 5.4.7.

$$J_c = 0,1432.Ln.(V_c) - 0,0081 \quad (5.4.7)$$

$$C_c = 0,99$$

Na qual: J_c (m/m); V_c (m/s).

Na Figura 5.4.3.4, os pontos que relacionam a perda de carga, referente à velocidade crítica, a concentração do sólido na mistura foram ajustados resultando a equação 5.4.8:

$$J_c = 0,0183.Ln.(C\%) + 0,0231 \quad (5.4.8)$$

$$C_c = 0,92$$

Na qual: J_c (m/m); $C\%$ (concentração do sólido em porcentagem do volume da mistura).

Na Figura 5.4.3.5, os pontos que relacionam a velocidade crítica de sedimentação e a concentração do sólido da mistura foram ajustados resultando a equação (5.4.9)

$$V_{cs} = 0,1938.Ln(C\%) + 1,6441 \quad (5.4.9)$$

$$C_c = 0,99$$

Na qual: V_{cs} (m/s); $C\%$ (concentração do sólido em porcentagem do volume da mistura).

Pode-se notar na Figura 5.4.3.5 que a velocidade crítica de sedimentação aumenta ao se elevar a concentração do sólido da mistura.

Na Figura 5.4.3.6, os pontos que relacionam a velocidade crítica e a concentração do sólido na mistura foram ajustados resultando a equação 5.4.10:

$$V_c = 0,1985.Ln(C_i) + 1,2146 \quad (5.4.10)$$

$$C_c = 0,72$$

Na qual: V_c (m/s); C_i (%).

Pode-se notar na Figura 5.4.3.6 que a velocidade crítica aumenta ao se elevar a concentração do sólido da mistura.

As curvas de isoconcentrações para efeito de comparação foram apresentadas na Figura 5.4.3.7. Comparando estas curvas verifica-se, para uma mesma velocidade média, aumentos da perda de carga à medida que se eleva a concentração da mistura, principalmente para o intervalo de velocidades próxima à velocidade crítica de sedimentação. Observa-se ainda que à medida que se aumenta a velocidade de escoamento há uma tendência das curvas de isoconcentrações aproximarem da curva referente à água limpa.

Os aumentos das perdas de cargas, tomando-se como referência, as perdas provocadas pelo escoamento de água limpa, Equação 5.4.1, expressas em diferenças percentuais relativas são apresentadas na Tabela 5.4.2.

Os valores da Tabela 5.4.2 são apresentados na Figura 5.4.3.8, onde se verifica, para as velocidades mais baixas, grandes acréscimos na perda de carga, e à medida que se aumenta a velocidade as diferenças percentuais relativas vão diminuindo. Ou seja à medida que a mistura vai tornando-se homogênea as isoconcentrações aproximam-se da curva de perda de carga da água limpa. Esta tendência é verificada na Figura 5.4.3.7.

Nas Figuras 5.4.3.1, e 5.4.3.3, verifica-se que, para as concentrações ensaiadas, as velocidades crítica de sedimentação e crítica encontram-se na faixa entre 1,30 m/s e 2,10 m/s. Para esta faixa de velocidades tem-se os seguintes acréscimos médios na perda de carga unitária, expressos em diferenças percentuais relativas: para a concentração de 2%, 56,0%; para a concentração de 5%, 105,0%, para a concentração de 10%, 135,9%, e para a concentração de 15%, 194,2%.

Tabela 5.4.2 – Acréscimos em termos de diferenças percentuais relativas em função da concentração do sólido da mistura. (Areia BC)

V (m/s)	$[(J2\%-JH20).100]/JH20$	$[(J5\%-JH20).100]/JH20$	$[(J10\%-JH20).100]/JH20$	$[(J15\%-JH20).100]/JH20$
0,5	893,4	1412,3	1517,0	2251,0
0,75	374,9	615,2	684,4	1008,2
1	193,4	331,0	383,3	560,0
1,25	109,6	196,3	238,0	344,5
1,3	98,5	178,1	218,2	315,2
1,35	88,8	162,0	200,5	289,1
1,4	80,1	147,6	184,6	265,6
1,42	77,0	142,3	178,7	256,9
1,5	65,7	123,3	157,4	225,6
1,75	41,3	80,6	109,0	154,4
1,96	29,1	58,0	82,4	115,6
1,98	28,2	56,3	80,3	112,7
2	27,4	54,7	78,3	109,8
2,1	23,7	47,3	69,3	96,7
2,25	19,5	38,6	58,3	80,8
2,5	15,4	28,5	45,0	61,8
3	13,2	18,9	30,1	41,0
3,5	15,1	16,6	23,7	32,7

Traçou-se também na Figura 5.4.3.7, a partir dos valores determinados experimentalmente, funções ajustadas para as velocidade crítica de sedimentação e crítica. A curva referente à velocidade crítica está a esquerda, isto indica que, para o dimensionamento de instalações de recalque de misturas constituídas de água e areia BC, deve-se tomar como parâmetro a velocidade crítica de sedimentação. Caso se tome a velocidade crítica como parâmetro de dimensionamento corre-se o risco de formação de leito estacionário e consequentemente obstrução da tubulação.

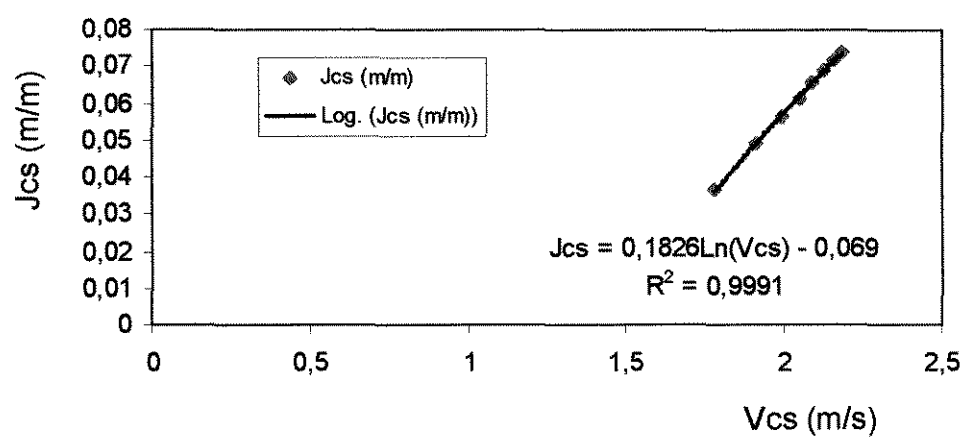


Figura 5.4.3.1: Perda de carga em função da veloc. crítica de sedimentação (AREIA BC).

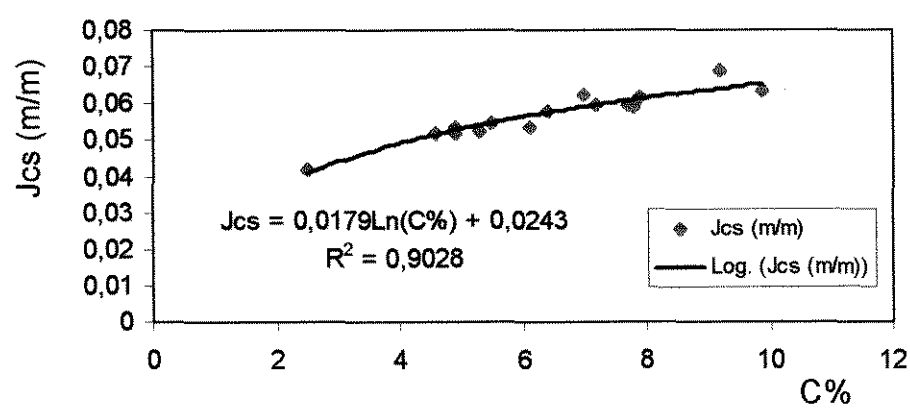


Figura 5.4.3.2: Perda de carga, referente à velocidade crítica de sedimentação, em função da concentração (AREIA BC).

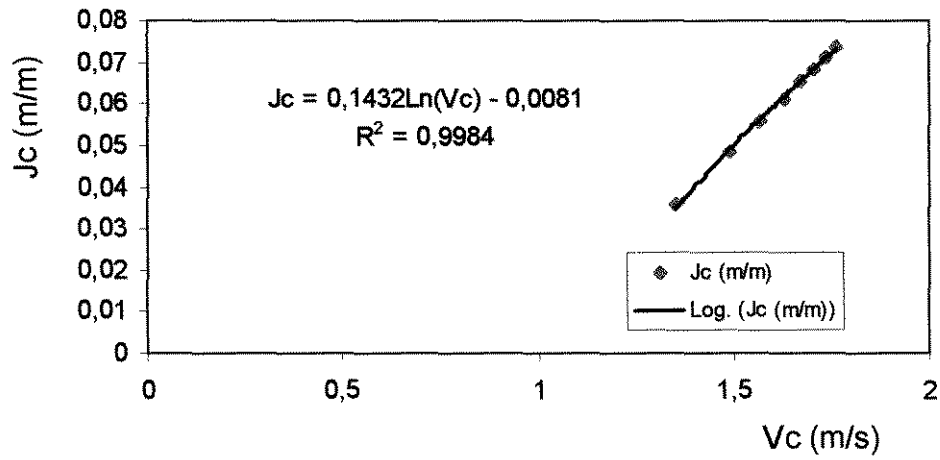


Figura 5.4.3.3: Perda de carga em função da velocidade. crítica de (AREIA BC).

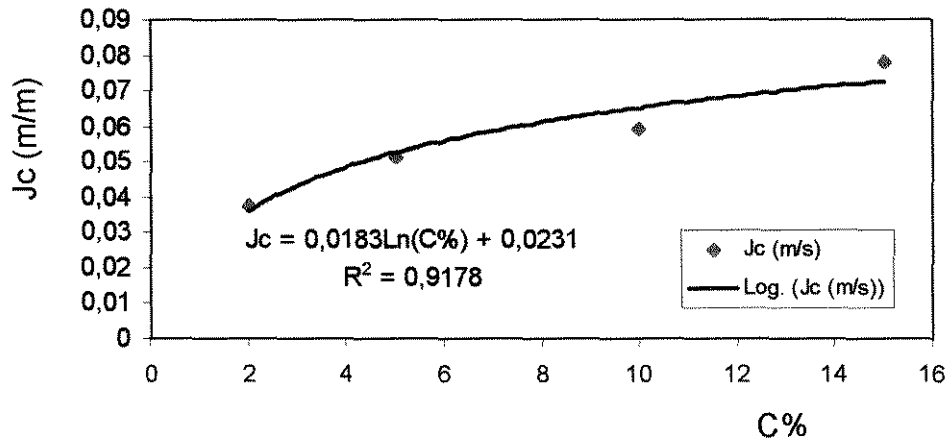


Figura 5.4.3.4: Perda de carga, referente à velocidade crítica, em função da concentração (AREIA BC).

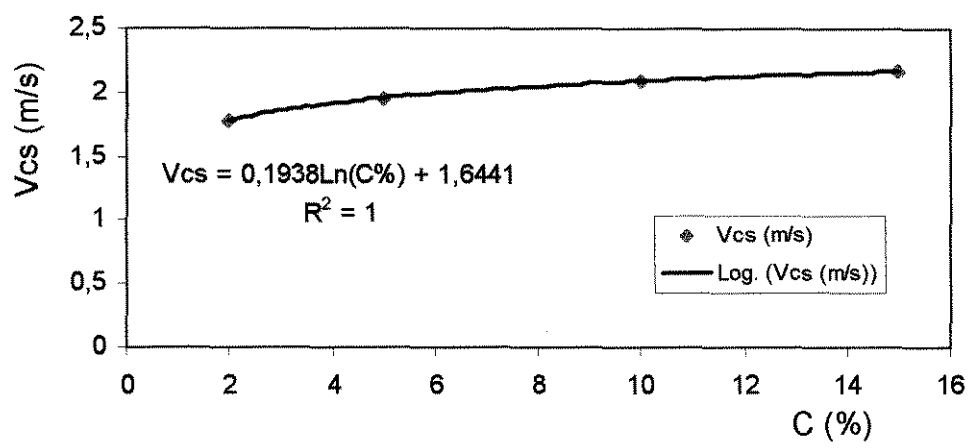


Figura 5.4.3.5: Velocidade crítica de sedimentação em função da concentração do sólido na mistura (AREIA BC).

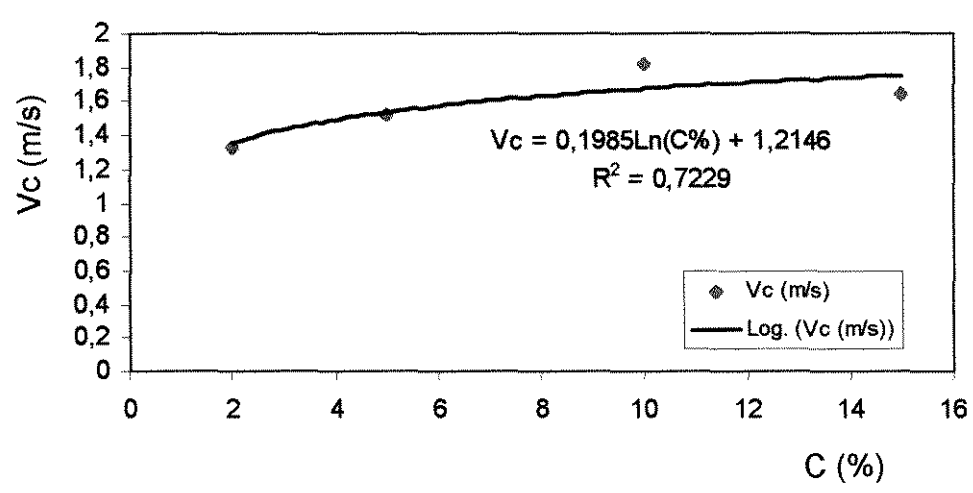


Figura 5.4.3.6: Velocidade crítica de em função da concentração do sólido na mistura (AREIA BC).

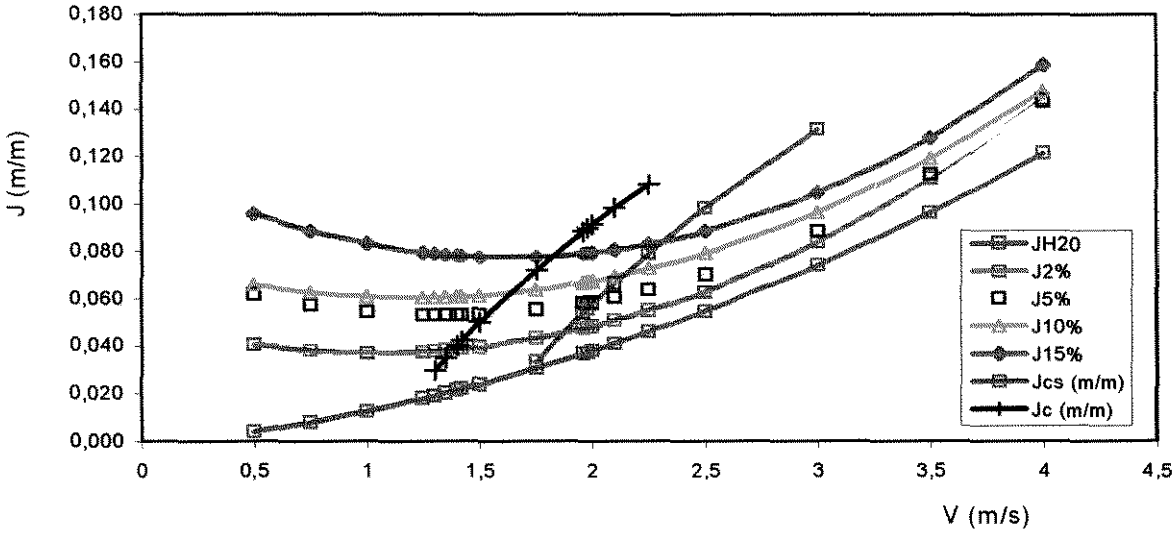


Figura 5.4.3.7: Perda de carga em função da velocidade e da concentração do sólido da mistura (AREIA BC).

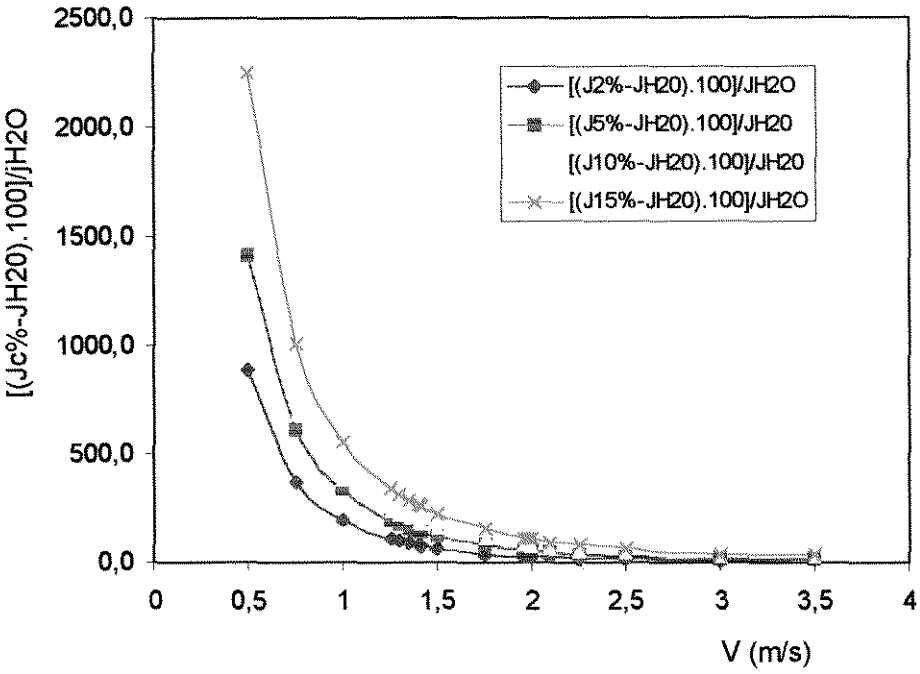


Figura 5.4.3.8 – Acréscimos percentuais relativos da perda de carga ao elevar a concentração da mistura.

5.4.4 – Influência do tamanho do grão do sólido na perda de carga, na velocidade crítica de sedimentação, e na velocidade crítica.

Para se verificar a influencia do tamanho do grão do sólido, que compõe a mistura, sobre a perda de carga, foram elaborados os gráficos das Figuras 5.4.4.1, 5.4.4.2, e 5.4.4.3. Para isto, manteve-se constante a concentração em cada uma das figuras e foram alocadas as perdas de carga provocadas pelo escoamento de misturas constituídas pelas areias A ($d_{50}=1,30\text{mm}$) e BC ($d_{50}=0,20\text{mm}$).

Observa-se que a areia A, de maior diâmetro, mantidas constantes a velocidade e a concentração, provoca perdas de carga maiores. À medida que se diminui a velocidade, a diferença entre as perdas aumentam. Para velocidades maiores a diferença vai se reduzindo.

Na Figura 5.4.4.4 apresentam os valores da relação entre a perda de carga devido ao escoamento de mistura constituída com a areia A e a perda de carga devido ao escoamento de mistura constituída com a areia BC. Pode-se notar que, para uma mesma velocidade de escoamento, à medida que se aumenta a concentração eleva-se o valor desta relação, ou seja a perda de carga devido a areia A vai se tornando maior que a da areia BC. Nota-se ainda que as relações decrescem à medida que se aumenta a velocidade do escoamento com uma tendência à unidade.

Os valores das relações, entre a perda de carga devido ao escoamento de mistura constituída com a areia A e a perda de carga devido ao escoamento de mistura constituída com a areia BC, que geraram a Figura 5.4.4.4, são apresentados na Tabela 5.4.3.

Na Figura 5.4.4.5 são apresentadas as curvas que relacionam a velocidade crítica de sedimentação e a concentração da fase sólida da mistura para as duas areias. Verifica-se, para uma mesma concentração, que a velocidade crítica de sedimentação aumenta ao se reduzir o tamanho do grão de areia. À medida que a concentração assume valores muito baixos há a tendência da não influencia do tamanho do grão de areia na velocidade crítica de sedimentação.

Na Figura 5.4.4.6 são apresentadas as curvas que relacionam a velocidade crítica e a concentração da fase sólida da mistura para as duas areias. Verifica-se, para uma mesma concentração, que a velocidade crítica aumenta ao se elevar o tamanho do grão de areia. À medida que a concentração assume valores muito baixos há a tendência da não influencia do tamanho do grão de areia na velocidade crítica.

Tabela 5.4.3 : Relação entre a perda de carga devido ao escoamento de mistura constituída com a areia A e a perda de carga devido ao escoamento de mistura constituída com a areia BC.

V (m/s)	[J2%(1,30mm)/J2%(0,20mm)]	[J5%(1,30mm)/J5%(0,20mm)]	[J10%(1,30mm)/J10%(0,20mm)]
0,5	2,3	2,6	3,8
1	2,1	2,3	3,1
1,5	1,8	1,9	2,5
2	1,5	1,5	2,0
2,5	1,2	1,3	1,7
3	1,1	1,2	1,5
3,5	1,0	1,1	1,3
4	1,0	1,1	1,2

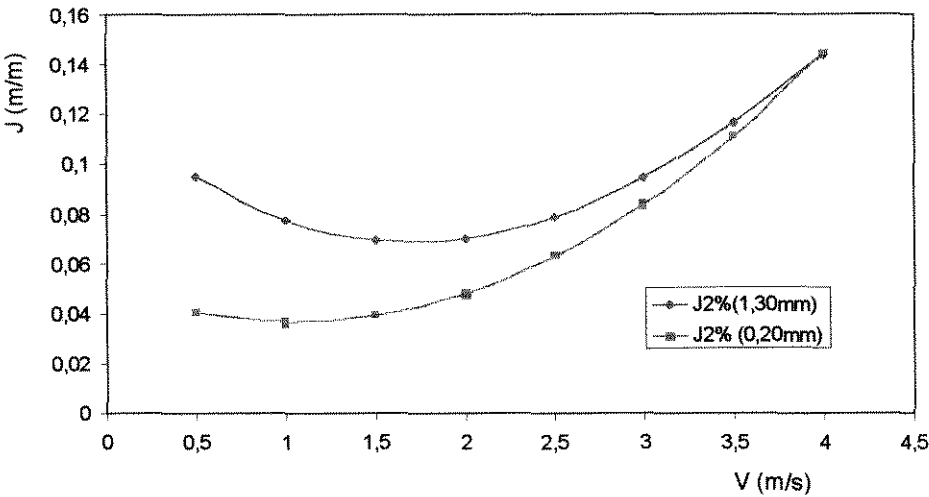


Figura 5.4.4.1: Comparação entre as perdas de carga provocadas por escoamentos de misturas constituídas pelas areias A ($d_{50}=1,30\text{mm}$) e BC ($d_{50}=0,20\text{mm}$) mantendo-se a mesma concentração de 2% em volume da mistura.

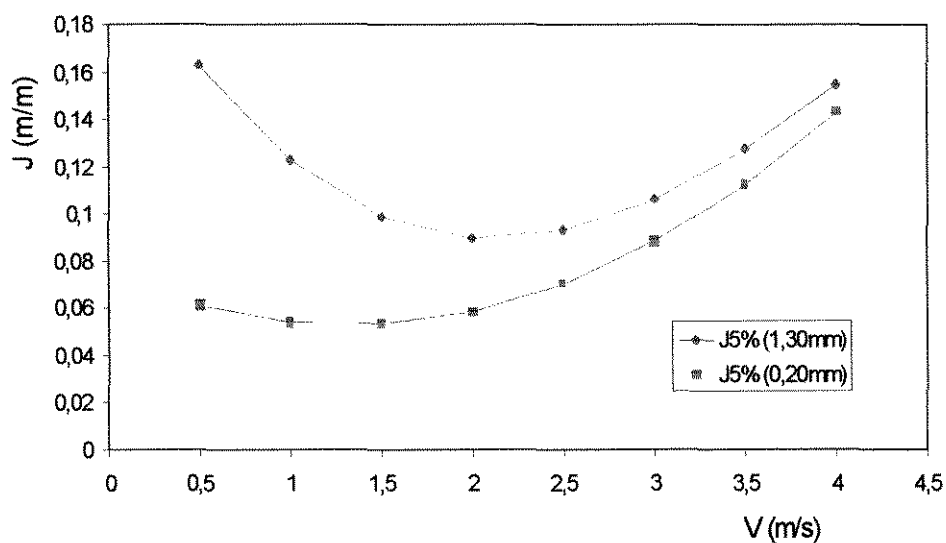


Figura 5.4.4.2: Comparação entre as perdas de carga provocadas por escoamentos de misturas constituídas pelas areias A ($d_{50}=1,30\text{mm}$) e BC ($d_{50}=0,20\text{mm}$) mantendo-se a mesma concentração de 5% em volume da mistura.

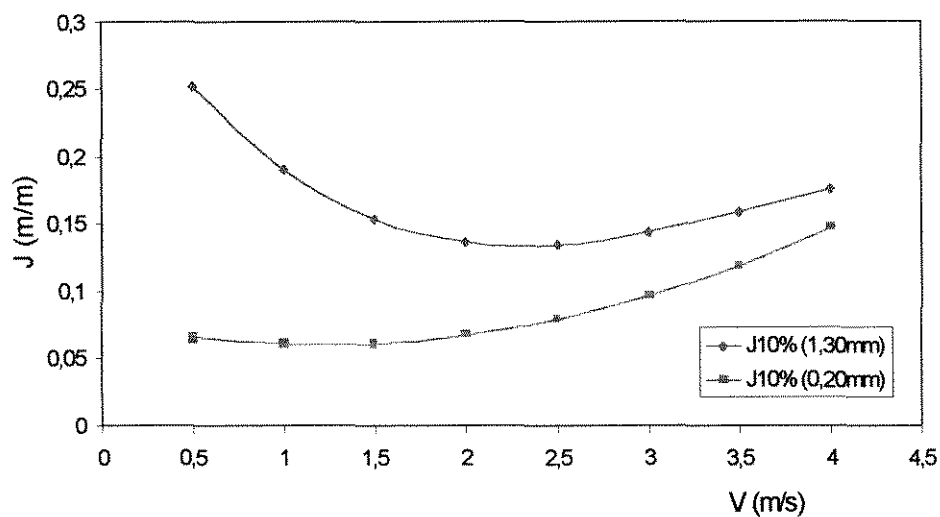


Figura 5.4.4.3: Comparação entre as perdas de carga provocadas por escoamentos de misturas constituídas pelas areias A ($d_{50}=1,30\text{mm}$) e BC ($d_{50}=0,20\text{mm}$) mantendo-se a mesma concentração de 10% em volume da mistura.

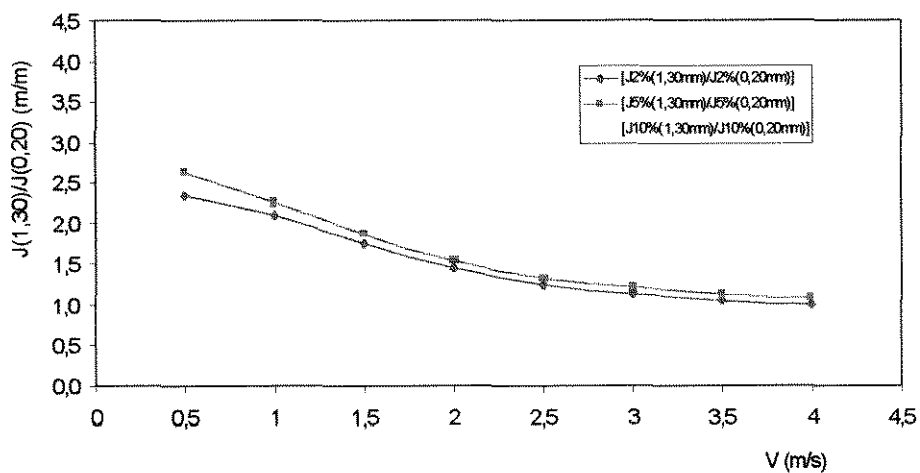


Figura 5.4.4.4: Relação entre as perdas de carga provocadas por escoamentos de misturas constituídas pelas areias A ($d_{50}=1,30\text{mm}$) e BC ($d_{50}=0,20\text{mm}$) para as três concentrações.

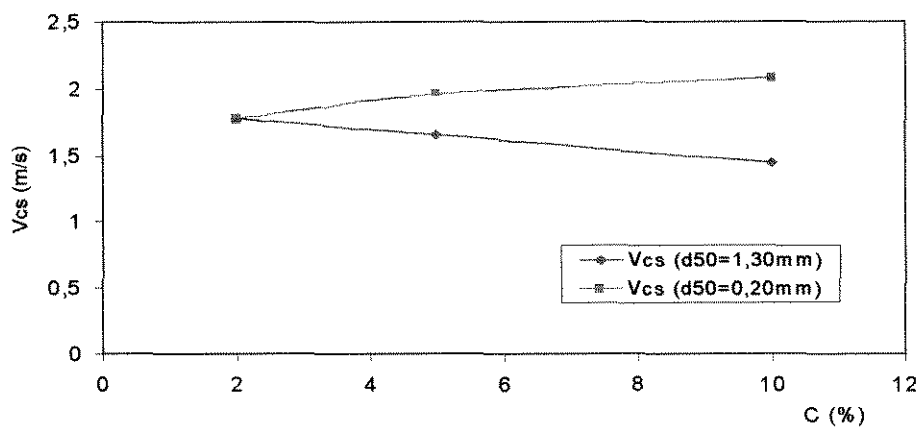


Figura 5.4.4.5: Influência do tamanho do grão da fase sólida da mistura na velocidade crítica de sedimentação.

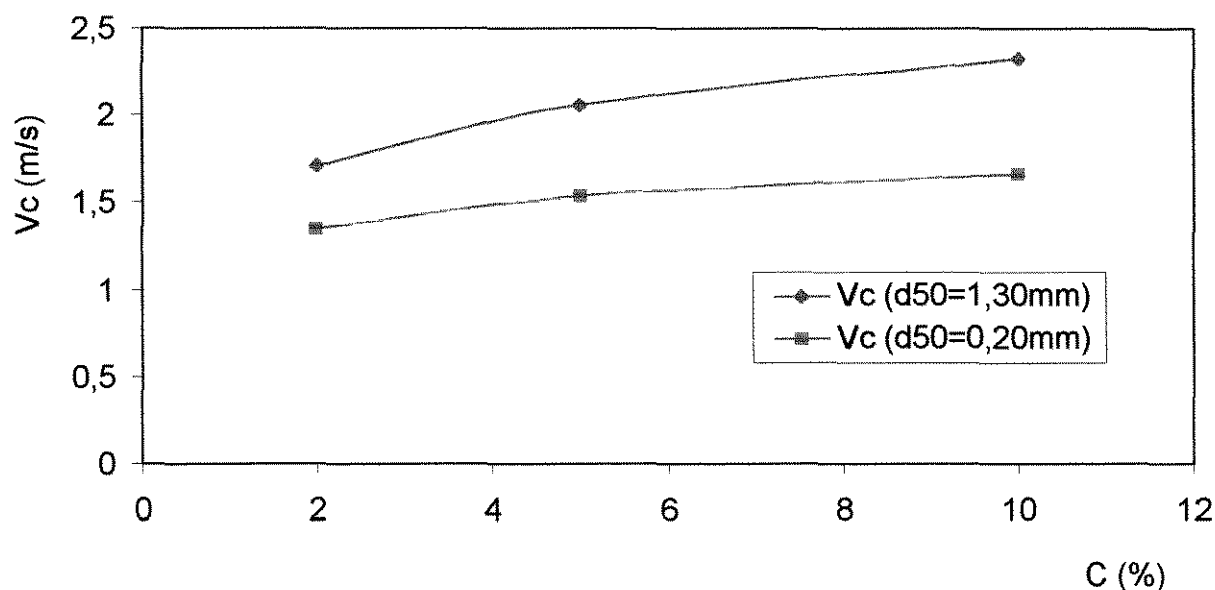


Figura 5.4.4.6: Influência do tamanho do grão da fase sólida da mistura na velocidade crítica.

5.4.5 – Ensaio com soluções de polímero.

Para a verificação da influência do polímero na perda de carga foram preparadas três soluções poliméricas com as seguintes concentrações: 100 ppm, 400 ppm, e 600 ppm.

Nos ensaios preliminares com as soluções de polímero, foram obtidos dados experimentais e assim a partir destes valores, foram obtidos os gráficos da Figuras 5.4.5.1, 5.4.5.2, e 5.4.5.3. Nestas figuras, foram colocados os pontos que relacionam a perda de carga unitária e a velocidade média do escoamento das soluções. Estes pontos foram ajustados obtendo-se as seguintes equações:

$$J(C_p=100) = -0,0013 \cdot V^2 + 0,0406 \cdot V - 0,0432 \quad (5.4.11)$$

$$C_c = 0,99$$

Na qual: J (m/m); V (m/s), para Cp=100 ppm.

$$J(Cp=400)=0,0009.V^2 + 0,0095.V - 0,0006 \quad (5.4.12)$$

$$Cc=0,99$$

Na qual: J (m/m); V (m/s), para Cp=400 ppm

$$J(Cp=600)=0,0003.V^2 + 0,0148.V - 0,0104 \quad (5.4.13)$$

$$Cc=0,99$$

Na qual: J (m/m); V (m/s), para Cp=600 ppm

A partir das curvas ajustadas foram traçados os gráficos apresentados na Figura 5.4.5.4. Para efeito de comparação foi desenhado também a curva referente ao escoamento de água limpa (Água 4).

Verificam-se reduções significativas na perda de carga à medida que se aumenta a concentração do polímero. As reduções vão se tornando mais expressivas para velocidades mais altas, demonstrando que esta solução tem mais eficiência no escoamento turbulento.

Os valores das reduções, expressas em diferenças percentuais relativas, são apresentadas na Tabela 5.4.4, onde se tem os seguintes valores médios das reduções: para Cp=100 ppm, 27%; para Cp=400 ppm, 56,1%, e para Cp=600 ppm, 57,3.

Na Figura 5.4.5.5, os valores médios das reduções da perda de carga foram ajustados em função da concentração do polímero, obtendo-se a seguinte equação;

$$\Delta = [(JH2O-JCp)-JH2O].100 = -0,0002.Cp^2 + 0,1847.Cp + 10,82 \quad (5.4.14)$$

$$Cc=1,0.$$

Na qual: Δ (%); J_i (m/m); e C_p (ppm).

Nota-se que existe um valor limite para a concentração do polímero, pois os valores das reduções da perda de carga devido às concentrações de 400 e 600 ppm, praticamente são as mesmas. Esta tendência é verificada na Figura 5.4.5.5, em que há uma redução muito elevada à medida que se aumenta a concentração do polímero até 400 ppm, mantendo-se praticamente constante a partir deste valor.

Tabela 5.4.4: Reduções expressas em diferenças percentuais relativas em função da velocidade de escoamento e da concentração do polímero.

V (m/s)	[JH2O-J100/JH2O].100	[JH2O-J400/JH2O].100	[JH2O-J600/JH2O].100
1,5	37,0	33,2	46,8
2	14,8	42,9	47,0
2,5	11,7	49,4	49,9
3	14,8	54,1	53,2
3,5	19,8	57,8	56,4
4	25,3	60,7	59,3
4,5	30,7	63,0	61,9
5	35,7	65,0	64,1
5,5	40,4	66,6	66,1
6	44,7	68,0	67,9
Médias	27,5	56,1	57,3

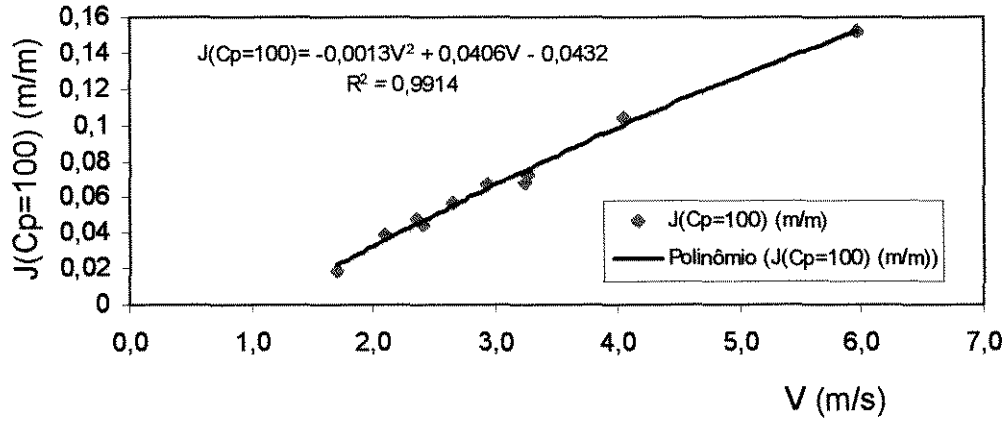


Figura 5.4.5.1: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento da solução de água-polímero de concentração igual a 100 ppm.

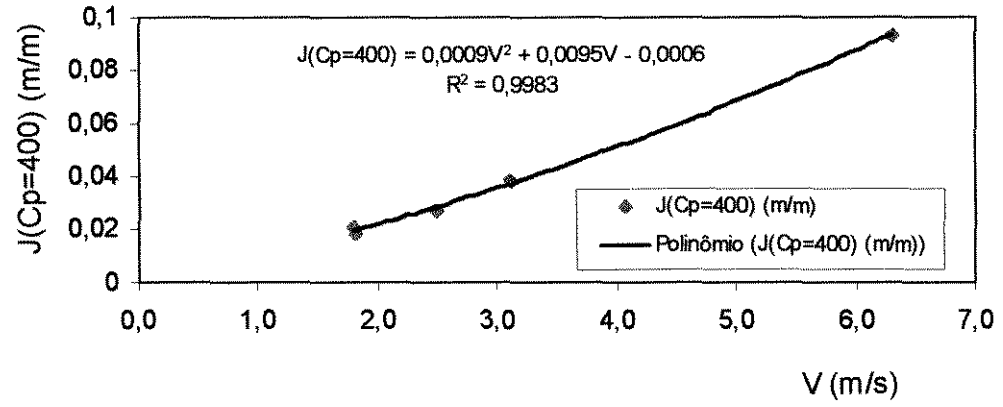


Figura 5.4.5.2: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento da solução de água-polímero de concentração igual a 400 ppm.

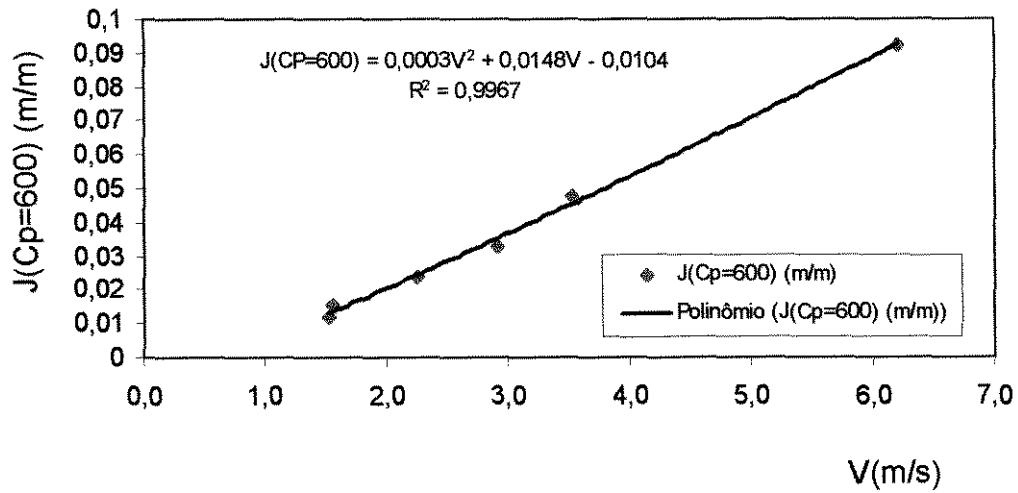


Figura 5.4.5.3: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento da solução de água-polímero de concentração igual a 600 ppm.

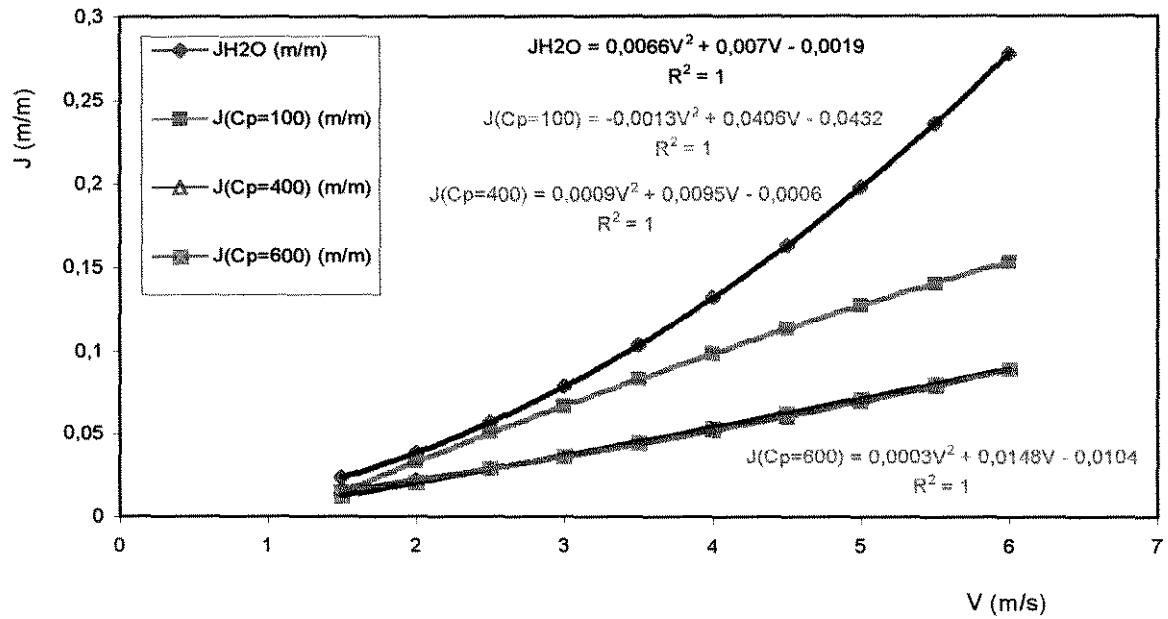


Figura 5.4.5.4: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento da solução de água-polímero para as três concentrações de polímero.

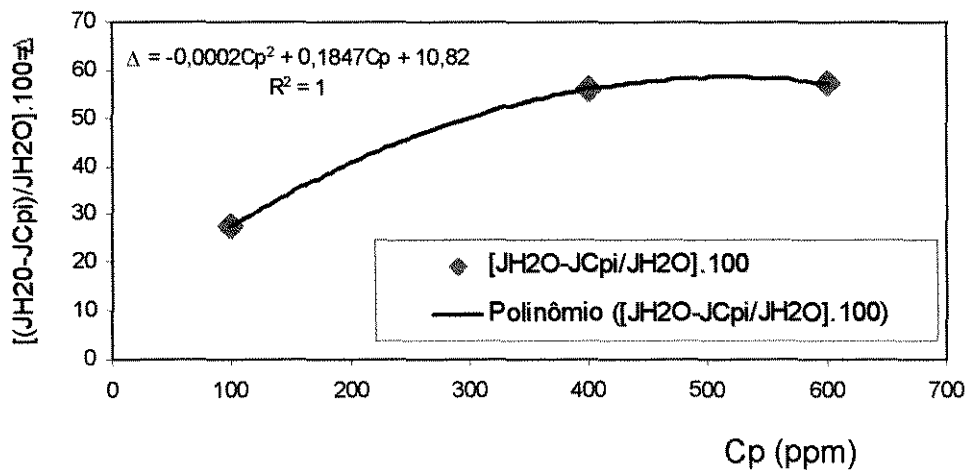


Figura 5.4.5.5: Valores médios das reduções da perda de carga expressas em diferenças percentuais relativas em função da concentração do polímero.

5.4.6 – Ensaio com soluções de água – polímero - areia BC.

A seguir verifica-se o efeito de adição de polímero sobre o transporte de areia BC, em concentrações variadas de polímero e de areia BC.

5.4.6.1 – Concentrações: areia a 2%, e polímero a 100ppm e 400ppm.

Os pontos experimentais que relacionam a perda de carga unitária e a velocidade média do escoamento, para 2% de areia BC em soluções de 100ppm e 400 ppm de polímero foram colocados nos gráficos das Figuras 5.4.6.1.1, e 5.4.6.1.2. Esses pontos foram ajustados resultando as seguintes equações:

$$J(2\%-100) = 0,0094.V^2 - 0,014.V + 0,0304 \quad (5.4.15)$$

$$Cc=0,96$$

Na qual: J (m/m); C=2%; Cp=100ppm; V (m/s).

$$J(2\%-400) = 0,0161.V^2 - 0,0477.V + 0,0589 \quad (5.4.16)$$

$$C_c = 0,96$$

Na qual: J (m/m); $C=2\%$; $C_p=400\text{ppm}$; V (m/s).

A partir das equações (5.4.15), (5.4.16), e da equação de perda de carga, referente ao escoamento de mistura constituída de água e areia BC a 2%, que constam na Figura 5.4.3.7, obteve-se a Figura 5.4.6.1.3. Tem-se em comum nessa figura: o sólido (areia BC), e a concentração (2%).

Verifica-se, na Figura 5.4.6.1.3, que o polímero a 100 ppm, praticamente não provocou redução na perda de carga, enquanto que para a concentração de 400 ppm nota-se uma razoável redução.

Os valores das reduções, expressas em diferenças percentuais relativas, são apresentadas na Tabela 5.4.5, onde, para o intervalo de velocidades considerados, de 0,5 a 5,0 m/s, as reduções médias, provocadas pela adição do polímero a 100, e 400 ppm, foram de 1,3; e 21,9%.

Tabela 5.4.5: Reduções expressas em diferenças percentuais relativas em função da velocidade de escoamento e da concentração do polímero.

V (m/s)	$J_{2\%} - J(2\%-100).100/J_{2\%}$	$J_{2\%} - J(2\%-400)/J_{2\%}$
0,5	34,3	3,5
1	13,8	26,1
1,5	-3,8	40,4
2	-12,1	42,2
2,5	-12,7	36,2
3	-9,5	27,8
3,5	-5,1	19,7
4	-0,8	12,8
4,5	3,0	7,2
5	6,3	2,6
Médias	1,3	21,9

Os valores das velocidade crítica de sedimentação, velocidade crítica, respectivas perdas de carga, estão apresentadas na Tabela 5.4.6:

Na Tabela 5.4.6 são apresentados ainda, os valores das velocidades crítica de sedimentação, crítica e respectivas perdas de carga, referentes ao escoamento de mistura de água e areia a 2%. Verificam-se, no caso das soluções de polímero a 400 ppm, redução na perda de carga de 31,4 %, se considerar a velocidade crítica de sedimentação, e de 33,3 %, se considerar a velocidade crítica.

Tabela 5.4.6: Velocidades crítica de sedimentação, e crítica, (areia BC a 2%).

Cp (ppm)	Vcs (m/s)	Jcs (m/m)	Vc (m/s)	Jc (m/m)
0	1.78	0,0370	1.35	0.036
100	1,93	0,0410	1,40	0,032
400	1,49	0,0254	1,45	0,024

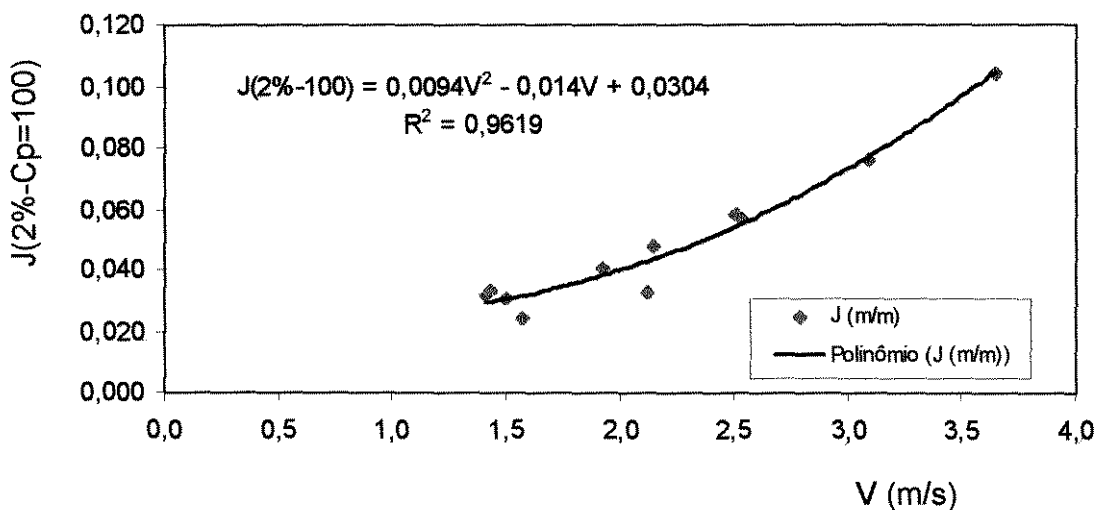


Figura 5.4.6.1.1: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 2%), e polímero, (conc.. de 100 ppm).

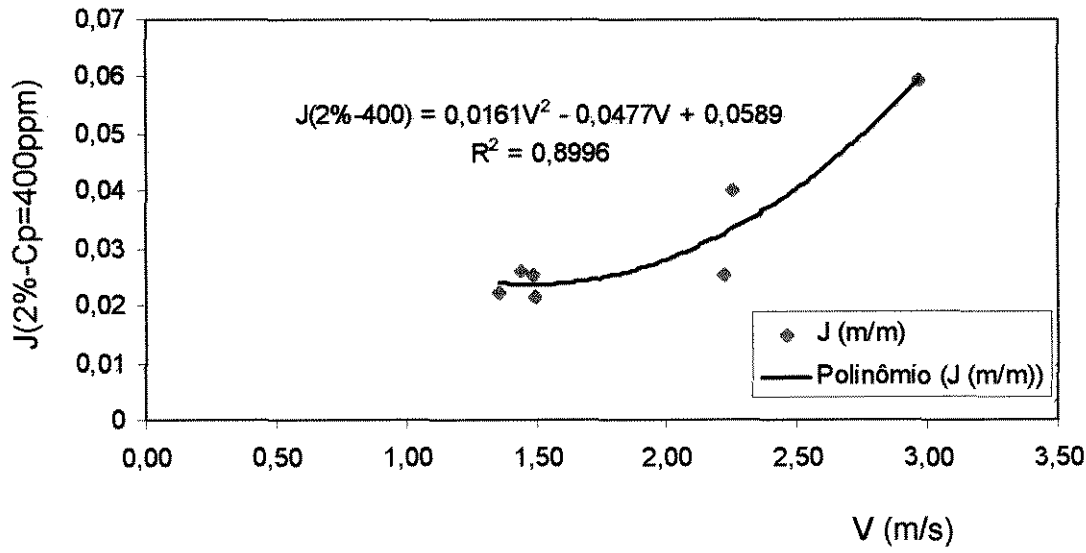


Figura 5.4.6.1.2: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 2%), e polímero, (conc.. de 400 ppm).

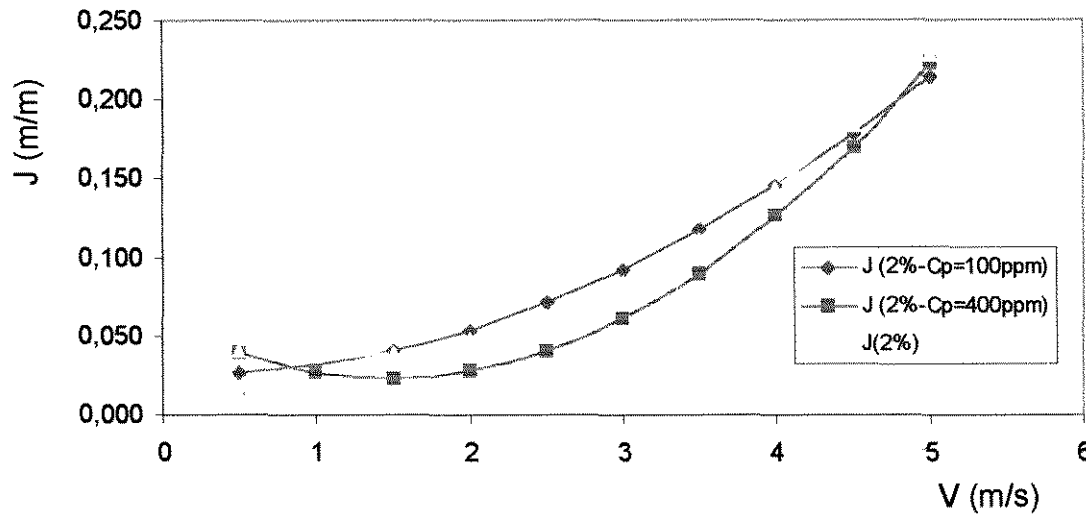


Figura 5.4.6.1.3: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 2%), e polímero, (concentração de 0, 100, e 400 ppm).

5.4.6.2 – Concentrações: areia a 5%, e polímero a 100ppm, 200 e 400ppm.

Os pontos que relacionam a perda de carga unitária e a velocidade média do escoamento, para 5% de areia BC em solução de 100 ppm, 200 ppm e 400 ppm, foram colocados nos gráficos das Figuras 5.4.6.2.1, 5.4.6.2.2, 5.4.6.2.3. Esses pontos foram ajustados resultando as seguintes equações:

$$J(5\%-100) = 0,0252.V^2 - 0,0828.V + 0,1114 \quad (5.4.17)$$

$$C_c = 0,49$$

Na qual: J (m/m); C=5%; C_p=100ppm; V (m/s).

$$J(5\%-200) = 0,0016.V^2 + 0,0046.V + 0,0326 \quad (5.4.18)$$

$$C_c = 0,84$$

Na qual: J (m/m); C=5%; C_p=200ppm; V (m/s).

$$J(5\%-400) = 0,0041.V^2 - 0,0028.V + 0,0222 \quad (5.4.19)$$

$$C_c = 0,40$$

Na qual: J (m/m); C=5%; C_p=400ppm; V (m/s).

A partir das equações (5.4.17), (5.4.18), e (5.4.19), e da equação de perda de carga, referente ao escoamento de mistura constituída de água – areia BC a 5%, que constam na Figura 5.4.3.7, obteve-se a Figura 5.4.6.2.4. Tem-se em comum nessa figura: o sólido (areia BC), e a concentração (5%).

Verifica-se, na Figura 5.4.6.2.4, que o polímero a 100 ppm, praticamente não provocou redução na perda de carga, em torno de 4,2%, enquanto que para a concentração de 400 ppm nota-se uma razoável redução.

Os valores das reduções, expressas em diferenças percentuais relativas, são apresentadas na Tabela 5.4.7, onde, para o intervalo de velocidades considerados, de 0,5 a 5,0 m/s, as reduções médias, provocadas pela adição do polímero a 200, e 400 ppm, foram de 35,8; e 48,8%.

Tabela 5.4.7: Reduções expressas em diferenças percentuais relativas em função da velocidade de escoamento e da concentração do polímero.

V (m/s)	$[J5\%-J(5\%-100)].100/J5\%$	$[J5\%-J(5\%-200)].100/J5\%$	$[J5\%-J(5\%-400)].100/J5\%$
0,5	-23,8	42,7	64,6
1	0,9	28,5	56,7
1,5	17,6	19,1	48,9
2	20,5	17,8	43,7
2,5	11,9	23,0	41,9
3	-1,8	31,1	42,5
3,5	-	39,3	44,3
4	-	46,5	46,5
4,5	-	52,4	48,6
5	-	57,2	50,4
Médias	4,2	35,8	48,8

Os valores das velocidade crítica de sedimentação, velocidade crítica, respectivas perdas de carga, estão apresentadas na Tabela 5.4.8:

Na Tabela 5.4.8 são apresentados ainda, os valores das velocidades crítica de sedimentação, crítica, e respectivas perdas de carga, referentes ao escoamento de mistura de água-areia a 5%. Verificam-se, no caso das soluções de polímero a 200 ppm, redução na perda de carga de 30,1%, se considerar a velocidade crítica de sedimentação, e de 24,%, se considerar a velocidade crítica. Para a concentração de polímero a 400 ppm, tem-se redução na perda de carga de 52,7%, se considerar a velocidade crítica de sedimentação, e de 53,6%, ao considerar a velocidade crítica.

Tabela 5.4.8: Velocidades crítica de sedimentação, e crítica, (areia BC a 5%).

Cp (ppm)	Vcs (m/s)	Jcs (m/m)	Vc (m/s)	Jc (m/m)
0	1,96	0,0531	1,53	0,0526
100	1,80	0,0418	1,65	0,0440
200	1,80	0,0371	1,20	0,0400
400	1,52	0,0251	2,36	0,0244

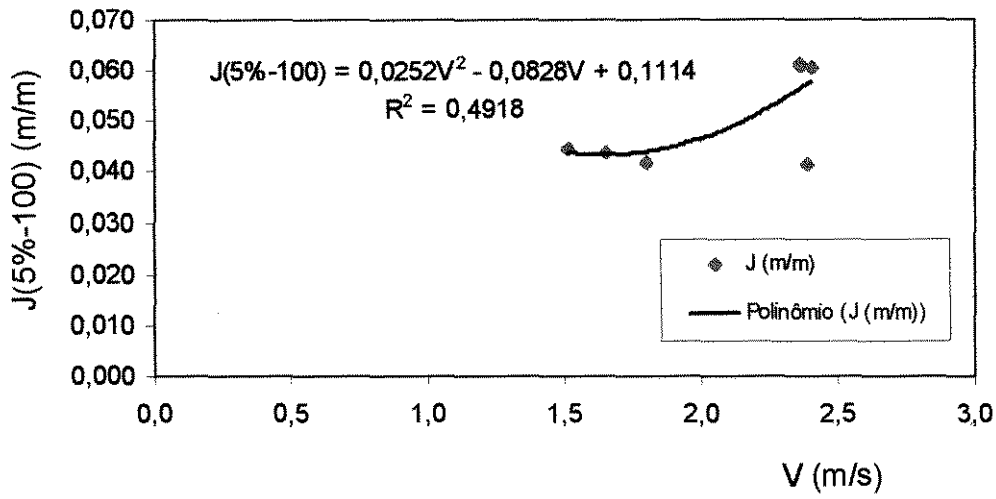


Figura 5.4.6.2.1: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 5%), e polímero, (conc.. de 100 ppm).

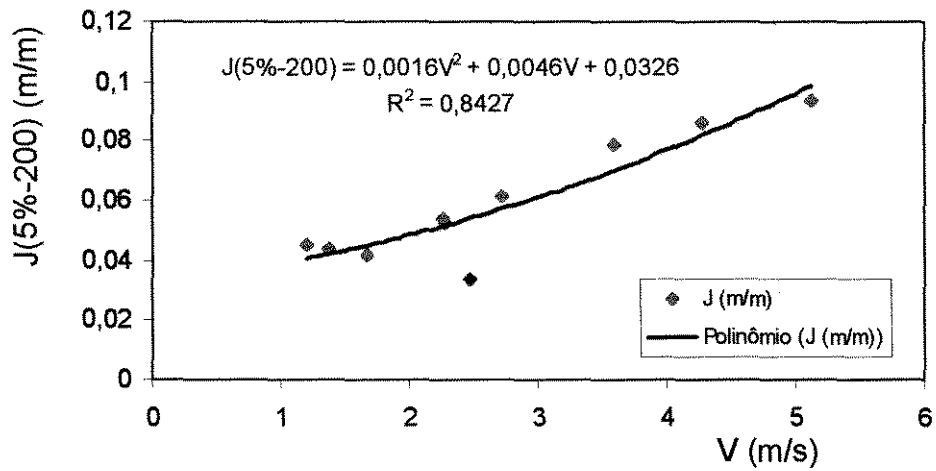


Figura 5.4.6.2.2: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 5%), e polímero, (conc.. de 200 ppm).

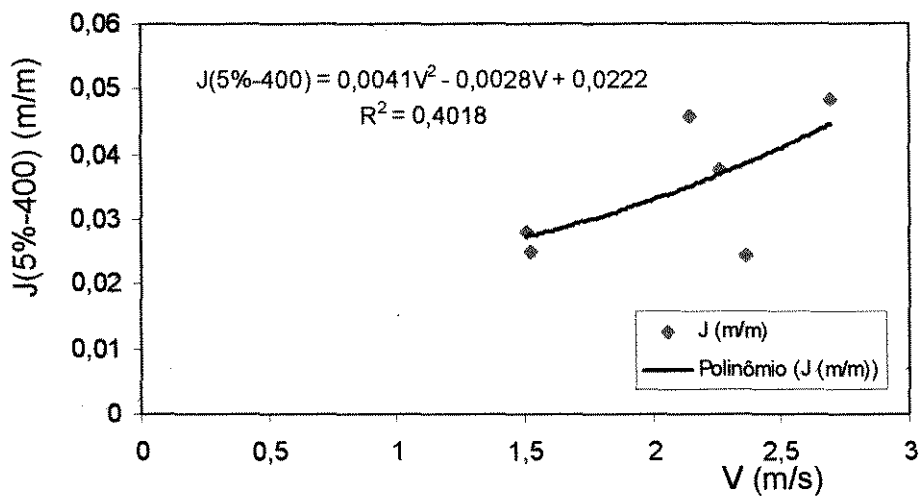


Figura 5.4.6.2.3: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 5%), e polímero, (conc.. de 400 ppm).

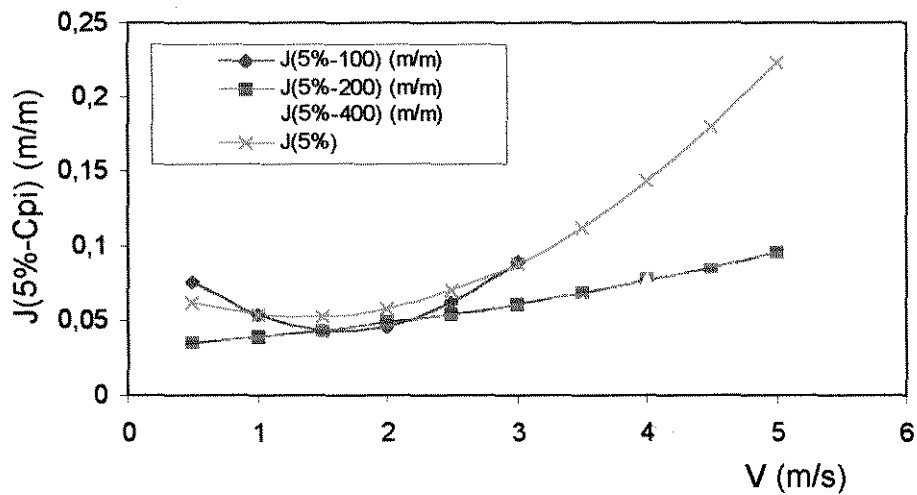


Figura 5.4.6.2.4: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 5%), e polímero, (concentração de 0, 100, 200, e 400 ppm).

5.4.6.3 – Concentrações: areia BC a 10%, e polímero a 100ppm, 200 e 400ppm.

Os pontos que relacionam a perda de carga unitária e a velocidade média do escoamento, para 10% de areia BC em 100 ppm, 200 ppm e 400 ppm, foram colocados nos gráficos das Figuras 5.4.6.3.1, 5.4.6.3.2, 5.4.6.3.3. Esses pontos foram ajustados resultando as seguintes equações:

$$J(10\%-100) = 0,0044.V^2 - 0,0002.V + 0,0526 \quad (5.4.20)$$

$$C_c = 0,98$$

Na qual: J (m/m); $C=10\%$; $C_p=100\text{ppm}$; V (m/s).

$$J(10\%-200) = 0,0103.V^2 - 0,0322.V + 0,0858 \quad (5.4.21)$$

$$Cc=0,94$$

Na qual: J (m/m); C=10%; Cp=200ppm; V (m/s).

$$J(10\%-400) = 0,0039.V^2 - 0,0051.V + 0,0507 \quad (5.4.22)$$

$$Cc=0,97$$

Na qual: J (m/m); C=10%; Cp=400ppm; V (m/s).

A partir das equações (5.4.20), (5.4.21), e (5.4.22), e da equação de perda de carga, referente ao escoamento de mistura constituída de água – areia BC a 10%, que constam na Figura 5.4.3.7, obteve-se a Figura 5.4.6.3.4. Tem-se em comum nessa figura: o sólido (areia BC), e a concentração (10%).

Verifica-se, na Figura 5.4.6.3.4, que as reduções provocadas pelas soluções de polímero a 100 ppm e 200 praticamente são as mesmas, havendo razoável redução para a concentração de 400 ppm.

Os valores das reduções, expressas em diferenças percentuais relativas, são apresentadas na Tabela 5.4.9, onde, para o intervalo de velocidades considerados, de 0,5 a 5,0 m/s, as reduções médias, provocadas pela adição do polímero são as seguintes: a 100 ppm, 10,4%; a 200 ppm, 9,1%; e a 400 ppm, 28,1%.

Tabela 5.4.9: Reduções expressas em diferenças percentuais relativas em função da velocidade de escoamento e da concentração do polímero.

V (m/s)	$[J_{10\%}-J(10\%-100)], 100/J_{10\%}$	$[J_{10\%}-J(10\%-200)], 100/J_{10\%}$	$[J_{10\%}-J(10\%-400)], 100/J_{10\%}$
0,5	18,7	-9,7	25,4
1	6,7	-4,9	18,7
1,5	-1,2	1,3	15,7
2	-3,3	7,4	17,0
2,5	-0,4	12,1	21,4
3	5,1	15,2	27,0
3,5	11,4	16,8	32,4
4	17,3	17,5	37,2
4,5	22,5	17,7	41,3
5	26,9	17,6	44,5
Médias	10,4	9,1	28,1

Os valores das velocidade crítica de sedimentação, velocidade crítica, respectivas perdas de carga, estão apresentadas na Tabela 5.4.10:

Na Tabela 5.4.10 são apresentados ainda, os valores das velocidades crítica de sedimentação, crítica, e respectivas perdas de carga, referentes ao escoamento de mistura de água-areia a 10%. Verificam-se, no caso das soluções de polímero a 100 ppm, redução na perda de carga de 1,5 %, se considerar a velocidade crítica de sedimentação, e de 8,0 %, se considerar a velocidade crítica. Para a concentração de polímero a 200 ppm, tem-se redução na perda de carga de 5,6 %, se considerar a velocidade crítica de sedimentação, e de 8,0 %, ao considera a velocidade crítica. Para a concentração de polímero a 400 ppm, tem-se redução na perda de carga de 22,6 %, se considerar a velocidade crítica de sedimentação, e de 21,8 %, ao considera a velocidade crítica.

Tabela 5.4.10: Velocidades crítica de sedimentação, e crítica, (areia BC a 10%).

Cp (ppm)	Vcs (m/s)	Jcs (m/m)	Vc (m/s)	Jc (m/m)
0	2,09	0,0655	1,67	0,0652
100	2,00	0,0645	1,50	0,0600
200	1,95	0,0618	1,60	0,0600
400	1,94	0,0507	1,40	0,0510

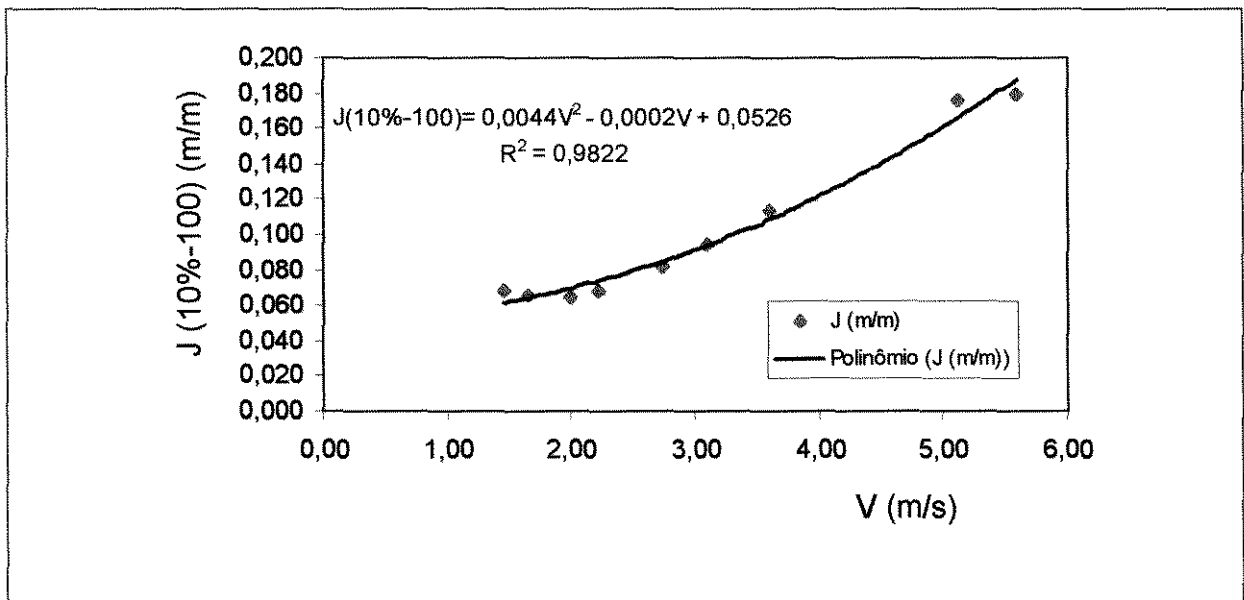


Figura 5.4.6.3.1: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 10%), e polímero, (conc.. de 100 ppm).

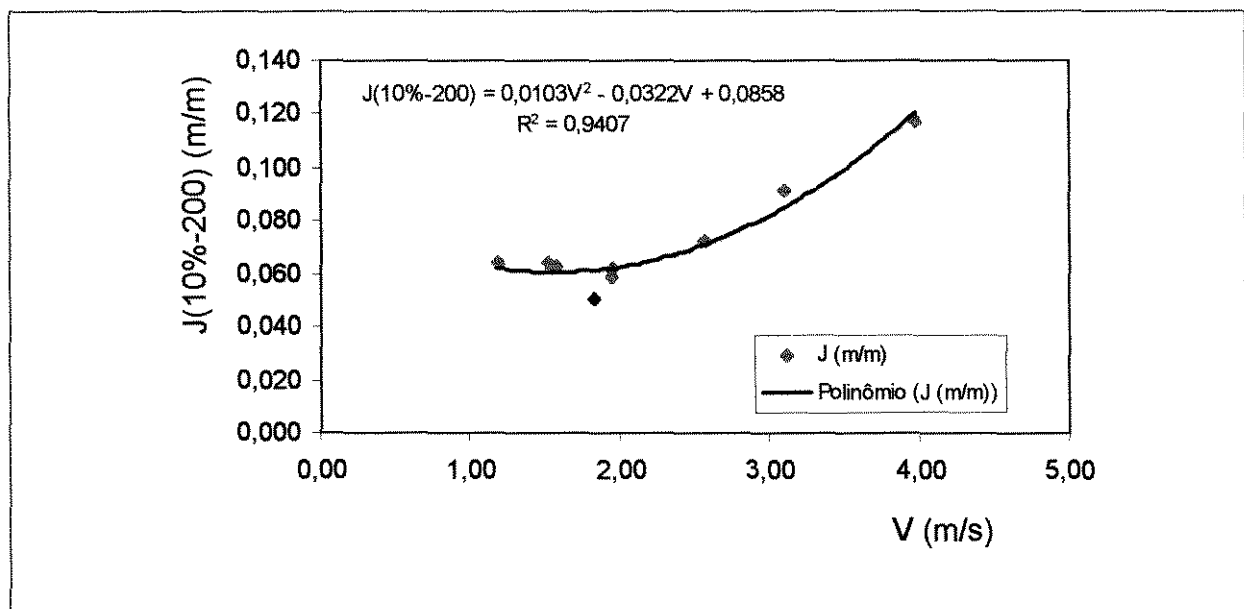


Figura 5.4.6.3.2: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 10%), e polímero, (conc.. de 200 ppm).

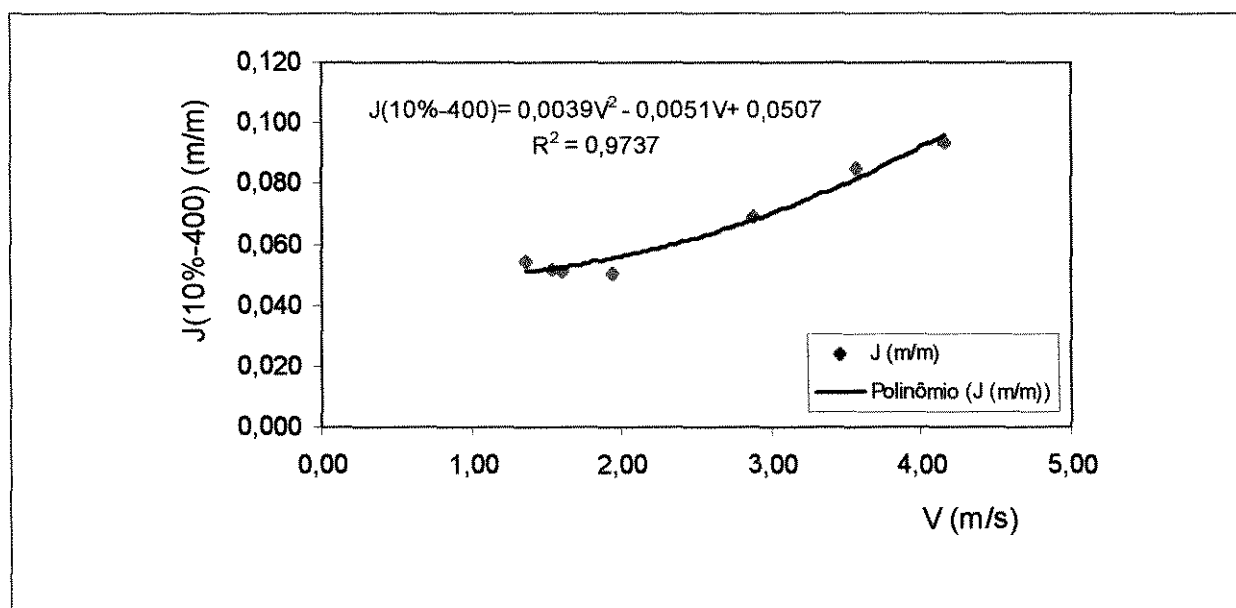


Figura 5.4.6.3.3: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 10%), e polímero, (conc.. de 400 ppm).

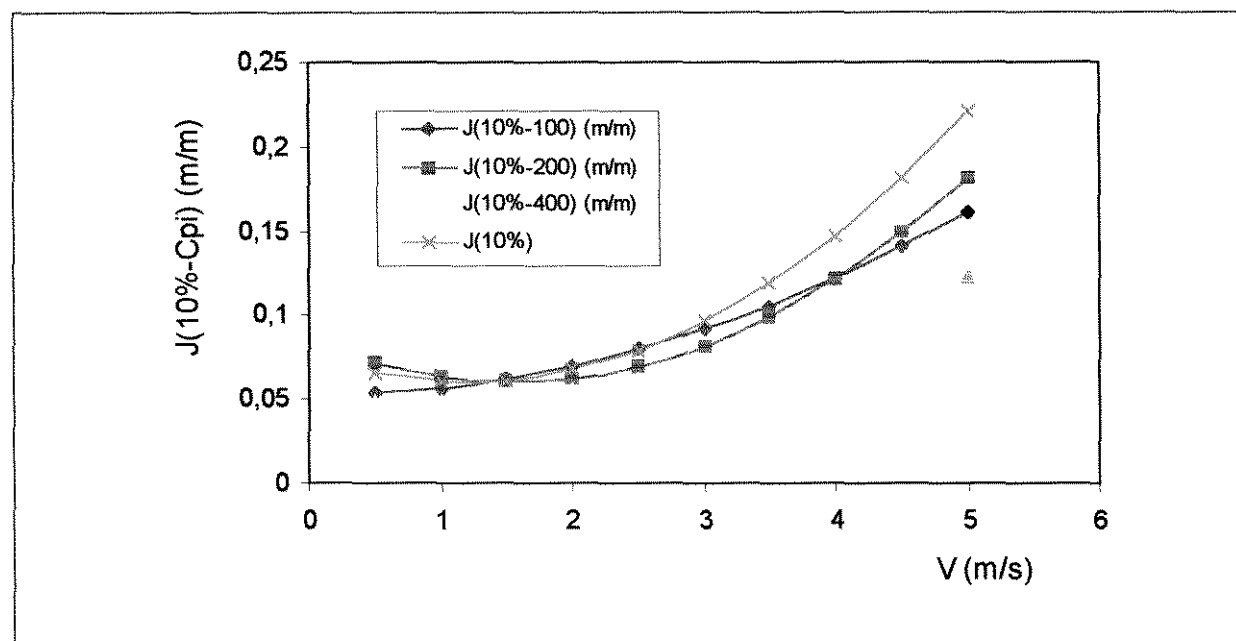


Figura 5.4.6.3.4: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 10%), e polímero, (concentração de 0, 100, 200, e 400 ppm).

5.4.6.4 – Concentrações: areia a 15%, e polímero a 100ppm, 200 e 400ppm.

Os pontos que relacionam a perda de carga unitária e a velocidade média do escoamento, para 15% de areia BC em 100 ppm, 200 ppm e 400 ppm, foram colocados nos gráficos das Figuras 5.4.6.4.1, 5.4.6.4.2, 5.4.6.4.3. Esses pontos foram ajustados resultando as seguintes equações:

$$J(15\%-100) = 0,0069.V^2 - 0,0089.V + 0,0652 \quad (5.4.23)$$

$$C_c=0,99$$

Na qual: J (m/m); C=15%; Cp=100ppm; V (m/s).

$$J(15\%-200) = 0,0073.V^2 - 0,0022.V + 0,042 \quad (5.4.24)$$

$$C_c=0,99$$

Na qual: J (m/m); C=15%; Cp=200ppm; V (m/s).

$$J(15\%-400) = -0,0002.V^2 + 0,0226.V + 0,0254 \quad (5.4.25)$$

$$C_c=0,99$$

Na qual: J (m/m); C=15%; Cp=400ppm; V (m/s).

A partir das equações (5.4.23), (5.4.24), e (5.4.25), e da equação de perda de carga, referente ao escoamento de mistura constituída de água – areia BC a 15%, que constam na Figura 5.4.3.7, obteve-se a Figura 5.4.6.4.4. Tem-se em comum nessa figura: o sólido (areia BC), e a concentração (15%).

Verifica-se, na Figura 5.4.6.4.4, que as reduções maiores, devido a adição do polímero independente da sua concentração, ocorrem para velocidades mais baixas, no escoamento heterogêneo com leito estacionário, ou mais elevadas com tendência ao regime de escoamento homogêneo. Os valores das reduções, expressas em diferenças percentuais relativas, são apresentadas na Tabela 5.4.11, onde, para o intervalo de velocidades considerados, de 0,5 a 5,0

m/s, as reduções médias, provocadas pela adição do polímero são as seguintes: a 100 ppm, 14,0%; a 200 ppm, 18,3%; e a 400 ppm, 29,4%.

Tabela 5.4.11: Reduções expressas em diferenças percentuais relativas em função da velocidade de escoamento e da concentração do polímero.

V (m/s)	$[J_{15\%}-J(15\%-100)].100/J_{15\%}$	$[J_{15\%}-J(15\%-200)].100/J_{15\%}$	$[J_{15\%}-J(15\%-400)].100/J_{15\%}$
0,5	34,8	55,4	61,7
1	24,0	43,4	42,5
1,5	13,3	29,1	24,3
2	5,7	16,0	12,2
2,5	2,7	7,2	8,8
3	3,9	3,4	12,7
3,5	7,4	3,4	20,3
4	11,7	5,4	29,0
4,5	16,1	8,4	37,4
5	20,0	11,6	44,7
Médias	14,0	18,3	29,4

Os valores das velocidade crítica de sedimentação, velocidade crítica, e respectivas perdas de carga, estão apresentadas na Tabela 5.4.12:

Na Tabela 5.4.12 são apresentados ainda, os valores das velocidades crítica de sedimentação, crítica, e respectivas perdas de carga, referentes ao escoamento de mistura de água-areia a 15%. Verificam-se, no caso das soluções de polímero a 100 ppm, redução na perda de carga de 7,8 %, se considerar a velocidade crítica de sedimentação, e de 4,2% ao considerar a velocidade crítica. Para as concentrações de polímero a 200 ppm, e 400 ppm tem-se a redução na perda de carga de 19,2%, se considerar a velocidade crítica.

Tabela 5.4.12: Velocidades crítica de sedimentação, e crítica, (areia BC a 15%).

Cp (ppm)	Vcs (m/s)	Jcs (m/m)	Vc (m/s)	Jc (m/m)
0	2,17	0,0728	1,75	0,073
100	2,00	0,0709	1,40	0,070
200	-	-	1,67	0,059
400	-	-	1,40	0,059

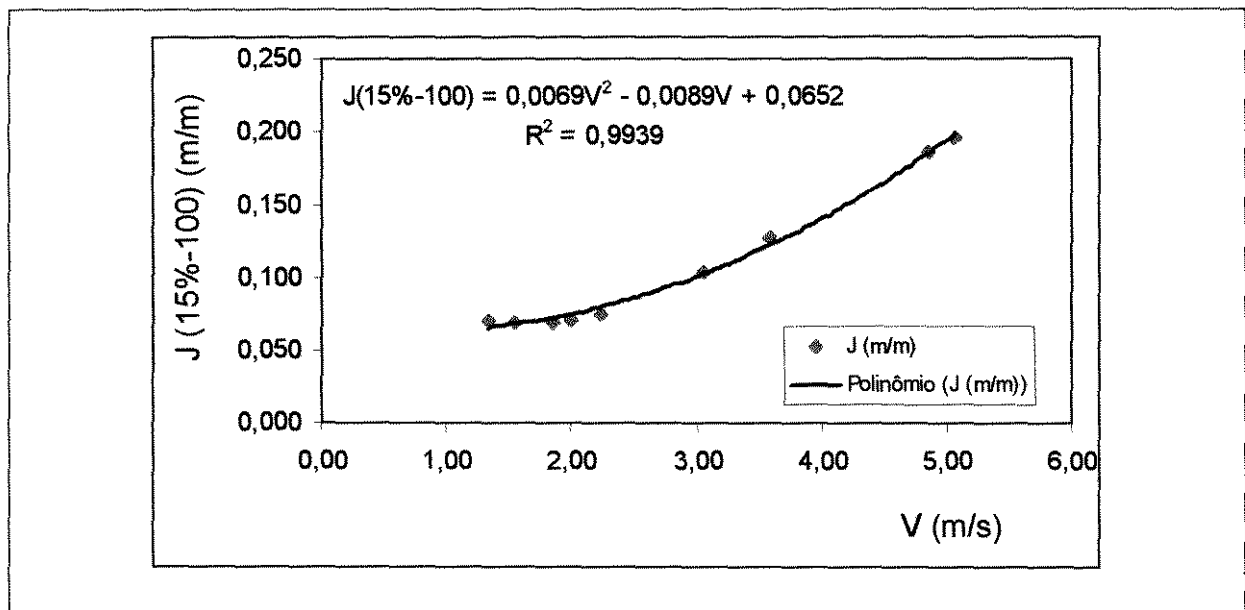


Figura 5.4.6.4.1: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 15%), e polímero, (conc.. de 100 ppm).

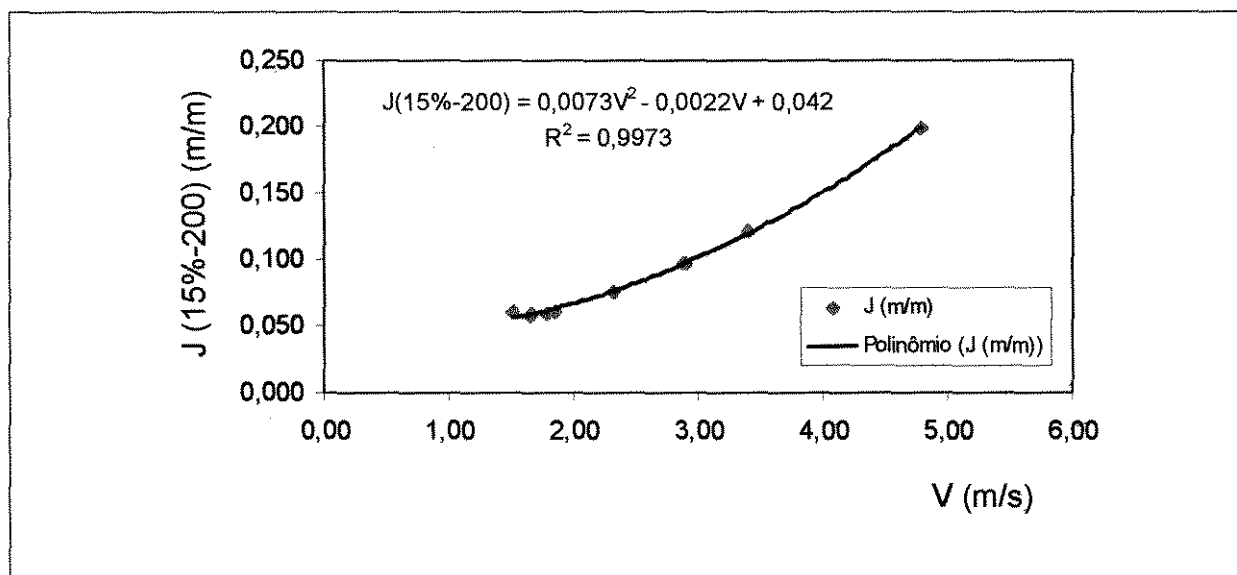


Figura 5.4.6.4.2: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 15%), e polímero, (conc.. de 200 ppm).

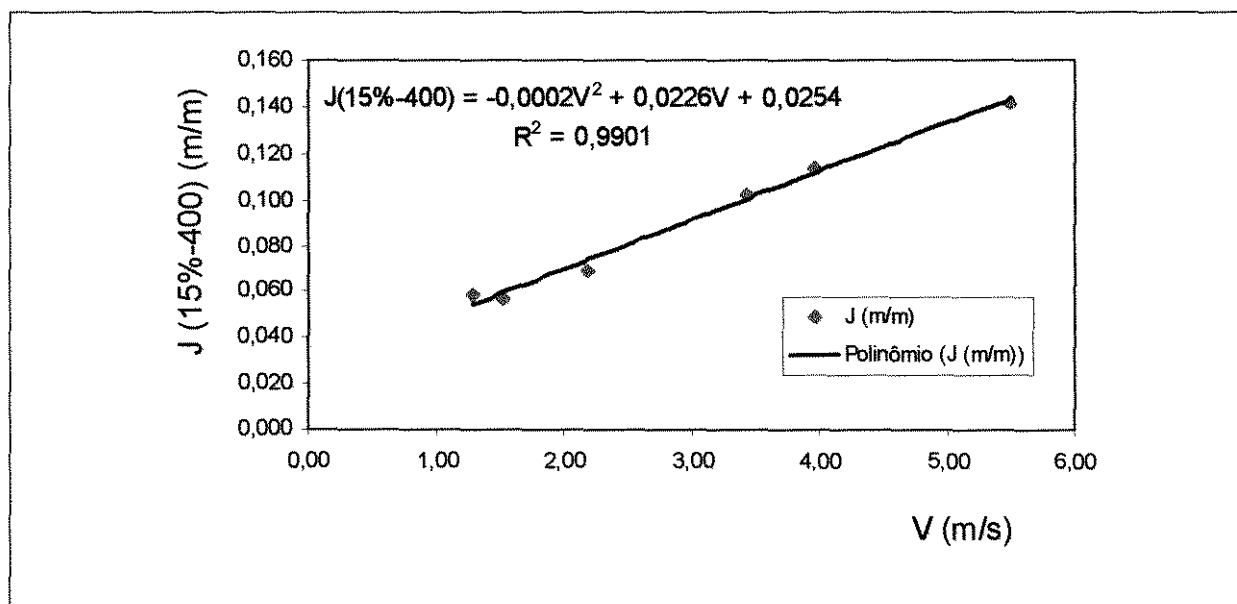


Figura 5.4.6.4.3: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 15%), e polímero, (conc.. de 400 ppm).

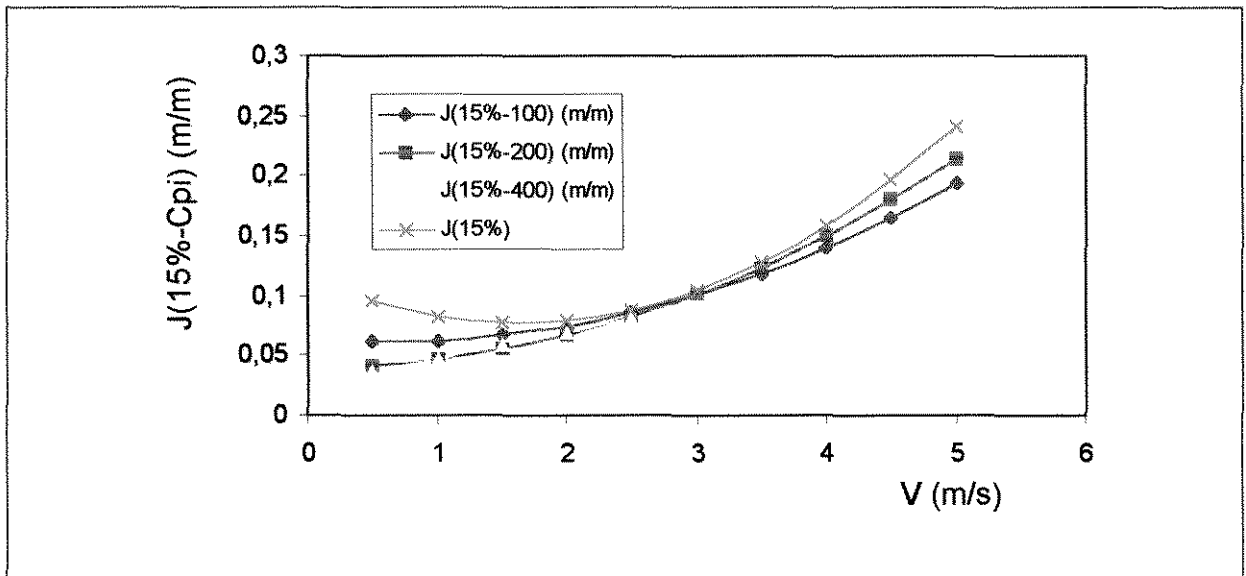


Figura 5.4.6.4.4: Perda de carga unitária em função da velocidade de escoamento de soluções constituídas pela areia BC, (concentração de 15%), e polímero, (concentração de 0, 100, 200, e 400 ppm).

5.4.6.5 – Concentrações: areia a 7,2% e 14%, e polímero a 1.200ppm.

Com o propósito de se verificar a influencia da concentração do sólido no escoamento de soluções bifásicas foram ensaiadas misturas de água e areia de concentrações iguais 7,2% e 14%.

Nas Figuras 5.4.6.5.1 e 5.4.6.5.2, apresentam-se os pontos que relacionam a perda de carga e a velocidade média do escoamento de misturas de concentrações 7,2% e 14%. Os pontos foram ajustados resultando as seguintes equações:

$$J(7,2\%) = 0,0097.V^2 - 0,0241.V + 0,0696 \quad (5.4.26)$$

$$C_c = 0,99$$

Na qual: J (m/m); $C = 7,2\%$; V (m/s).

$$J(14\%) = 0,0102.V^2 - 0,0293.V + 0,1007 \quad (5.4.27)$$

$$C_c = 0,99$$

Na qual: J (m/m); C=14%; V (m/s).

A partir das equações (5.4.26), e (5.4.27) foram gerados os gráficos da Figura 5.4.6.5.3, onde as perdas de carga estão confrontadas. Verifica-se que para uma mesma velocidade a perda de carga aumenta ao se elevar a concentração do sólido. O aumento médio da perda de carga, ao praticamente dobrar a concentração de 7,2% para 14%, para a faixa de velocidades de 0,5 m/s à 5,0 m/s, foi de 21,2%, conforme pode ser visto da Tabela 5.4.13.

Na Figuras 5.4.6.5.4 e 5.4.6.5.5, respectivamente, apresentam as mesmas situações das 5.4.6.5.1 e 5.4.6.5.2, acrescentando às misturas, polímero a 1200 ppm. Os pontos também foram ajustados resultando as seguintes equações:

$$J(7,2\%-1200) = 0,0019.V^2 - 0,0003.V + 0,0251 \quad (5.4.28)$$

$$C_c = 0,99$$

Na qual: J (m/m); C_p=1200 ppm; C=7,2%; V (m/s).

$$J(14\%-1200) = 0,0011.V^2 + 0,0137.V + 0,014 \quad (5.4.29)$$

$$C_c = 0,99$$

Na qual: J (m/m); C_p=1200 ppm; C=14%; V (m/s).

A partir das equações (5.4.28), e (5.4.29) foram obtidos os gráficos da Figura 5.4.6.5.6, onde as perdas de carga estão comparadas. O aumento médio da perda de carga, ao praticamente dobrar a concentração de areia BC de 7,2% para 14%, para a faixa de velocidades de 0,5 m/s à 5,0 m/s, e polímero a 1200 ppm foi de 25,6%, conforme pode ser visto da Tabela 5.4.13.

Os aumentos médios das perda de carga, ao dobrar a concentração do sólido na mistura, sem e com polímero, praticamente manteve-se iguais, diferindo apenas no comportamento das curvas. Sem polímero há uma convergência leve entre as duas curvas enquanto com polímero há uma divergência acentuada.

Tabela 5.4.13 : Acréscimos nas perdas de carga ao dobrar a concentração do sólido de 7,2% para 14%, com e sem polímero a 1200 ppm.

V (m/s)	$[J_{14\%}-J_{(7,2\%)-1200}].100/J_{14\%}-1200]$	$[J_{14\%}-J_{(7,2\%)}].100/J_{14\%}]$
0,5	-20,4	32,3
1	7,3	32,4
1,5	21,9	30,6
2	29,9	27,4
2,5	34,3	23,3
3	36,5	19,1
3,5	37,3	15,5
4	37,2	12,5
4,5	36,5	10,2
5	35,4	8,4
Médias=	25,6	21,2

Nas Figuras 5.4.6.5.7, e 5.4.6.5.8, apresentam-se comparações entre as perdas de carga, devido ao escoamento de misturas sem e com polímero a 1200 ppm, mantendo-se as mesmas concentrações do sólido. A Figura 5.4.6.5.7 refere-se à concentração do sólido de 7,2%, enquanto que a Figura 5.4.6.5.8 diz respeito à concentração do sólido de 14%.

Na Tabela 5.4.14 apresentam os valores das reduções da perda de carga vistas nas Figuras 5.4.6.5.7, e 5.4.6.5.8. Verificam-se reduções maiores da perda de carga, pela adição de polímero, na mistura de menor concentração do sólido. Para a faixa de velocidades de 0,5 m/s a 5 m/s, tem-se, no caso da mistura água e areia BC à 7,2% em volume da mistura, uma redução média de aproximadamente 54%, expressa em diferença percentual relativa, e para a concentração de 14%, uma redução média em torno de 49%.

Tabela 5.4.14: Reduções nas perdas de carga ao adicionar o polímero a 1200 ppm

V (m/s)	$[J_{7,2\%}-J(7,2\%-1200)].100/J_{7,2\%}$	$[J_{14\%}-J(14\%-1200)].100/J_{14\%}$
0,5	57,6	76,2
1	51,6	64,7
1,5	47,7	53,5
2	46,7	44,8
2,5	48,2	39,6
3	51,2	37,9
3,5	54,5	38,7
4	57,7	41,1
4,5	60,5	44,2
5	62,9	47,4
Médias	53,9	48,8

Para os casos do escoamento de misturas com polímero, a partir das equações obtidas por ajustes, apresentadas nas Figuras 5.4.6.5.4, e 5.4.6.5.5, obtiveram-se os valores das velocidades crítica e respectivas perdas de carga apresentadas na Tabela 5.4.15. Os valores das velocidades crítica de sedimentação, apresentados também nesta tabela, foram obtidas durante os ensaios.

Nos casos do escoamento da mistura sem polímero, as velocidades crítica de sedimentação, crítica, e respectivas perdas de carga foram calculadas através das equações apresentadas no item 5.4.3.

Tabela 5.4.15: Velocidades crítica de sedimentação, e crítica, sem e com polímero a 1200 ppm (areia BC a 7,2%, e 14%).

Cp (ppm)/Ci%	Vcs (m/s)	Jcs (m/m)	Vc (m/s)	Jc (m/m)
0 / (C=7,2%)	2,03	0,060	1,61	0,059
0 / (C=14%)	2,16	0,072	1,74	0,071
1200 / (C=7,2%)	1,42	0,022	1,30	0,028
1200 / (C=14%)	1,41	0,031	1,20	0,030

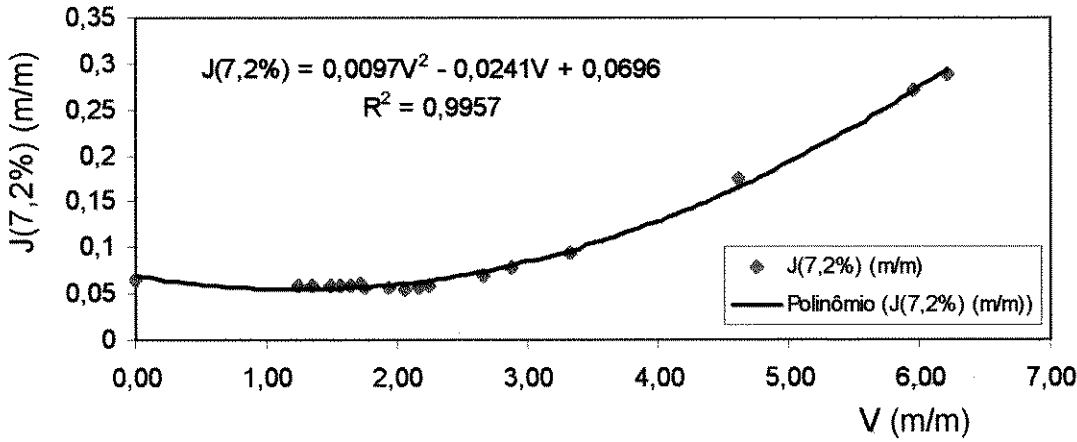


Figura 5.4.6.5.1: Perda de carga devido ao escoamento de mistura de água+areia BC de concentração igual a 7,2% em volume da mistura.

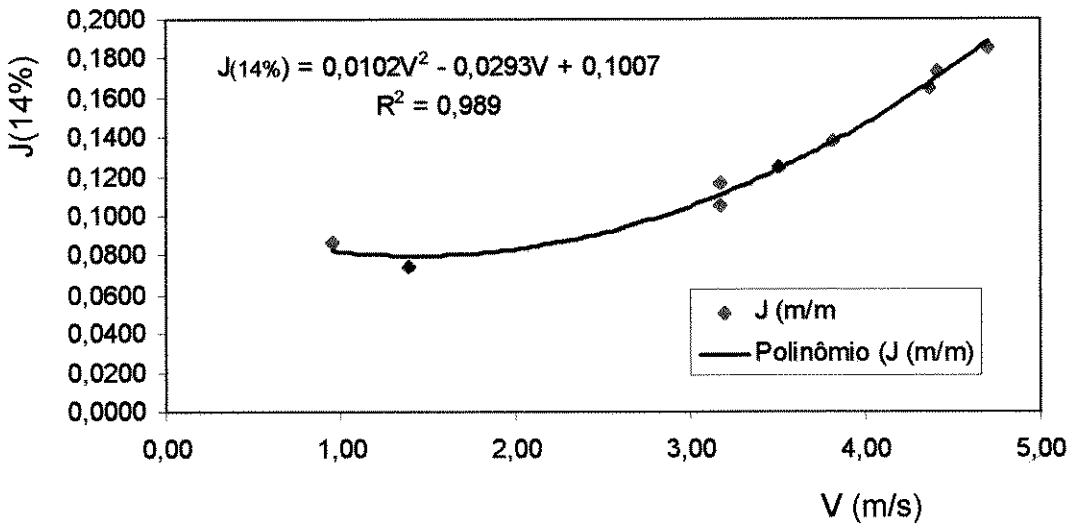


Figura 5.4.6.5.2: Perda de carga devido ao escoamento de mistura de água+areia BC de concentração igual a 14% em volume da mistura.

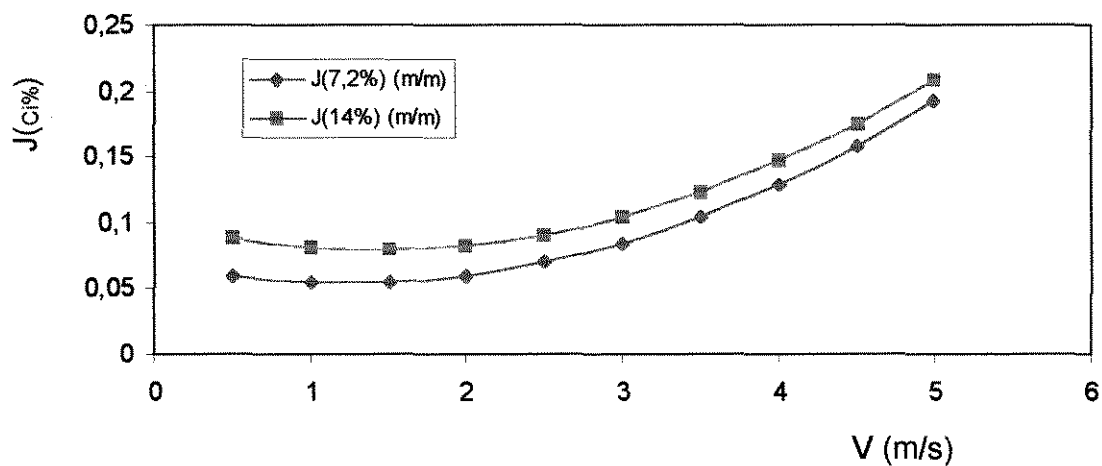


Figura 5.4.6.5.3: Comparação entre as perdas de carga devido ao escoamento de misturas de água-areia BC de concentrações 7,2%, e 14%, em volume da mistura, sem polímero.

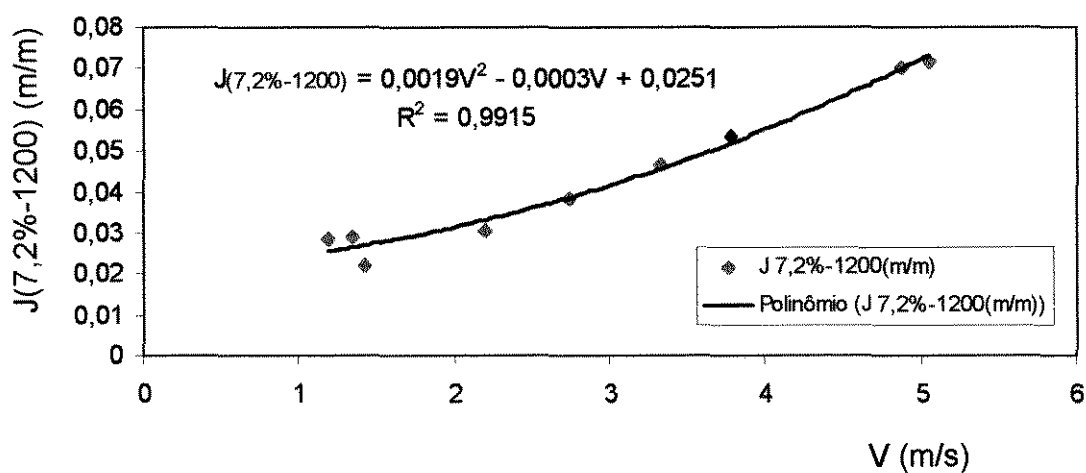


Figura 5.4.6.5.4: Perda de carga devido ao escoamento de solução de água+areia BC de concentração igual a 7,2% em volume da mistura, e polímero a 1200 ppm.

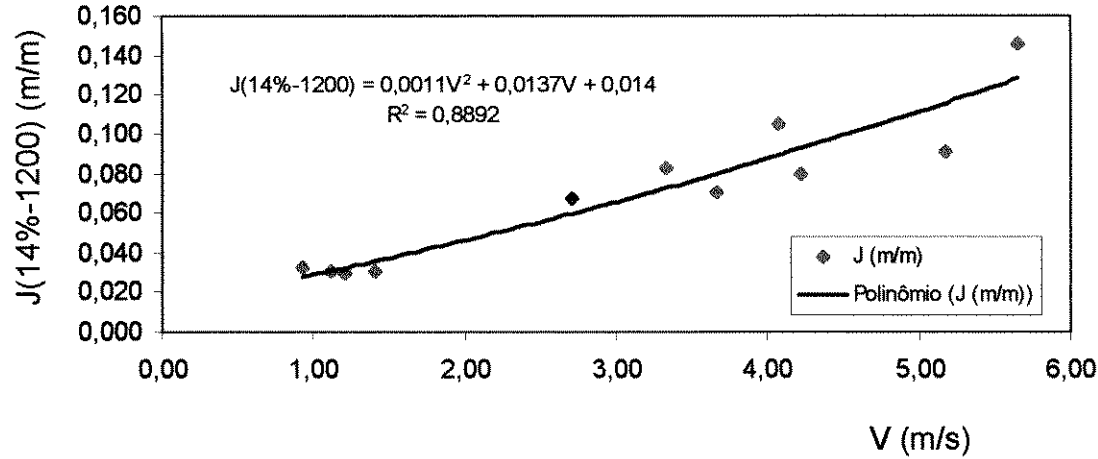


Figura 5.4.6.5.5: Perda de carga devido ao escoamento de solução de água+areia BC de concentração igual a 14% em volume da mistura, e polímero a 1200 ppm.

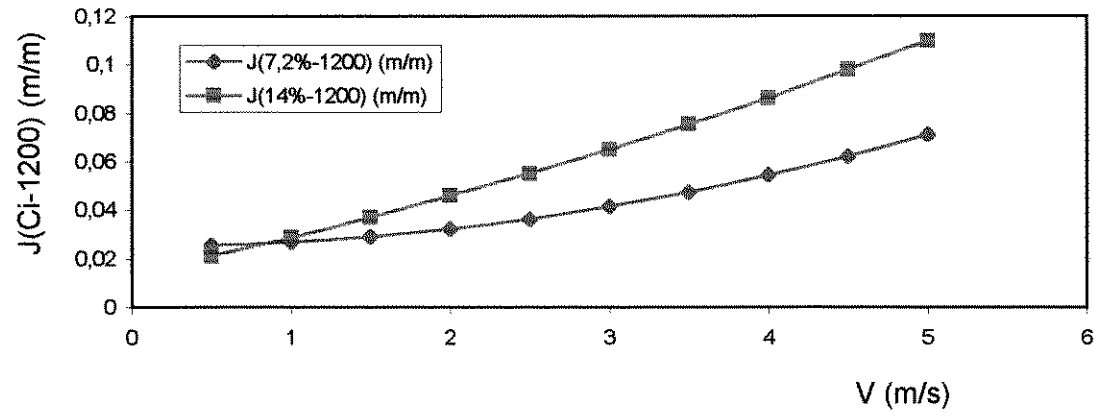


Figura 5.4.6.5.6: Comparação entre as perdas de carga devido ao escoamento de misturas de água-areia BC de concentrações 7,2%, e 14%, em volume da mistura, com polímero a 1200 ppm.

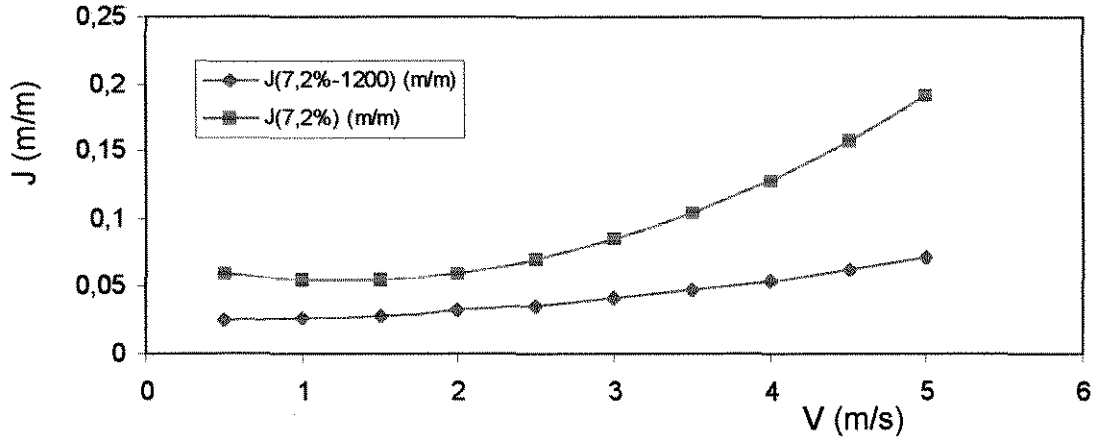


Figura 5.4.6.5.7: Comparação entre as perdas de carga devido ao escoamento de mistura de água-areia BC de concentração 7,2%, em volume da mistura, sem e com polímero a 1200ppm.

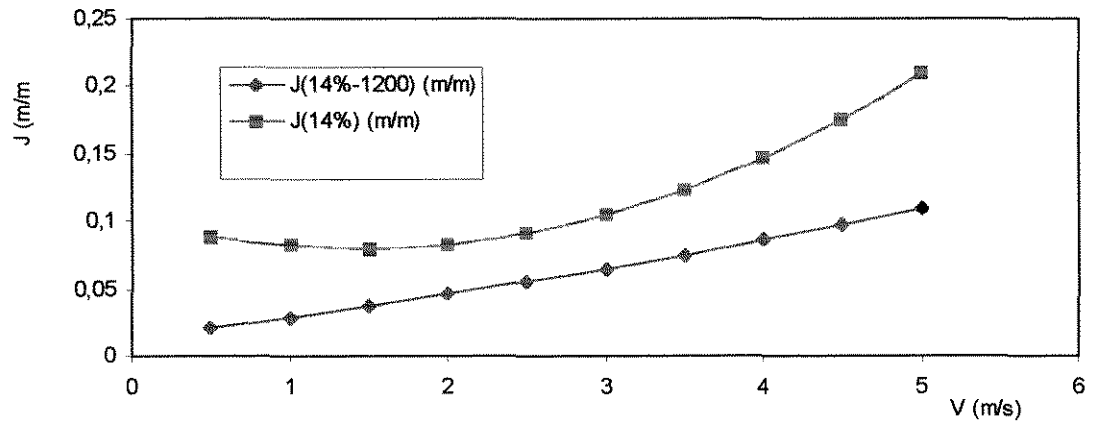


Figura 5.4.6.5.8: Comparação entre as perdas de carga devido ao escoamento de mistura de água-areia BC de concentração 14%, em volume da mistura, sem e com polímero a 1200ppm.

5.4.6.6 – Concentrações: areia a 8,1% e polímero a 600 ppm.

Nas Figuras 5.4.6.6.1 e 5.4.6.6.2 apresentam-se os pontos que relacionam a perda de carga e a velocidade média do escoamento de mistura constituída de água + areia BC de concentração 8,1% sem e com polímero adicionado na concentração de 600 ppm, respectivamente.

Os pontos foram ajustados resultando as seguintes equações:

$$J(8,1\%) = 0,0151.V^2 - 0,0527.V + 0,1052 \quad (5.4.30)$$

$$C_c = 0,98$$

Na qual: J (m/m); $C=8,1\%$; V (m/s).

$$J(8,1\%-600) = 0,0016.V^2 + 0,0077.V + 0,0213 \quad (5.4.31)$$

$$C_c = 0,79$$

Na qual: J (m/m); $C_p=600$ ppm; $C=8,1\%$; V (m/s).

A partir das equações (5.4.30) e (5.4.31) foram obtidas as curvas apresentadas na Figura 5.4.6.6.3, onde as perdas de carga do escoamento da mistura com e sem polímero são confrontadas. Verifica-se que a curva referente as perdas com polímero fica inteiramente abaixo daquela sem polímero. As reduções da perda de carga ao adicionar o polímero, expressas diferenças percentuais relativas são apresentadas na Tabela 5.4.16.

Para a faixa de velocidades de 0,5 m/s a 5,0 m/s a redução média foi de 42,4%.

Para o caso do escoamento da mistura com polímero, a partir da equação obtida por ajuste, apresentada na Figuras 5.4.6.6.2, obteve-se o valor da velocidade crítica e respectiva perda de carga, apresentada na Tabela 5.4.17. O valor da velocidade crítica de sedimentação, apresentado também nesta tabela, foi obtido durante os ensaios.

Tabela 5.4.16: Reduções nas perdas de carga ao adicionar o polímero a 600 ppm

V (m/s)	$[J_{8,1\%}-J_{(8,1\%-600)}].100/J_{8,1\%}$
0,5	69,1
1	54,7
1,5	39,1
2	27,9
2,5	24,8
3	28,4
3,5	35,1
4	42,2
4,5	48,6
5	53,9
Média=	42,4

No caso do escoamento da mistura sem polímero, as velocidades crítica de sedimentação, crítica, e respectivas perdas de carga foram calculadas através das equações apresentadas no item 5.4.3.

Tabela 5.4.17: Velocidades crítica de sedimentação, e crítica, sem e com polímero a 600 ppm (areia BC a 8,1%).

Cp (ppm)/Ci%	Vcs (m/s)	Jcs (m/m)	Vc (m/s)	Jc (m/m)
0 / (C=8,1%)	2,05	0,0620	1,30	0,061
600 / (C=8,1%)	2,21	0,0704	1,63	0,059

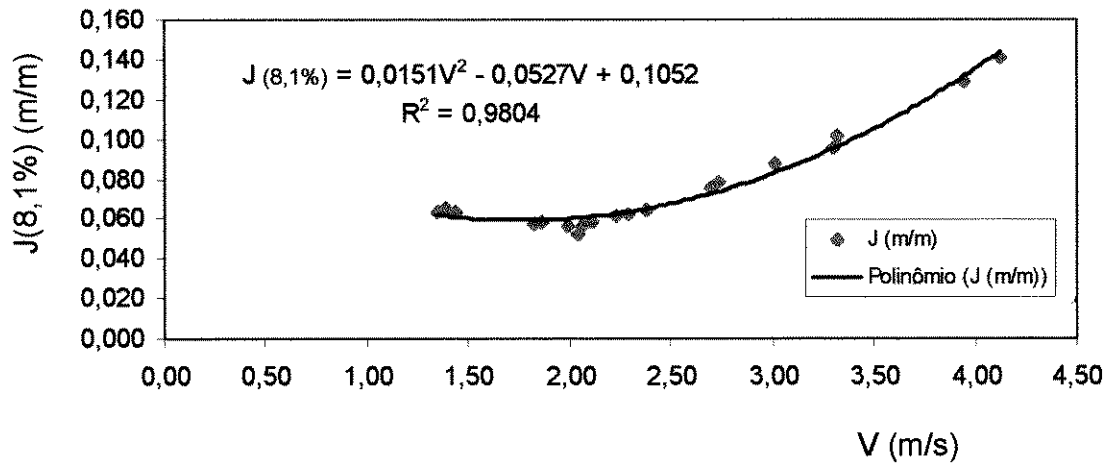


Figura 5.4.6.6.1: Perda de carga devido ao escoamento de mistura de água+areia BC de concentração igual a 8,1% em volume da mistura.

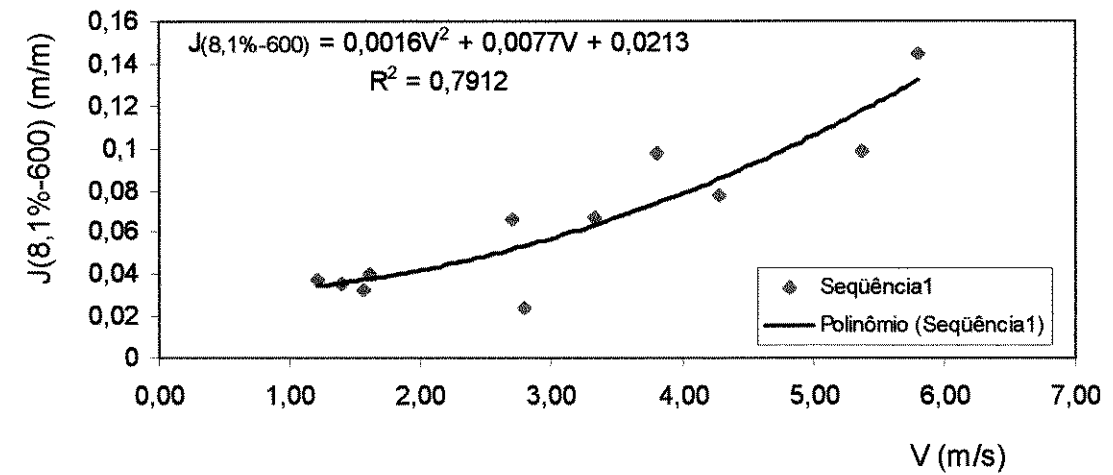


Figura 5.4.6.6.2: Perda de carga devido ao escoamento de mistura de água+areia BC de concentração igual a 8,1% em volume da mistura, com polímero a 600 ppm.

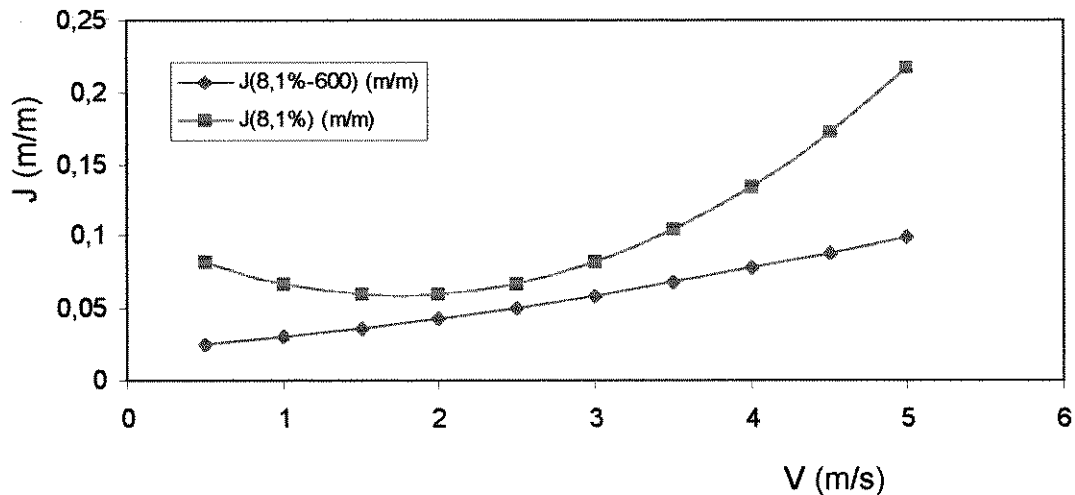


Figura 5.4.6.6.3: Comparação entre as perdas de carga devido ao escoamento de mistura de água-areia BC de concentração 8,1%, em volume da mistura, sem e com polímero a 600ppm.

5.4.6.7 – Velocidade crítica de sedimentação – escoamento de misturas com polímero.

Os valores da velocidade crítica de sedimentação e da correspondente perda de carga unitária, foram obtidos experimentalmente. Esses valores, correspondentes à várias concentrações do sólido da mistura, e a uma determinada concentração do polímero foram ajustados, e estão apresentados nas seguintes figuras: Figuras 5.4.6.7.1 e 5.4.6.7.2 para $C_p=100$ ppm; Figuras 5.4.6.7.3 e 5.4.6.7.4 para $C_p=200$ ppm; Figuras 5.4.6.7.5 e 5.4.6.7.6 para $C_p=400$ ppm. Para efeito prático, para cada caso foram obtidas duas equações, uma da velocidade crítica de sedimentação em função da concentração, e outra da perda de carga, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, em função da concentração.

As equações, obtidas por ajustes, encontram-se na Tabela 5.4.18.

Tabela 5.4.18: Equações da velocidade crítica de sedimentação e da correspondente perda de carga em função da concentração do sólido da mistura para diferentes concentrações de polímero.

Cp (ppm)	Equação	Cc
100	$V_{cs}(100\text{ppm}) = 0,202 \cdot \text{Ln.}(C\%) + 1,4995$	0,88
	$J_{cs}(100\text{ppm}) = 0,0246 \cdot (C\%)^{0,3882}$	0,98
200	$V_{cs}(200\text{ppm}) = 0,2311 \cdot \text{Ln.}(C\%) + 1,4642$	0,92
	$J_{cs}(200\text{ppm}) = 0,0238 \cdot (C\%)^{0,3728}$	0,96
400	$V_{cs}(400\text{ppm}) = 0,2309 \cdot \text{Ln.}(C\%) + 1,3877$	0,98
	$J_{cs}(400\text{ppm}) = 0,0189 \cdot (C\%)^{0,4254}$	0,99

Nota-se que a velocidade crítica de sedimentação resulta bons ajustes do tipo logarítmico:

$$V_{cs} = A \cdot \text{Ln.}(C\%) + B \quad (5.4.32)$$

Na qual C = concentração do sólido da mistura em volume.

Os valores dos coeficientes A e B, foram ajustados em função da concentração do polímero, obtendo as seguintes equações:

$$A = -10^{-6} \cdot C_p^2 + 0,0006 \cdot C_p + 0,1534 \quad (5.4.33)$$

$$C_c = 1,0$$

$$B = 4.10^{-7}.Cp^2 - 0,0005.Cp + 1,543 \quad (5.4.34)$$

$$Cc = 1,0$$

Nas quais: Cp (ppm).

Substituindo as equações (5.4.33) e (5.4.34) na equação (5.4.32) tem-se:

$$Vcs = (-10^{-6}.Cp^2 + 0,0006.Cp + 0,1534) . \text{Ln.}(C\%) + 4.10^{-7}.Cp^2 - 0,0005.Cp + 1,543 \quad (5.4.35)$$

Na qual: Cp=concentração do polímero em ppm; C=concentração em porcentagem do sólido na mistura.

Nas Figuras (5.4.6.7.1), (5.4.6.7.3), e (5.4.6.7.5) apresenta-se também a equação (5.4.35), onde se verificam excelentes coincidências com as curvas logarítmica ajustadas aos pontos.

Na Figura 5.4.6.7.7 apresentam-se as curvas da velocidade crítica de sedimentação obtidas pela equação (5.4.35), para as concentrações de 600 ppm e 800 ppm. Mostram-se também pontos, obtidos experimentalmente para estas concentrações de polímero.

Para o caso do polímero a 800 ppm, a concentração do sólido na mistura foi de 12,3%, e a velocidade de sedimentação obtida experimentalmente foi 1,51 m/s. A correspondente velocidade crítica de sedimentação calculada com a equação (5.4.35) vale 1,38 m/s, valor este 8,0 % inferior ao obtido experimentalmente.

Para o caso do polímero a 600 ppm, a concentração do sólido na mistura foi de 8%, e a velocidade de sedimentação obtida experimentalmente foi 1,57 m/s. A correspondente velocidade crítica de sedimentação calculada com a equação (5.4.35) vale 1,70 m/s, valor este 8,2% superior ao obtido experimentalmente. Os erros nestes casos devem-se à extrapolação dos dados porque as equações foram deduzidas para 100, 200 e 400 ppm e neste caso está se extrapolando conclusões para 600 e 800 ppm.

Na Figura 5.4.6.7.8 apresentam-se a família de curvas obtidas com a equação (5.4.35) para as concentrações do polímero iguais a 100, 200, 400, 600, e 800 ppm. Verifica-se que para as concentrações até 400 ppm as curvas praticamente são coincidentes. Para as concentrações do polímero maiores, mantida a mesma concentração do sólido, a velocidade crítica de sedimentação sofre reduções ao aumentar a concentração do polímero.

Apresentam-se ainda na Figura 5.4.6.7.8 todos os pontos obtidos experimentalmente. Nota-se que os pontos ajustam-se muito bem à equação (5.4.35), principalmente para as concentrações de polímero de 100, 200, e 400 ppm.

Em relação à perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, observa-se na Tabela 5.4.18, bons ajustes à equação do tipo potência:

$$J_{cs} = A^* \cdot (C\%)^{B^*} \quad (5.4.36)$$

Na qual C = concentração do sólido da mistura em volume.

Os valores do coeficiente A^* e do expoente B^* , foram ajustados em função da concentração do polímero, obtendo as seguintes equações:

$$A^* = -6.10^{-8}.C_p^2 + 9.10^{-6}.C_p + 0,0243 \quad (5.4.37)$$

$$C_c = 1,0$$

$$B^* = 1.10^{-6}.C_p^2 - 0,0006.C_p + 0,45 \quad (5.4.38)$$

$$C_c = 1,0$$

Nas quais: C_p (ppm).

Substituindo as equações (5.4.37) e (5.4.38) na equação (4.36) tem-se:

$$J_{cs} = (-6.10^{-8}.C_p^2 + 9.10^{-6}.C_p + 0,0243) \cdot (C\%)^{(-0,000001.C_p.C_p - 0,0006.C_p + 0,45)}$$

(5.4.39)

Na qual: Cp=concentração do polímero em ppm; C=concentração em porcentagem do sólido na mistura.

Nas Figuras (5.4.6.7.2), (5.4.6.7.4), e (5.4.6.7.6) apresenta-se também a equação (5.4.39), onde se verificam boas coincidências com as curvas ajustadas por potência aos dados experimentais.

Na Figura (5.4.6.7.9) apresentam-se a família de curvas obtidas com a equação (5.4.39) e todos os valores da perda de carga unitária, referente à velocidade crítica de sedimentação, determinados experimentalmente.

Verifica-se, que para uma determinada concentração do sólido da mistura, a perda de carga unitária diminui ao aumentar a concentração do polímero.

Os pontos determinados experimentalmente ajustam-se bem à equação (5.4.39), principalmente aqueles referentes às concentrações do polímero de 100, 200, e 400 ppm, devido à própria dedução da equação e pelo excelente coeficiente de correlação.

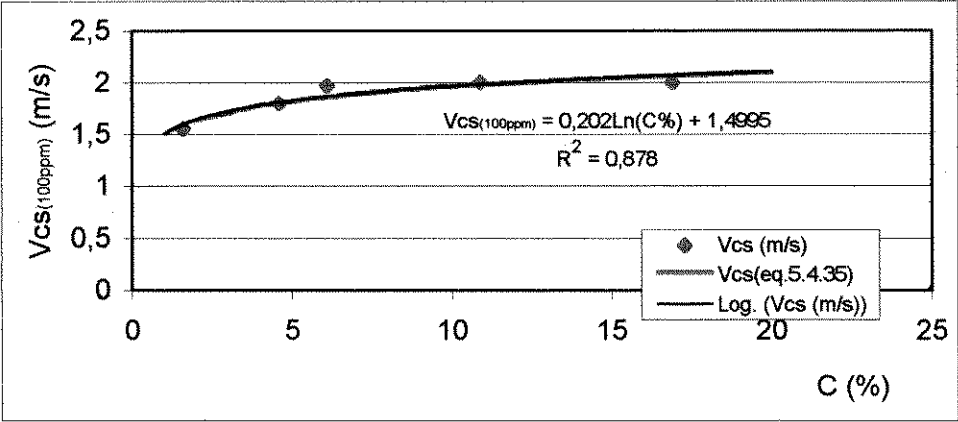


Figura 5.4.6.7.1: Velocidade crítica de sedimentação em função da concentração do sólido da mistura para a concentração do polímero de 100 ppm.

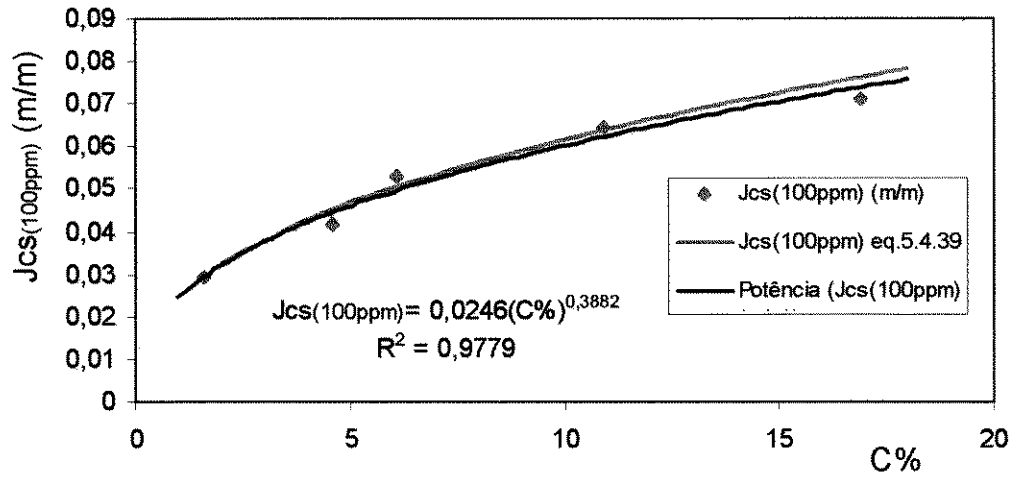


Figura 5.4.6.7.2: Perda de carga, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, em função da concentração do sólido da mistura para a concentração do polímero de 100 ppm.

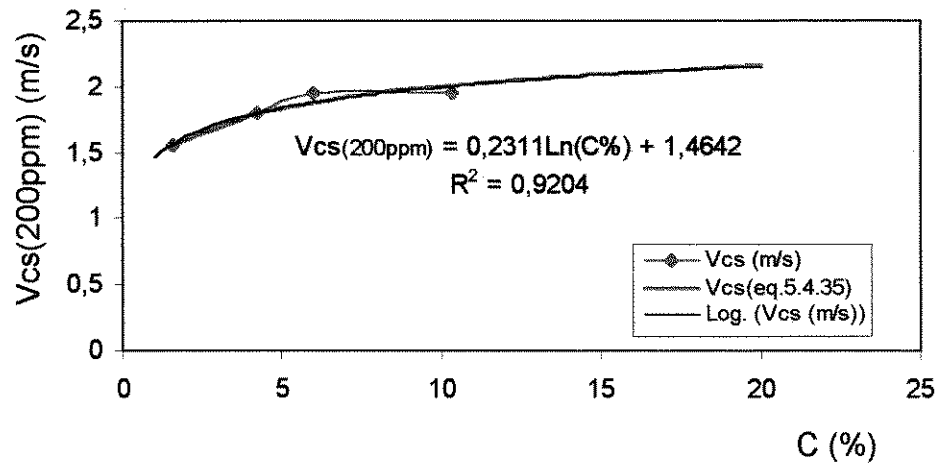


Figura 5.4.6.7.3: Velocidade crítica de sedimentação em função da concentração do sólido da mistura para a concentração do polímero de 200 ppm.

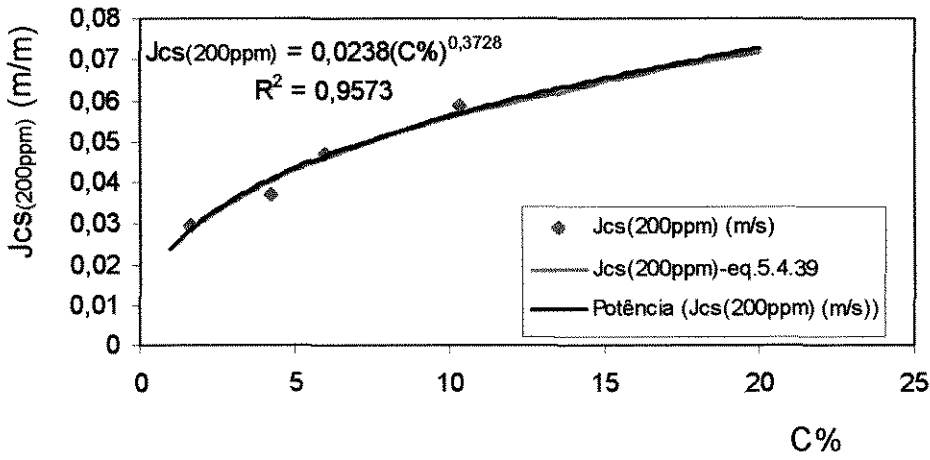


Figura 5.4.6.7.4: Perda de carga, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, em função da concentração do sólido da mistura para a concentração do polímero de 200 ppm.

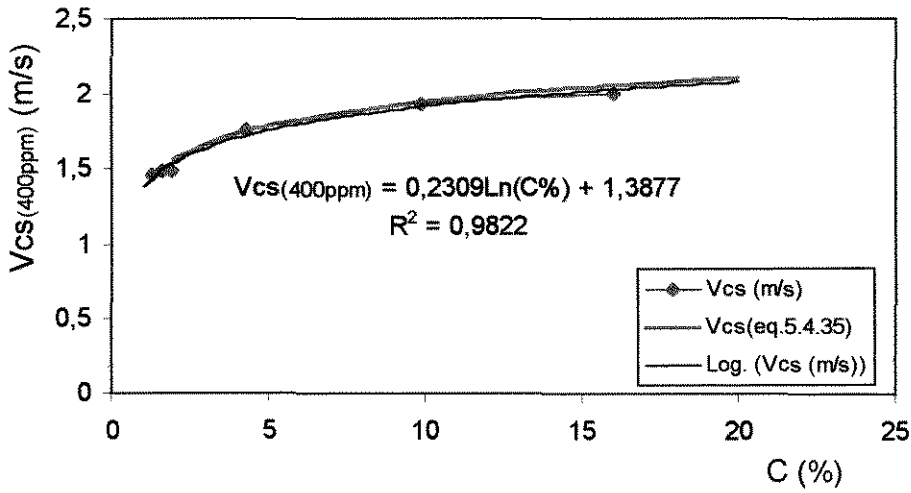


Figura 5.4.6.7.5: Velocidade crítica de sedimentação em função da concentração do sólido da mistura para a concentração do polímero de 400 ppm.

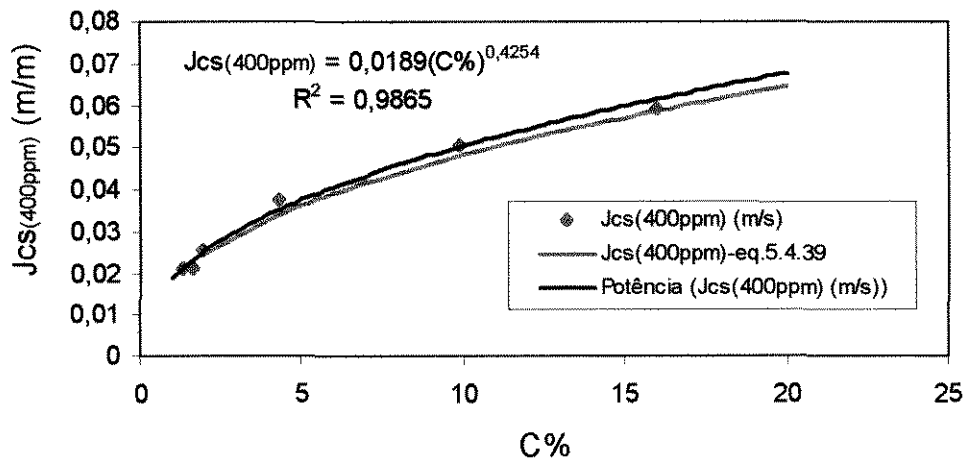


Figura 5.4.6.7.6: Perda de carga, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, em função da concentração do sólido da mistura para a concentração do polímero de 400 ppm.

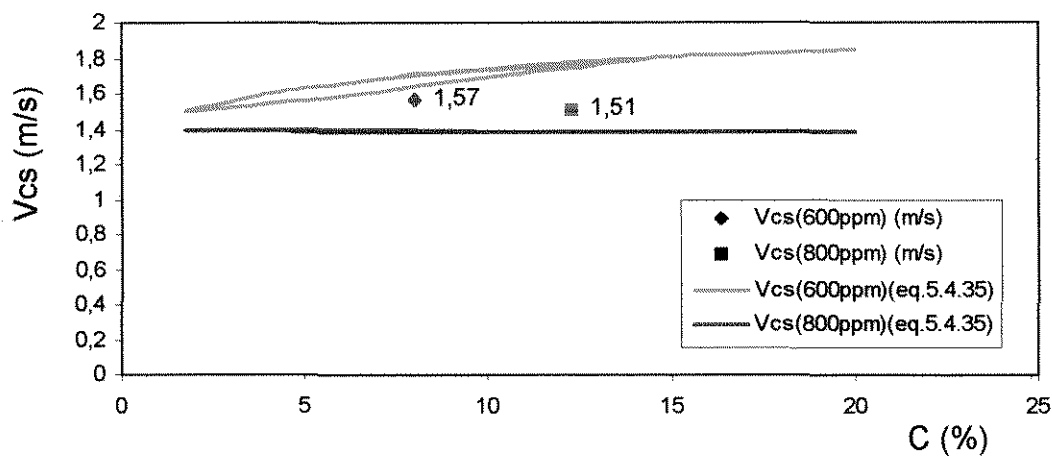


Figura 5.4.6.7.7: Velocidade crítica de sedimentação em função da concentração do sólido da mistura para as concentrações do polímero de 600, e 800 ppm.

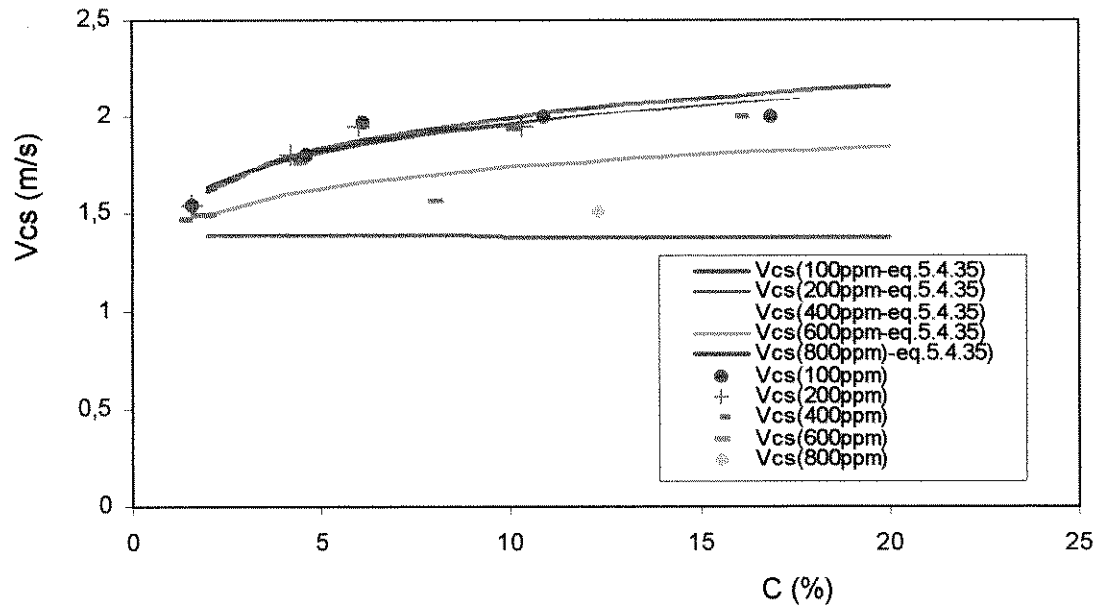


Figura 5.4.6.7.8: Velocidade crítica de sedimentação em função das concentrações do sólido da mistura e do polímero.

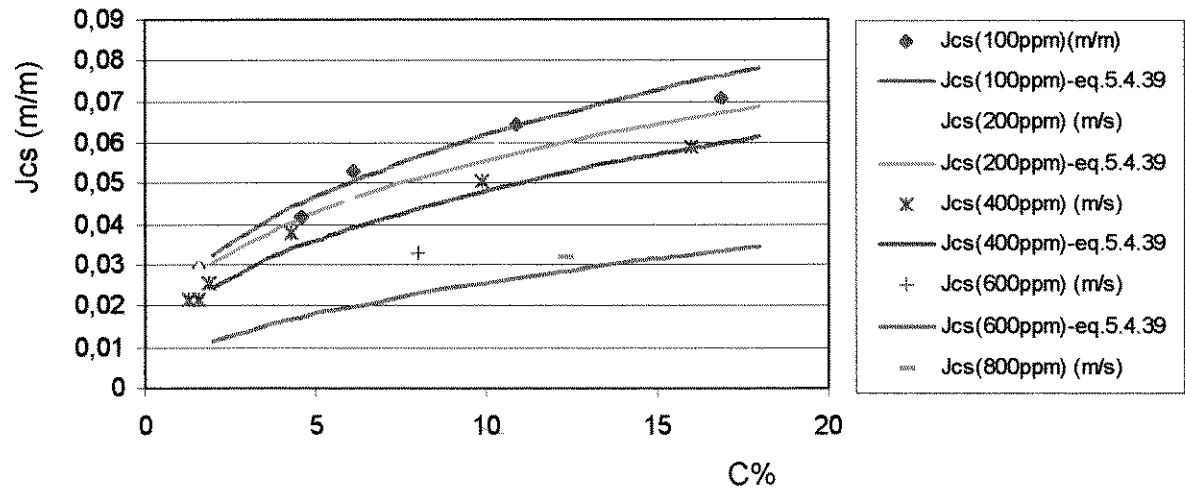


Figura 5.4.6.7.9: Perda de carga, referente à velocidade crítica de sedimentação, em função das concentrações do sólido da mistura e do polímero.

5.4.6.8 – Velocidade crítica– escoamento de misturas com polímero.

Os valores da velocidade crítica e da correspondente perda de carga unitária, foram obtidos das Tabelas 5.4.6, 5.4.8, 5.4.10 e 5.4.12 para diferentes valores de concentração de areia e de polímero. Esses valores, correspondentes à várias concentrações do sólido da mistura, e a uma determinada concentração do polímero foram ajustados. Para efeito prático, em cada caso, foram obtidas duas equações, uma da velocidade crítica em função da concentração do sólido, e outra da perda de carga, correspondente à velocidade crítica, também em função da concentração do sólido.

As equações, obtidas por ajustes, encontram-se na Tabela 5.4.19.

Tabela 5.4.19: Equações da velocidade crítica e da correspondente perda de carga em função da concentração do sólido da mistura para diferentes concentrações de polímero.

Cp (ppm)	Equação	Cc
100	$V_c(100\text{ppm}) = 0,0555.(C\%) + 1,4388$	1,00
	$J_c(100\text{ppm}) = 0,0234.Ln.(C\%) + 0,0079$	0,99
200	$V_c(200\text{ppm}) = 0,0504.(C\%) + 1,441$	1,00
	$J_c(200\text{ppm}) = 0,0189.Ln.(C\%) + 0,0112$	0,96
400	$V_c(400\text{ppm}) = 0,0164.(C\%) + 1,4436$	1,00
	$J_c(400\text{ppm}) = 0,0178.Ln.(C\%) + 0,0092$	0,88

Nota-se que a velocidade crítica resulta ajustes perfeitos do tipo linear:

$$V_c = \alpha.(C\%) + \beta \quad (5.4.40)$$

Na qual C = concentração do sólido da mistura em volume, α e β são coeficientes.

Os valores dos coeficientes α e β , foram ajustados em função da concentração do polímero, obtendo as seguintes equações:

$$\alpha = -4.10^{-7}.C_p^2 + 7.10^{-5}.C_p + 0,0527 \quad (5.4.41)$$

$$C_c = 1,0$$

$$\beta = 0,0035.Ln(C_p) + 1,4228 \quad (5.4.42)$$

$$C_c = 1,0$$

Nas quais: C_p (ppm).

Substituindo as equações (5.4.41) e (5.4.42) na equação (4.40) tem-se:

$$V_c = (-4.10^{-7}.C_p^2 + 7.10^{-5}.C_p + 0,0527).(C\%) + (0,0035.Ln.(C_p) + 1,4228) \quad (5.4.43)$$

Na qual: C_p =concentração do polímero em ppm; C=concentração em porcentagem do sólido na mistura.

Na Figura 5.4.6.8.1 apresentam-se a família de curvas obtidas com a equação (5.4.43) para as concentrações do polímero iguais a 100, 200, 400, e 600 ppm. Verifica-se que, para uma determinada concentração do sólido, a velocidade crítica decresce ao aumentar a concentração do polímero

Apresentam-se ainda na Figura 5.4.6.8.1 todos os pontos obtidos experimentalmente. Nota-se que os pontos ajustam-se muito bem à equação (5.4.43).

Em relação à perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica, observa-se na Tabela 5.4.19, bons ajustes à equação do tipo logarítmica:

$$J_c = \alpha^* \cdot \ln(C\%) + \beta^* \quad (5.4.44)$$

Na qual C = concentração do sólido da mistura em volume, α^* e β^* são coeficientes.

Os valores do coeficiente α^* e do expoente β^* , foram ajustados em função da concentração do polímero, obtendo as seguintes equações:

$$\alpha^* = -0,004 \cdot \ln(C_p) + 0,0414 \quad (5.4.45)$$

$$C_c = 0,89$$

$$\beta^* = 0,0009 \cdot \ln(C_p) + 0,0045 \quad (5.4.46)$$

$$C_c = 0,15$$

Nas quais: C_p (ppm).

Substituindo as equações (5.4.45) e (5.4.46) na equação (5.4.44) tem-se:

$$J_c = (-0,004) \cdot \ln(C\%) + 0,0414 \cdot \ln(C\%) + (0,0009 \cdot \ln(C_p) + 0,0045)$$

(5.4.47)

Na qual: C_p =concentração do polímero em ppm; C =concentração em porcentagem do sólido na mistura, J_c (m/m).

Na Figura (5.4.6.8.2) apresentam-se a família de curvas obtidas com a equação (5.4.47) e todos os valores da perda de carga unitária, referente à velocidade crítica, determinados experimentalmente.

Verifica-se, que para uma determinada concentração do sólido da mistura, a perda de carga unitária diminui ao aumentar a concentração do polímero.

Os pontos determinados experimentalmente ajustam-se razoavelmente à equação (5.4.34), principalmente aqueles referentes às concentrações do polímero de 100, 200, e 400 ppm.

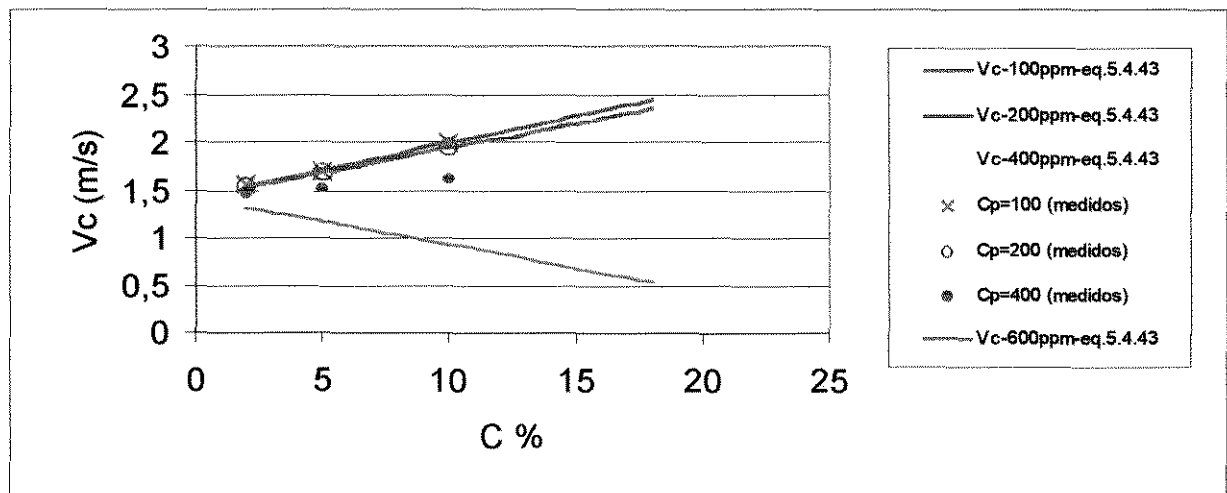


Figura 5.4.6.8.1: Velocidade crítica em função das concentrações do sólido e do polímero.

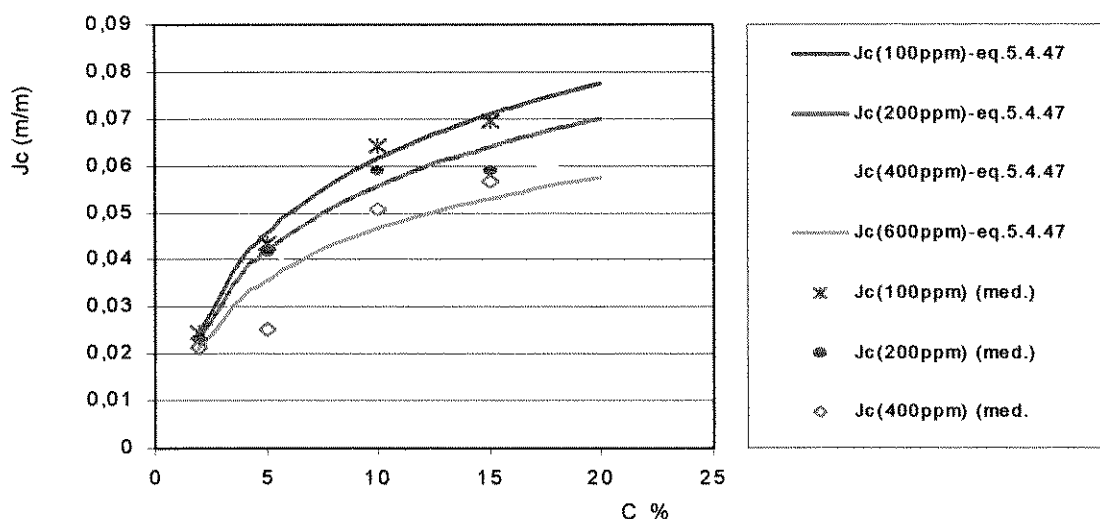


Figura 4.2.6.8.2: Perda de carga unitária, referente à velocidade crítica, em função das concentrações do sólido e do polímero.

5.4.6.9 – Influência do polímero na velocidade crítica de sedimentação e na correspondente perda de carga unitária.

A partir das equações da Tabela (5.4.18), que relacionam a velocidade crítica de sedimentação com a concentração do sólido da mistura, para diferentes concentrações de polímero, foram obtidos os gráficos da Figuras 5.4.6.9.1.

Apresenta-se ainda nesta figura o gráfico da velocidade crítica de sedimentação, devido ao escoamento de misturas sem polímero, determinado através da equação (5.4.9).

Pode-se notar na Figura 5.4.6.9.1, que a velocidade crítica de sedimentação eleva-se ao aumentar a concentração do sólido. Para uma determinada concentração do sólido a velocidade

crítica de sedimentação diminui ao aumentar a concentração do polímero. Esta redução na velocidade crítica de sedimentação não é tão significativa.

As reduções da velocidade crítica de sedimentação, devido ao polímero, são apresentadas na Tabela (5.4.20). Considerando a faixa de concentração do sólido de 2% a 18% em volume, tem-se as seguintes reduções médias: para a concentração do polímero de 100 ppm, 6,2%, para 200 ppm, 5,0%, e para 400 ppm, 8,8%.

Tabela 5.4.20: Redução da velocidade crítica de sedimentação devido ao polímero.

C %	$(V_{cs}-V_{cs100}).100/V_{cs} (%)$	$(V_{cs}-V_{cs200}).200/V_{cs} (%)$	$(V_{cs}-V_{cs400}).400/V_{cs} (%)$
2	7,8	8,7	13,0
4	7,0	6,7	10,7
6	6,5	5,7	9,5
8	6,2	5,0	8,8
10	6,0	4,5	8,2
12	5,8	4,1	7,7
14	5,7	3,8	7,4
16	5,6	3,5	7,0
18	5,5	3,3	6,8
Média=	6,2	5,0	8,8

Das equações da Tabela (5.4.18), que relacionam a perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, com a concentração do sólido da mistura, para diferentes concentrações de polímero, foram obtidos os gráficos da Figuras 5.4.6.9.2.

Apresenta-se ainda nesta figura o gráfico da perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, devido ao escoamento de misturas sem polímero, determinado através da equação (5.4.6).

Pode-se notar na Figura 5.4.6.9.2, que a perda de carga unitária eleva-se ao aumentar a concentração do sólido. Para uma determinada concentração do sólido a perda de carga unitária diminui ao aumentar a concentração do polímero.

As reduções da perda de carga unitária, devido ao polímero, são apresentadas na Tabela (5.4.21) e na Figura 5.4.6.9.3. Considerando a faixa de concentração do sólido de 2% a 18% em

volume, tem-se as seguintes reduções médias: para a concentração do polímero de 100 ppm, 7,9%, para 200 ppm, 13,8%, e para 400 ppm, 23,3%.

Tabela 5.4.21: Redução da perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, devido ao polímero.

C%	$(J_{cs}-J_{cs100}).100/J_{cs} (\%)$	$(J_{cs}-J_{cs200}).100/J_{cs} (\%)$	$(J_{cs}-J_{cs400}).100/J_{cs} (\%)$
2	12,3	16,0	30,9
4	14,2	18,8	30,6
6	12,5	17,7	28,2
8	10,4	16,0	25,6
10	8,2	14,3	23,2
12	6,2	12,6	20,9
14	4,2	11,0	18,8
16	2,4	9,5	16,8
18	0,6	8,1	15,0
Média=	7,9	13,8	23,3

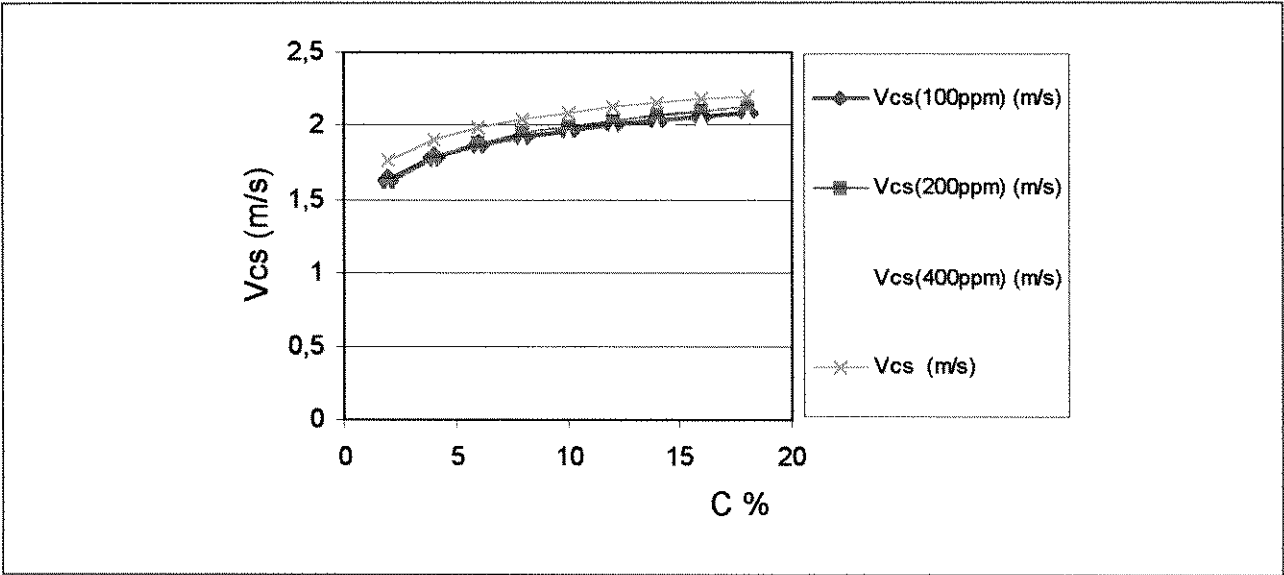


Figura 5.4.6.9.1: Velocidade crítica de sedimentação em função da concentração do sólido e da concentração do polímero.

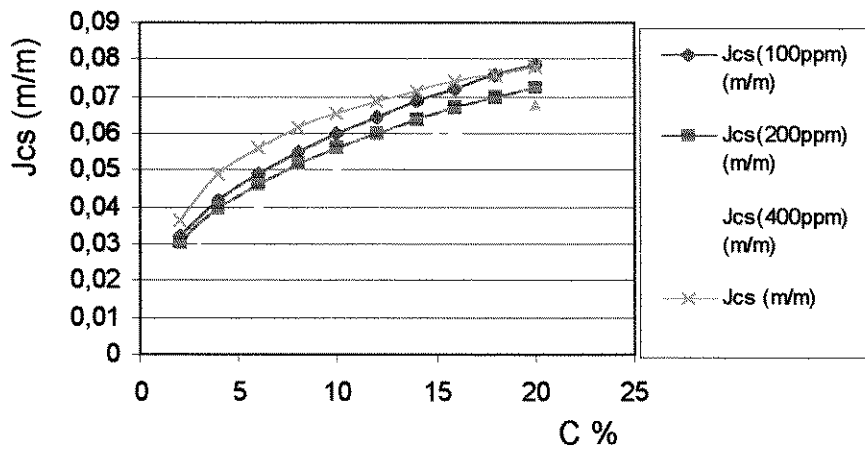


Figura 5.4.6.9.2: Perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, em função da concentração do sólido e da concentração do polímero.

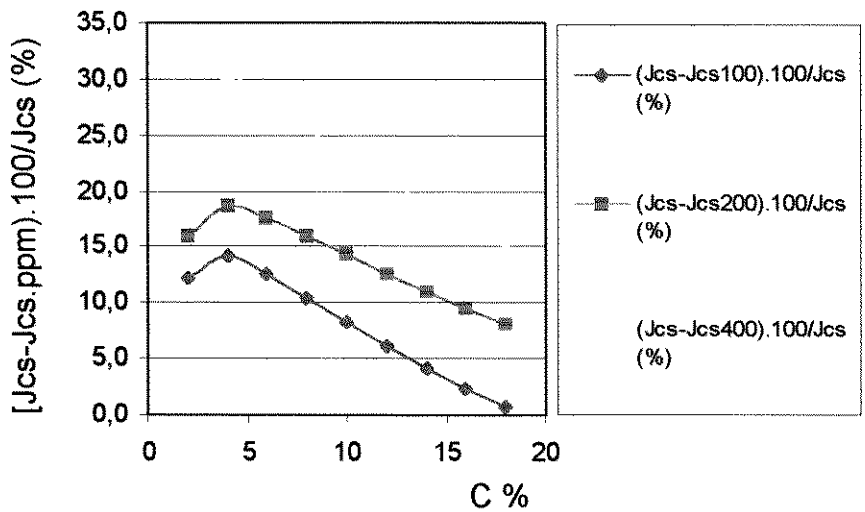


Figura 5.4.6.9.3: Reduções da perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, devido a adição do polímero.

5.4.6.10 – Influência do polímero na velocidade crítica e na correspondente perda de carga unitária.

A partir das equações da Tabela (5.4.19), que relacionam a velocidade crítica com a concentração do sólido da mistura, para diferentes concentrações de polímero, foram obtidos os gráficos da Figuras 5.4.6.10.1.

Apresenta-se ainda nesta figura o gráfico da velocidade crítica, devido ao escoamento de misturas sem polímero, determinado através da equação (5.4.10).

Pode-se notar na Figura 5.4.6.10.1, que a velocidade crítica eleva-se ao aumentar a concentração do sólido. Para uma determinada concentração do sólido a velocidade crítica somente sofre redução para a concentração do polímero a 400 ppm. Para as concentrações do polímero menores que 400 ppm a velocidade crítica aumenta com a redução da concentração do polímero.

As reduções da velocidade, devido ao polímero, são apresentadas na Tabela (4.22). Considerando a faixa de concentração do sólido de 2% a 18% em volume, tem-se as seguintes reduções médias: para a concentração do polímero de 100 ppm, -21,4%, para 200 ppm, -18,5%, e para 400 ppm, 1,5%.

Tabela 5.4.22: Redução da velocidade crítica devido ao polímero.

C %	$(V_c - V_{c100}) \cdot 100 / V_c$ (%)	$(V_c - V_{c200}) \cdot 200 / V_c$ (%)	$(V_c - V_{c400}) \cdot 400 / V_c$ (%)
2	-14,6	-14,0	-8,4
4	-11,5	-10,3	-1,3
6	-12,8	-11,0	1,8
8	-15,7	-13,3	3,3
10	-19,3	-16,4	4,0
12	-23,2	-19,8	4,1
14	-27,5	-23,5	3,9
16	-31,8	-27,3	3,5
18	-36,3	-31,3	2,8
Média=	-21,4	-18,5	1,5

Das equações da Tabela (5.4.19), que relacionam a perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica, com a concentração do sólido da mistura, para diferentes concentrações de polímero, foram obtidos os gráficos da Figuras 5.4.6.10.2.

Apresenta-se ainda nesta figura o gráfico da perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica, devido ao escoamento de misturas sem polímero, determinado através da equação (5.4.8).

Pode-se notar na Figura 5.4.6.10.2, que a perda de carga unitária eleva-se ao aumentar a concentração do sólido. Para uma determinada concentração do sólido a perda de carga unitária diminui ao aumentar a concentração do polímero.

As reduções da perda de carga unitária, devido ao polímero, são apresentadas na Tabela (5.4.23) e na Figura 54.6.10.3. Considerando a faixa de concentração do sólido de 2% a 18% em volume, tem-se as seguintes reduções médias: para a concentração do polímero de 100 ppm, 9,0%, para 200 ppm, 18,3%, e para 400 ppm, 25,4%.

Tabela 5.4.23: Redução da perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica, devido ao polímero.

C %	$(J_c - J_{c100}) \cdot 100 / J_c$ (%)	$(J_c - J_{c200}) \cdot 100 / J_c$ (%)	$(J_c - J_{c400}) \cdot 100 / J_c$ (%)
2	32,6	32,1	39,8
4	16,8	22,8	30,1
6	10,8	19,4	26,5
8	7,5	17,4	24,4
10	5,3	16,1	23,1
12	3,7	15,2	22,1
14	2,4	14,5	21,3
16	1,4	13,9	20,7
18	0,6	13,4	20,2
Média=	9,0	18,3	25,4

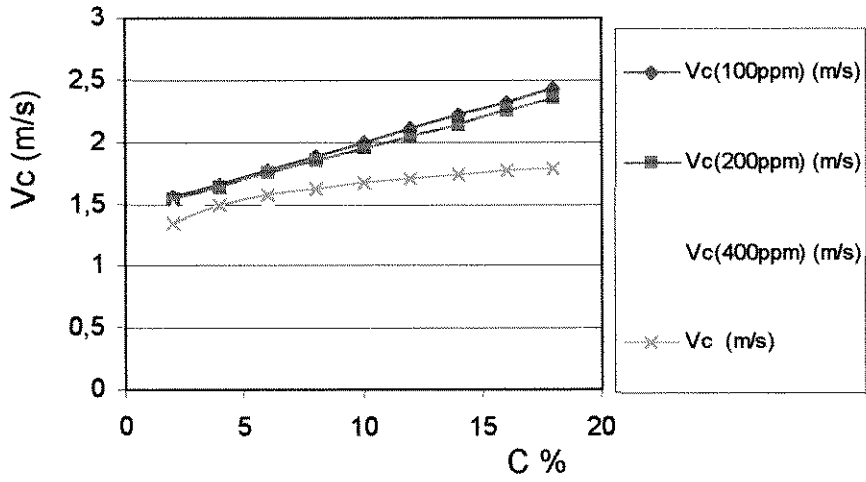


Figura 5.4.6.10.1: Velocidade crítica em função da concentração do sólido e da concentração do polímero.

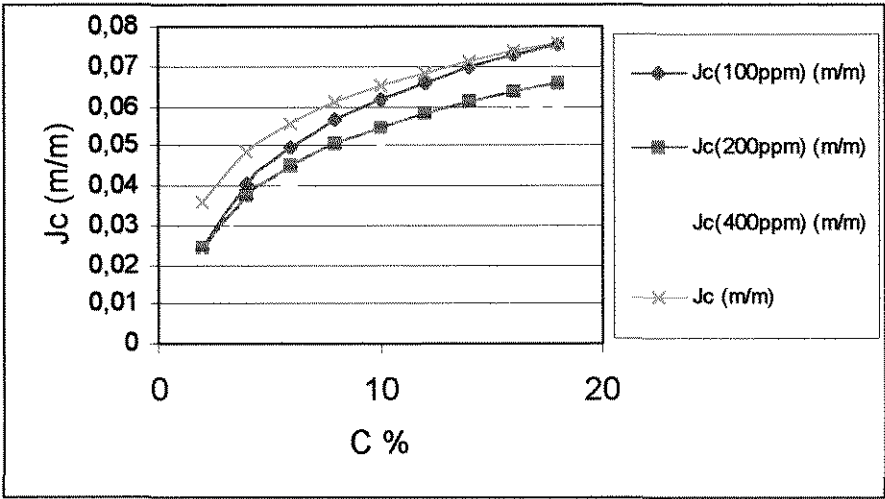


Figura 5.4.6.10.2: Perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica, em função da concentração do sólido e da concentração do polímero.

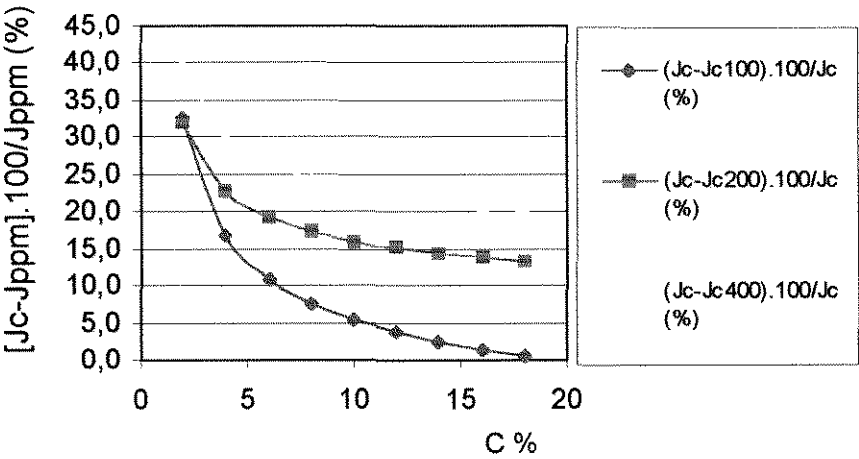


Figura 5.4.6.10.3: Redução da perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica, em função da concentração do sólido e da concentração do polímero.

5.5 – Velocidade crítica de sedimentação

5.5.1 – Correlações de velocidade crítica de sedimentação

Diversas são as correlações de velocidade crítica apresentadas na revisão bibliográfica. Realiza-se comparação entre as velocidades críticas de sedimentação calculadas pelas correlações e as obtidas experimentalmente.

Para escoamento de areia BC e água, os valores de velocidade crítica de sedimentação obtidos experimentalmente, são representados na Figura 5.5.1, em função da concentração volumétrica do sedimento.

A areia BC possui granulometria variada com d_{50} igual a 0,2019 mm e 0,67% de pedrisco grosso com diâmetro de até 2 mm.

Na Figura 5.5.1 observa-se a ocorrência de V_{cs} máximo para concentração aproximada de 10%, idêntica observação foi dada por Sinclair (1962) para escoamento de água e areia.

Para o escoamento de água e areia A, mais grossa, os valores de velocidade crítica de sedimentação obtidos experimentalmente, são representados na Figura 5.5.2, em função da concentração volumétrica do sedimento.

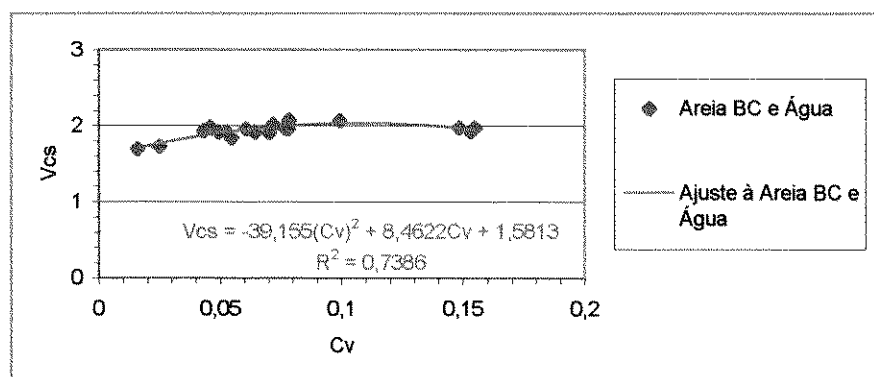


Figura 5.5.1 – Velocidade crítica de sedimentação de água e areia BC, em função de concentração.

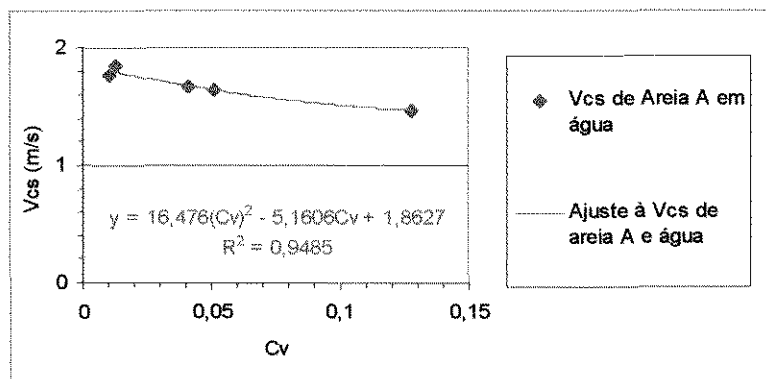


Figura 5.5.2 - Velocidade crítica de sedimentação de água e areia A, em função de concentração.

De acordo com a revisão bibliográfica de partículas uniformes, espera-se uma função de velocidade crítica de sedimentação de areia A semelhante à da areia BC. Porém, para a função da areia BC (Figura 5.5.1), existe um valor máximo e depois para valores maiores de concentração, a velocidade crítica de sedimentação torna-se praticamente constante. Para fluxo de areia A (Figura 5.5.2), observa-se diminuição da V_{cs} até um valor praticamente constante. Atribui-se este comportamento de diminuição na velocidade crítica de sedimentação à variada granulometria da areia A. O diâmetro d_{50} da areia A é de 1,3013 mm. Como a areia A apresenta composição de filler(1,33%), pedrisco fino (6,86%), pedrisco médio (69,14%) e pedrisco grosso (23%) que é constituída de partículas de cerca de até 6 mm de diâmetro.

Em maiores concentrações de areia A, devido ao fato de as maiores partículas sedimentarem-se antes da menores, quando a concentração média no fluxo é aumentada, ela provoca diminuição da velocidade crítica de sedimentação, ou seja, a sedimentação das partículas ocorre em menor velocidade. Este processo de sedimentação ocorre então diferentemente do processo de sedimentação de partículas uniformes.

Em revisão bibliográfica sobre forças de arraste e de sustentação, verifica-se que a força de arraste que age sobre uma partícula esférica em movimento sobre uma superfície depende da rugosidade da superfície. O coeficiente de arraste, em função do número de Reynolds da partícula, é maior quando a superfície é lisa, menor quando é rugosa e ainda

menor quando a partícula se encontra em queda livre em líquido infinito. Observação esta válida para número de Reynolds da partícula (Re_p) cerca de 10^3 , porém mantendo diferença de valores entre os três coeficientes, em Re_p desde cerca de 10^3 até cerca de 2.10^4 . Esta verificação foi realizada por diversos pesquisadores segundo GARDE & RANGA RAJU (1985) página 78.

A força de sustentação que atua sobre uma partícula em repouso sobre uma superfície é razoável segundo diversas investigações. Coleman (1967), e diversos outros pesquisadores (citados a seguir neste parágrafo) apud GARDE & RANGA RAJU (1985) página 79, apresentaram conclusões sobre ela. Coleman (1967), mostrou analiticamente que a força de sustentação atua para baixo para valores de u^*d/v menor que 15 e para cima em demais valores de u^*d/v . WATERS and RAO obteve força de sustentação para baixo para valores de u^*d/v entre 10 e 100. DAVIES and SAMAD (1978) encontrou sustentação para baixo quando u^*d/v é menor que 5 e há significante recirculação embaixo da esfera. Aksoy (1969) encontrou sustentação positiva (para cima) para uma esfera em repouso sobre uma superfície lisa.

Segundo GARDE & RANGA RAJU (1985) página 79 há evidência de que o coeficiente de arraste de uma esfera em repouso sobre uma superfície é maior do que o de uma esfera em queda livre em líquido de infinitas proporções; e a força de sustentação sobre tal partícula é apreciável e sua direção parece ser dependente das condições de escoamento, apresentando-se para cima em pequenos valores de u^*d/v .

Das considerações sobre o coeficiente de arraste e força de sustentação, podemos concluir que a não uniformidade dos grãos de areia, pode ser um dos fatores a causar a diferença entre valores experimentais e teóricos de velocidade crítica de sedimentação, uma vez que partículas de tamanhos diferentes estarão sujeitas a forças de diferentes intensidades e direções.

Para as areias BC e A, calculou-se a velocidade crítica de sedimentação através das correlações constantes na revisão bibliográfica. Estes valores de V_{cs} em função de C_v para fluxo de água e areia BC e fluxo de água e areia BC, encontram-se respectivamente nas Figuras 5.5.3 e 5.5.4. Nas Figuras 5.5.3 e 5.5.4 também constam os valores obtidos experimentalmente e a equação de ajuste pelo método dos mínimos quadrados de V_{cs} em função de C_v .

Nas correlações de velocidade crítica utilizou-se para cálculo o valor de d_{50} como sendo o diâmetro representativo da amostra. Com exceção da correlação de Sinclair (1962) onde se utilizou d_{85} de acordo com a recomendação do autor.

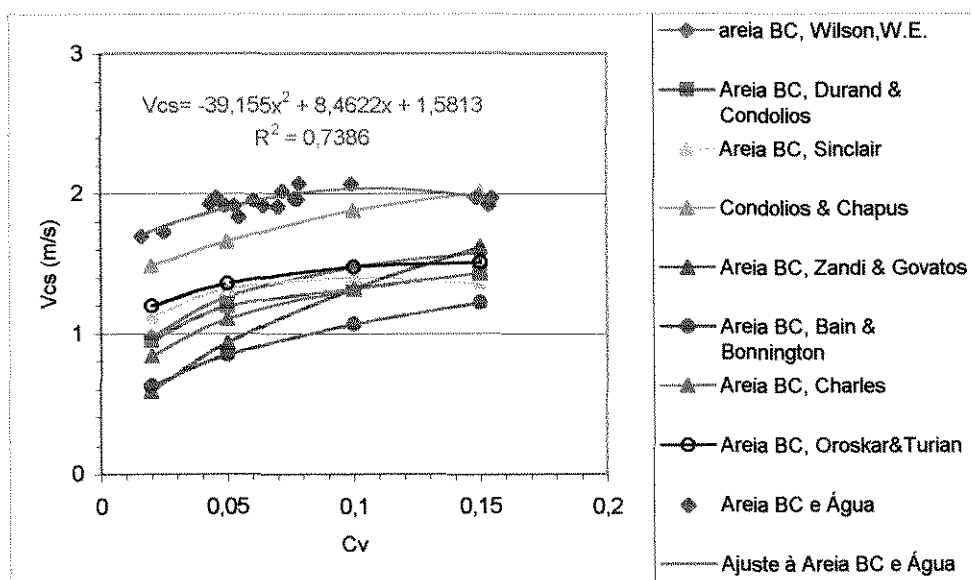


Figura 5.5.3 – Correlações de velocidade crítica de sedimentação de areia BC em comparação com valores experimentais

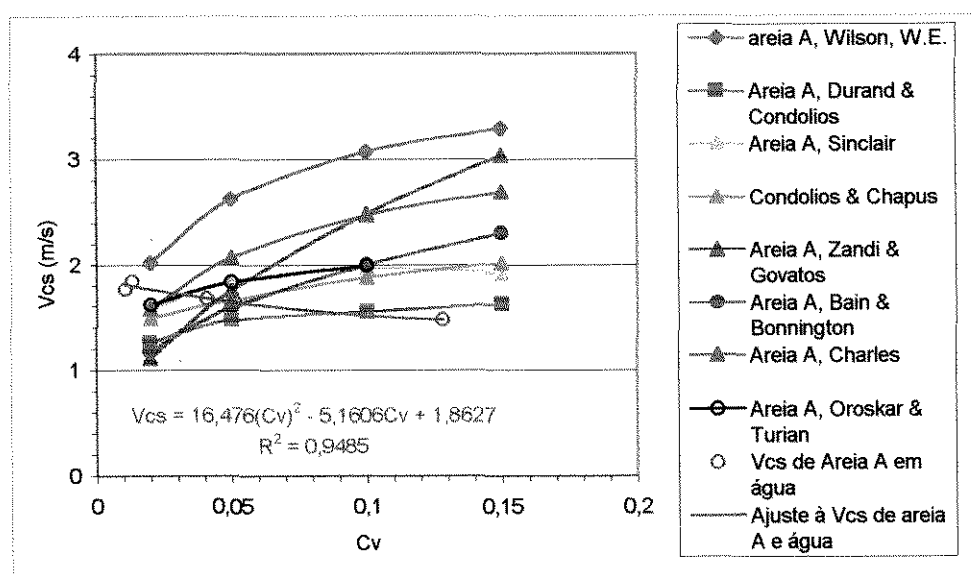


Figura 5.5.4 – Correlações de velocidade crítica de sedimentação de areia A em comparação com valores experimentais

Na Figura 5.5.3 observa-se que os valores experimentais de V_{cs} para a areia BC são maiores do que os obtidos das correlações dos diversos pesquisadores. Os valores experimentais de v_{cs} encontram-se mais próximos dos obtidos pela equação de Condolios e Chapus, tornando-se iguais à destes pesquisadores à concentração de 15%. Observa-se também diferença entre as diversas correlações entre si, sendo que a diferença máxima é de cerca de 1 m/s à concentração de 2% e atinge 0,8 m/s em concentração de 15%. A possível causa deste fato pode ser atribuído à dificuldade de padronização na escolha visual do momento de início de sedimentação. Neste trabalho, para a areia BC, constituída de granulometria quase homogênea, e de diâmetro d_{50} igual a 0,2019 mm (areia caracterizada como fina), o início de sedimentação, ou seja, o instante de velocidade crítica de sedimentação foi determinado pelo incipiente início do aparecimento de uma fina linha de sólidos depositados em repouso no fundo do tubo. O que se encontra de acordo com a definição de velocidade crítica de sedimentação. Assim, devido ao fato dos valores experimentais obtidos apresentarem-se superiores aos valores equacionados pelos citados pesquisadores, acredita-se que o fato se deve à não uniformidade de grãos, ou seja deve-se adotar não o d_{50} como o diâmetro representativo da amostra no cálculo da velocidade crítica de sedimentação.

Um diâmetro maior que d_{50} forneceria maior valor de velocidade crítica de sedimentação e diminuiria a diferença entre os valores observados e os calculados pelas correlações de diversos pesquisadores.

Porém ainda permanece a questão da diferença apresentada pelos diversos pesquisadores entre si.

Esta diferença existente entre os valores calculados de diversas correlações, também foi observada por CHIEN, SZE-FOO (1994). O que indica a necessidade de inclusão de outro ou outros parâmetros nas correlações de velocidade crítica de sedimentação, como por exemplo a rugosidade do tubo, e a velocidade de atrito. Estes parâmetros geralmente não são considerados nas diversas correlações.

Assim, em bombeamento de partículas sólidas, de tamanho aproximado ao da areia BC e com granulometria variada, em tubos do tipo PVC, deve-se adotar em projetos, velocidade de transporte próximo e um pouco superior ao valor de velocidade crítica de sedimentação.

Na Figura 5.5.4 observa-se também a diferença entre os valores de V_{cs} obtidos das diversas correlações. Também se observa que a V_{cs} experimental em menor concentração de 2%, assume aproximadamente o maior valor de V_{cs} de Wilson, W.E.(1942) e em maior concentração, em cerca de 10%, assume o valor de Durand & Condolios (1952).

A partir destas considerações recomenda-se cuidado na adoção de velocidade de projeto de bombeamento de partículas sólidas de granulometria variada.

De acordo com THOMAS (1963 e 1964), através da equação 3.25, com o conhecimento do diâmetro da partícula, o diâmetro do tubo, as massas específicas do líquido e do sólido transportado, e a velocidade de sedimentação da partícula, obtém-se u_0^* , a velocidade de atrito na sedimentação para o caso limite de infinita diluição. Esta equação 3.25 foi escolhida porque para a areia BC, $d_{50} = 0,0002019$ m e para a areia $d_{50} = 0,0013013$ m, o valor de δ resulta em $d_{50} > \delta$, onde δ é a espessura da subcamada viscosa e é igual a $11,6(v/u^*)$.

Através da equação 3.25, determinou-se o valor de u_0^* para a areia BC e para a areia A, resultando em:

Para a areia BC, $u_0^* = 0,056040$ m/s

Para a areia A, $u_0^* = 0,071463$ m/s

Aplicados estes resultados na equação 3.27, obtém-se u_c^* , a velocidade de atrito, na condição de sedimentação para uma dada concentração. A seguir, determinou-se o valor de J (perda de carga unitária) a partir de $J = 4(u_c^*)^2 / (Dg)$, para a dada concentração de sólidos. Estes valores de J, determinados pelo processo descrito, foram denominados de valores teóricos (Tabela 5.5.1).

A partir das Figuras 5.2.1.5 e 5.2.2.4 de J (perda de carga unitária) das areias BC e A, respectivamente, obteve-se do ponto de cruzamento da curva de velocidade crítica de sedimentação e curva de fluxo de água limpa, o valor correspondente de J. Este valor de J forneceu o valor de u_0^* . Este resultado de u_0^* foi denominado de valor calculado. Assim se obteve:

Para a areia BC, $J = 0,025$ m, $u_0^* = 0,069164$ m/s

Para a areia A , $J = 0,033 \text{ m}$, $u_0^* = 0,079463 \text{ m/s}$

Estes valores de u_0^* aplicados na equação 3.27 forneceram valores de u_c^* , a velocidade de atrito, na condição de sedimentação para uma dada concentração. A seguir, determinou-se o valor de J (perda de carga unitária) a partir de $J = 4(u_c^*)^2 / (Dg)$, para a dada concentração de sólidos. Estes valores de J , determinados pelo processo descrito, foram denominados de valores calculados (Tabela 5.5.1).

Os valores de u_0^* determinados pela intersecção das curvas $J = f(v)$ da água limpa com a da velocidade crítica de sedimentação (Figuras 5.2.1.5 e 5.2.2.4.) foram adotados como os reais valores de u_0^* devido à própria definição de u_0^* , ou seja, é a velocidade de atrito correspondente ao início da sedimentação no caso de infinita diluição.

Os valores de J (m/m) observados experimentalmente constam também da Tabela 5.5.1, são valores retirados das Figuras 5.2.1.5 e 5.2.2.4.

Tabela 5.5.1 – Valores de J (m/m) obtidos das equações de THOMAS(1963 e 1964)

Areia	C_v	J (Teórico,m/m)	J (calculado,m/m)	J (observado,m/m)
BC	2%	0,0275	0,0405	0,040
BC	5%	0,0352	0,0513	0,055
BC	10%	0,0450	0,0649	0,065
BC	15%	0,0534	0,0765	0,078
A	2%	0,0653	0,0787	0,068
A	5%	0,0955	0,1143	0,095
A	10%	0,0136	0,1621	0,155

Na Tabela 5.5.1, observa-se para a areia BC, excelente concordância entre os valores calculados e observados, enquanto para a areia A, verifica-se concordância entre os valores teóricos e observados.

As correlações de velocidade crítica de sedimentação, geralmente utilizam o diâmetro do tubo e as propriedades físicas do sólido e do líquido de transporte para a sua

determinação. Ou seja, geralmente as correlações de velocidade crítica não levam em consideração o fator de atrito do escoamento, significando que não consideram a rugosidade do tubo e a velocidade de atrito (nível da turbulência).

Assim as correlações de velocidade crítica de sedimentação determinam apenas a velocidade média do início da deposição, não permitindo o conhecimento da perda de carga J , a não ser que sejam disponíveis outros parâmetros hidráulicos além dos citados e constantes normalmente em correlações de velocidade crítica de sedimentação. As equações de THOMAS, contrariamente a esta tendência geral, permitem a determinação de J , e se for conhecido o fator de atrito do fluxo da mistura sólido líquido, então se torna possível a determinação da velocidade crítica de sedimentação.

Da mesma forma como aparece nas distribuições de concentração de sólidos, Equação de Rouse (equação 3.9 e 3.9a), na Equação de Ismail (1952) (equação 3.10) e na de HSU et al (1971) (equação 3.11), a relação (w/u^*) , THOMAS construiu diagramas generalizados para a condição de início de sedimentação, diagramas este de $w/u_0^* = f(d u_0^*/\nu)$. Em transporte de sedimentos, a relação w/u^* tem assegurado o esclarecimento de diversos fenômenos. Daí a importância do trabalho de THOMAS no esclarecimento da condição de velocidade crítica de sedimentação.

Para a areia BC, e diâmetro de partícula $d_{90} = 0,307$ mm como sendo o diâmetro representativo da amostra, aplicou-se a correlação de Oroskar & Turian e realizou-se nova comparação com os resultados experimentais. A Figura 5.5.5 apresenta esta comparação.

Na Figura 5.5.5 observa-se que os valores experimentais de velocidade crítica de sedimentação ainda superam a correlação de Oroskar & Turian para $d_{90} = 0,307$ mm. Para $d_{99} = 1,0$ mm, os valores da correlação de Oroskar & Turian são próximos dos experimentais, de onde se conclui que na aplicação da correlação de Oroskar & Turian, para areia fina com granulometria variada, deve-se adotar diâmetro da partícula mais próximo a d_{99} . Para areia mais grosseira, como a areia A, conforme se pode observar na Figura 5.5.4, pode-se aplicar o diâmetro d_{50} .

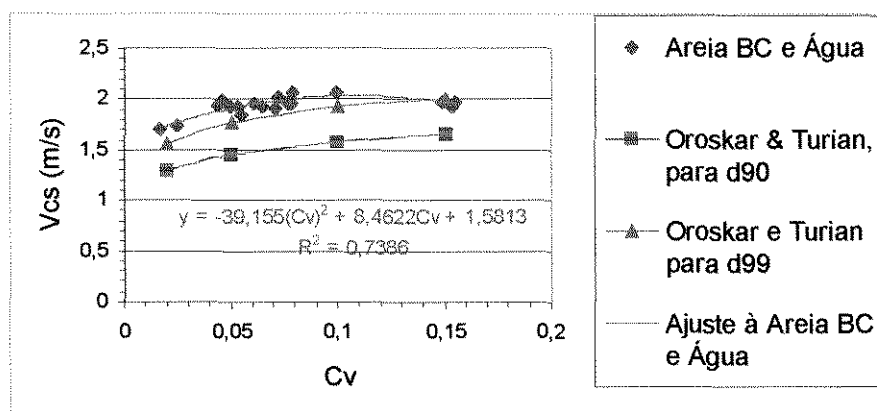


Figura 5.5.5 – Comparação entre a velocidade crítica de sedimentação experimental de fluxo de areia BC em água, com a correlação de Oroskar & Turian para d_{90} e d_{99} .

Além da dificuldade na escolha do diâmetro adequado do grão para utilização nas correlações de velocidade crítica de sedimentação, deve-se ter em mente que partículas de diâmetro em torno de $d_{50} = 0,20$ mm como a areia BC apresentam velocidade crítica de sedimentação maior que a velocidade crítica, assim se a velocidade crítica de sedimentação for a adotada em projetos, tem-se uma margem de segurança no que se refere a bloqueios do tubo. Porém para diâmetros maiores de areia, como 0,44 mm de DURAND (1950), ou $d_{50} = 1,3$ mm da areia A, deve-se dar preferência a um valor de velocidade sempre superior que a velocidade crítica de sedimentação, ou seja, a velocidade crítica que garante menor perda de carga e o não bloqueio do tubo.

5.5.2 - Dificuldade na padronização da velocidade crítica de sedimentação

De acordo com Vanoni (1977), a velocidade crítica de sedimentação não é única, pois é dependente do aumento ou da diminuição da velocidade do fluxo, ou seja é dependente do estado anterior. De acordo com o autor, ela é menor na diminuição de velocidade. Assim, durante a realização dos experimentos, determinou-se alguns valores de V_{cs} por aumento da velocidade do fluxo.

A velocidade crítica de sedimentação em todo o trabalho experimental foi determinada sempre por diminuição da velocidade do fluxo. Estes encontram-se representados em função da concentração, na Figura 5.5.2.1. Apresenta-se também na Figura 5.5.2.1, a equação de ajuste polinomial pelo método dos mínimos quadrados.

Na Figura 5.5.2.1, para efeito de comparação foram colocados os pontos de V_{cs} obtidos por aumento de velocidade. Todos estes pontos foram obtidos maiores do que a equação de ajuste polinomial, ou seja, parecem ser maiores as V_{cs} por aumento de velocidade. Como porém estes pontos obtidos por aumento de velocidade encontram-se dentro dos erros percentuais da V_{cs} obtida por diminuição de velocidade (conforme se observa na Figura 5.5.2.1), pouco se pode concluir com relação à velocidade crítica de sedimentação da areia BC por aumento de velocidade do escoamento. Conclui-se assim que para a areia BC, a velocidade crítica de sedimentação por aumento de velocidade do escoamento aparentemente não difere da velocidade crítica de sedimentação da areia BC por diminuição da velocidade do escoamento

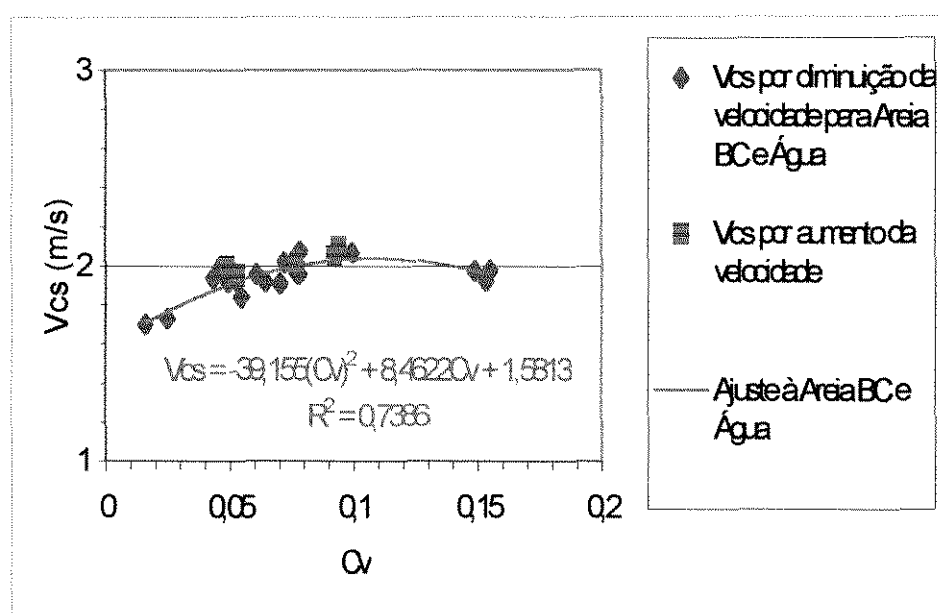


Figura 5.5.2.1 – Velocidade crítica de sedimentação por diminuição e por aumento da velocidade.

5.5.3 - Conclusões sobre efeito de solução polimérica sobre a velocidade crítica de sedimentação

Neste item, apresentam-se análises e conclusões realizadas a partir dos dados experimentais obtidos de ensaios de escoamento de areia BC e solução NALCO 4045.

5.5.3.1 – Efeito da adição de polímero sobre a velocidade crítica de sedimentação

Apresentam-se resultados do efeito da poliacrilamida aniônica solúvel em água na velocidade crítica de deposição. O sólido utilizado foi areia denominada areia BC cujo diâmetro $d_{50} = 0,2$ mm. Foram testadas misturas constituídas de água-areia BC de concentrações aproximadamente iguais a 2, 5, 10, 15 %, em volume da mistura. As soluções de polímero utilizadas foram preparadas com as concentrações de 100, 200, 400, 600, 800, e 1200 ppm. No transporte de mistura água-areia BC de concentração aproximadamente igual a 10 %, em volume da mistura, obteve-se as seguintes variações da velocidade crítica de deposição e correspondente perda de carga unitária, expressas em diferença relativa percentual: para $C_p = 100$ ppm, $V^* = +9,0$ %, $J^* = +3,0$ %; para $C_p = 200$ ppm, $V^* = +5,3$ %, $J^* = -4,6$ %; para $C_p = 400$ ppm, $V^* = +2,1$ %, $J^* = -19,8$ %; para $C_p = 600$ ppm, $V^* = -17,0$ %, $J^* = -50,0$ %; para $C_p = 800$ ppm, $V^* = -20,2$ %, $J^* = -56,5$ %; para $C_p = 1200$ ppm, $V^* = -24,5$ %, $J^* = -65,1$ %. Para a concentração de 15 %, obteve-se: para $C_p = 100$ ppm, $V^* = 0,0$ %, $J^* = -8,4$ %; para $C_p = 200$ ppm, $V^* = -7,0$ %, $J^* = -22,9$ %; para $C_p = 400$ ppm, $V^* = -16,0$ %, $J^* = -34,5$ %; para $C_p = 800$ ppm, $V^* = -24,5$ %, $J^* = -61,5$ %; para $C_p = 1200$ ppm, $V^* = -29,5$ %, $J^* = -63,6$ %.

5.5.3.1.1 – Descrição das conclusões do efeito do polímero sobre a velocidade crítica de sedimentação

Na Figura 5.5.3.1.1 apresentam-se os pontos que relacionam os valores da perda de carga unitária (J) e velocidade média do escoamento (V) de misturas de água-areia nas concentrações aproximadas de 2%, 5%, 10% e 15%, em volume da mistura. Os pontos correspondentes a cada uma das concentrações foram ajustados através das funções polinomiais indicadas. A partir dos valores das velocidades críticas de deposição referentes a cada concentração, obtidos visualmente durante os ensaios, obteve-se por ajuste a função $J = f(V_{cs})$ indicada nessa Figura. Observa-se que, para uma determinada velocidade média (V), a perda de carga aumenta com a elevação da concentração. A perda de carga devido ao escoamento de água limpa, na região da figura onde se localizam as velocidades críticas de deposição, é sempre menor que as perdas de carga provocadas pelo escoamento de misturas água-areia. Por outro lado, a velocidade crítica de deposição e a correspondente perda de carga elevam-se ao aumentar a concentração da mistura. Isto indica que para transportar um volume maior de areia é necessário consumir mais energia e aumentar a velocidade de escoamento. Do ponto de vista operacional trata-se de uma condição desfavorável. Sabe-se que ao aumentar a velocidade média do escoamento de misturas há uma elevação do desgaste por abrasão diminuindo a vida útil dos componentes internos da bomba e da tubulação.

Nas Figuras 5.5.3.1.2, e 5.5.3.1.3 apresentam-se os pontos que relacionam os valores da perda de carga unitária (J) e a velocidade média do escoamento (V) de misturas de água-areia-polímero nas concentrações de areia 10% e 15% em volume da mistura, respectivamente. As concentrações de polímero, na Figura 5.5.3.1.2, são 100, 200, 400, 600, 800, e 1200 ppm, enquanto na Figura 5.5.3.1.3 são 100, 200, 400, 800, e 1200 ppm. Verificam-se nessas figuras, que a perda de carga, devido ao escoamento de misturas água-areia-polímero, diminui significativamente à medida que se eleva a concentração do polímero e a velocidade média do escoamento. Demonstra, com isto, que o polímero é mistura turbulenta mais intensa à medida que se aumenta a turbulência do escoamento.

A partir da obtenção dos valores das velocidades crítica de deposição e das respectivas perdas de carga, referentes aos gráficos das Figuras 5.5.3.1.1, 5.5.3.1.2 e

5.5.3.1.3, calcularam-se as diferenças relativas percentuais (V^*) e (J^*) apresentadas nas Figuras 5.5.3.1.4 e 5.5.3.1.5.

Na Figura 5.5.3.1.4 tem-se, em função das concentrações do polímero, as diferenças relativas percentuais entre as velocidades críticas de deposição com e sem polímero ($V^* = ((V_{cp} - 1,88)/1,88) \cdot 100$), e as respectivas diferenças relativas percentuais entre perdas de carga com e sem polímero ($J^* = ((J_{cp} - 0,0636)/0,0636) \cdot 100$). Os valores 1,88 m/s e 0,0636 m/m, apresentados nas equações, referem-se às velocidade crítica de deposição e a respectiva perda de carga sem polímero devido ao escoamento de mistura de água e areia preparada a 10%.

Na Figura 5.5.3.1.5 tem-se, em função das concentrações do polímero, as diferenças relativas percentuais entre as velocidades críticas de deposição com e sem polímero ($V^* = ((V_{cp} - 2,00)/2,00) \cdot 100$), e as respectivas diferenças relativas percentuais entre perdas de carga com e sem polímero ($J^* = ((J_{cp} - 0,0785)/0,0785) \cdot 100$). Os valores 2,00 m/s e 0,0785 m/m, apresentados nas equações, referem-se às velocidade crítica de deposição e a respectiva perda de carga sem polímero devido ao escoamento de mistura de água e areia preparada a 15%.

Verificam-se nas Figuras 5.5.3.1.4 e 5.5.3.1.5 que os pontos ajustados resultam em funções decrescentes de V^* e J^* ao aumentar a concentração do polímero, com tendências de se manterem constantes para concentrações mais altas de polímero. Disto pode-se tirar duas conclusões importantes. Primeira, a partir de determinado valor de concentração de polímero, incrementos da concentração desta substância, não provocarão reduções de V^* e J^* , ou seja, dependendo da concentração do sólido a ser transportado, existirá uma concentração limite de polímero. Segunda, que do ponto de vista de operação do sistema de recalque de sólido a adição de polímero proporciona benefícios a serem considerados, tais como: o transporte de determinado volume de sólido pode ser feito com velocidades menores reduzindo os desgastes abrasivos, e consequentemente os custos de manutenção; o transporte de determinado volume de sólido pode ser feito com dissipação de energia reduzida, diminuindo os custos operacionais. Na Tabela 5.5.3.1.1, são apresentadas os valores de V^* e de J^* para as concentrações de areia de 10% e 15%. Verificam-se nessa Tabela reduções muito significativas da velocidade crítica de deposição e correspondente perda de carga unitária.

5.5.3.1.2 – Conclusões finais sobre a adição de polímero à velocidade crítica de sedimentação

Para uma determinada velocidade média (V) de escoamento, a perda de carga aumenta com a elevação da concentração do sólido transportado.

A velocidade crítica de sedimentação e a correspondente perda de carga elevam-se ao aumentar a concentração do sólido transportada mistura.

Tabela 5.5.3.1.1 - Diferenças relativas percentuais (V*) e (J*) em função da concentração do polímero.

Areia	Parâmetros	Concentração do polímero em ppm						
		0	100	200	400	600	800	1200
C=10% d50=0,2m m	Vcp (m/s)	1,88	2,05	1,98	1,92	1,56	1,50	1,42
	J (m/m)	0,0636	0,0655	0,0607	0,0510	0,0318	0,0277	0,0222
	V* em %	-	+9,0	+5,3	+2,1	-17,0	-20,2	-24,5
	J* em %	-	+3,0	-4,6	-19,8	-50,0	-56,5	-65,1
C=15% d50=0,2m m	Vcp (m/s)	2,00	2,00	1,86	1,68		1,51	1,41
	J (m/m)	0,0785	0,0719	0,0605	0,0514		0,0302	0,0286
	V* em %	-	0	-7,0	-16,0		-24,5	-29,5
	J* em %	-	-8,4	-22,9	-34,5		-61,5	-63,6

A perda de carga, devido ao escoamento de misturas água-areia-polímero, diminui significativamente à medida que se eleva a concentração do polímero e a velocidade média do escoamento. Demonstra-se, com isto, que o polímero é mais eficiente à medida que se aumenta a turbulência do escoamento.

As diferenças relativas percentuais entre as velocidades críticas de deposição com e sem polímero, expressas por $(V^* = ((V_{cp} - V_{cs})/V_{cs}) \cdot 100)$, e as correspondentes diferenças

relativas percentuais entre perdas de carga com e sem polímero, dadas por $(J^* = ((J_{cp} - J_{cs})/J_{cs}) \cdot 100)$, decrescem ao aumentar a concentração do polímero, com tendências de se manterem constantes para concentrações mais altas de polímero.

A partir de determinado valor da concentração de polímero, incrementos da concentração desta substância, não provocarão reduções de V^* e J^* , ou seja, dependendo da concentração do sólido a ser transportado, existirá uma concentração limite de polímero.

Do ponto de vista de operação do sistema de recalque de sólido, a adição de polímero proporciona benefícios a serem considerados, tais como: o transporte de determinado volume de sólido pode ser feito com velocidades menores reduzindo os desgastes abrasivos, e consequentemente os custos de manutenção; o transporte de determinado volume de sólido pode ser feito com dissipação de energia reduzida, diminuindo os custos operacionais.

No transporte de mistura água-areia na concentração de 10% em volume da mistura foram as seguintes as variações das velocidades críticas de deposição e correspondentes perda de carga unitária expressas em diferenças relativas percentuais: para $C_p = 100$ ppm, $V^* = +9,0 \%$, $J^* = +3,0 \%$; para $C_p = 200$ ppm, $V^* = +5,3 \%$, $J^* = -4,6 \%$; para $C_p = 400$ ppm, $V^* = +2,1 \%$, $J^* = -19,8 \%$; para $C_p = 600$ ppm, $V^* = -17,0 \%$, $J^* = -50,0 \%$; para $C_p = 800$ ppm, $V^* = -20,2 \%$, $J^* = -56,5 \%$; para $C_p = 1200$ ppm, $V^* = -24,5 \%$, $J^* = -65,1 \%$.

No transporte de mistura água-areia na concentração de 15 % em volume da mistura foram as as seguintes as variações das velocidades críticas de deposição e respectivas perda de carga unitária expressas em diferenças relativas percentuais: para $C_p = 100$ ppm, $V^* = 0,0 \%$, $J^* = -8,4 \%$; para $C_p = 200$ ppm, $V^* = -7,0 \%$, $J^* = -22,9 \%$; para $C_p = 400$ ppm, $V^* = -16,0 \%$, $J^* = -34,5 \%$; para $C_p = 800$ ppm, $V^* = -24,5 \%$, $J^* = -61,5 \%$; para $C_p = 1200$ ppm, $V^* = -29,5 \%$, $J^* = -63,6 \%$.

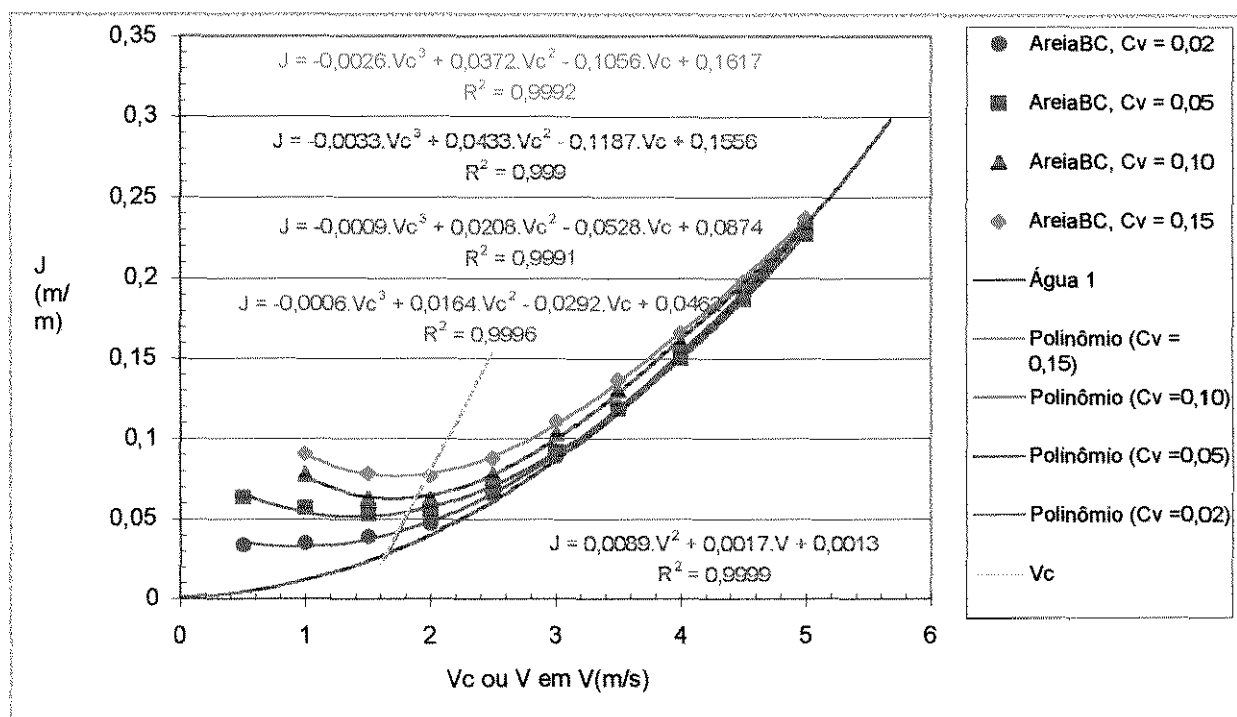


Figura 5.5.3.1.1 – Perda de carga em função da velocidade de escoamento de mistura água-areia preparada à varias concentrações (areia BC com $d_{50}=0,20$ mm).

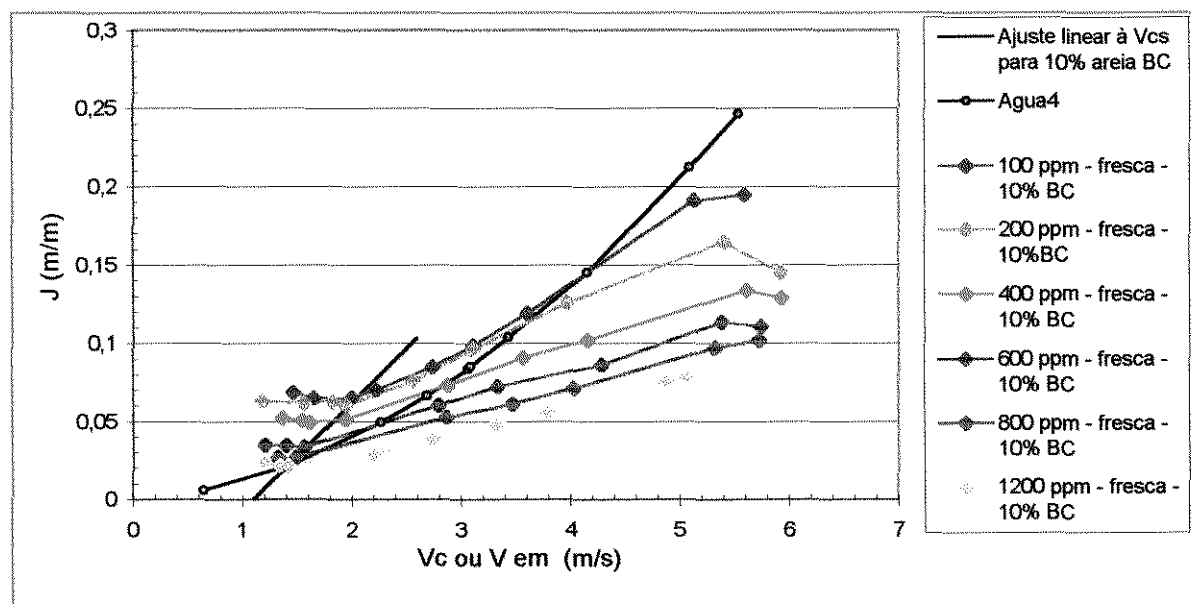


Figura 5.5.3.1.2 – Perda de caga em função da velocidade de escoamento de mistura água-areia-polímero preparada à várias concentrações (areia BC com $d_{50} = 0,20$ mm).

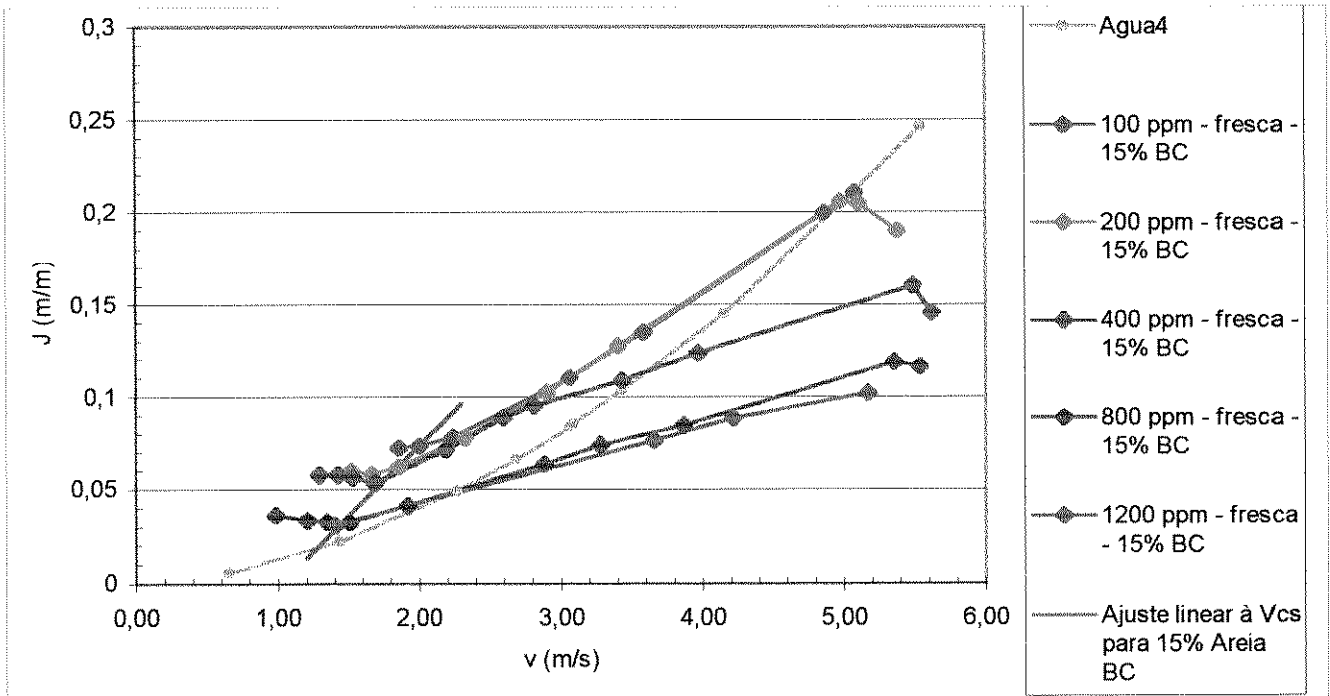


Figura 5.5.3.1.3 – Perda de carga em função da velocidade de escoamento de mistura água-areia-polímero preparada à várias concentrações (areia BC com $d_{50} = 0,20\text{mm}$).

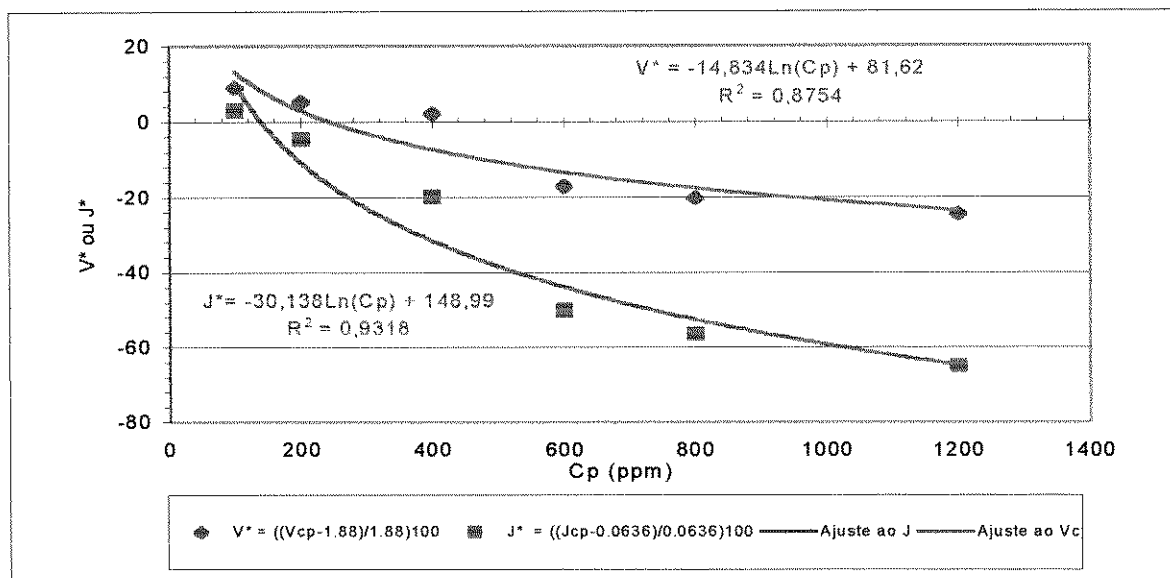


Figura 5.5.3.1.4 – Reduções da velocidade crítica e da perda de carga devido à adição de polímero em escoamento de mistura (água - areia) à 10% em volume da mistura.

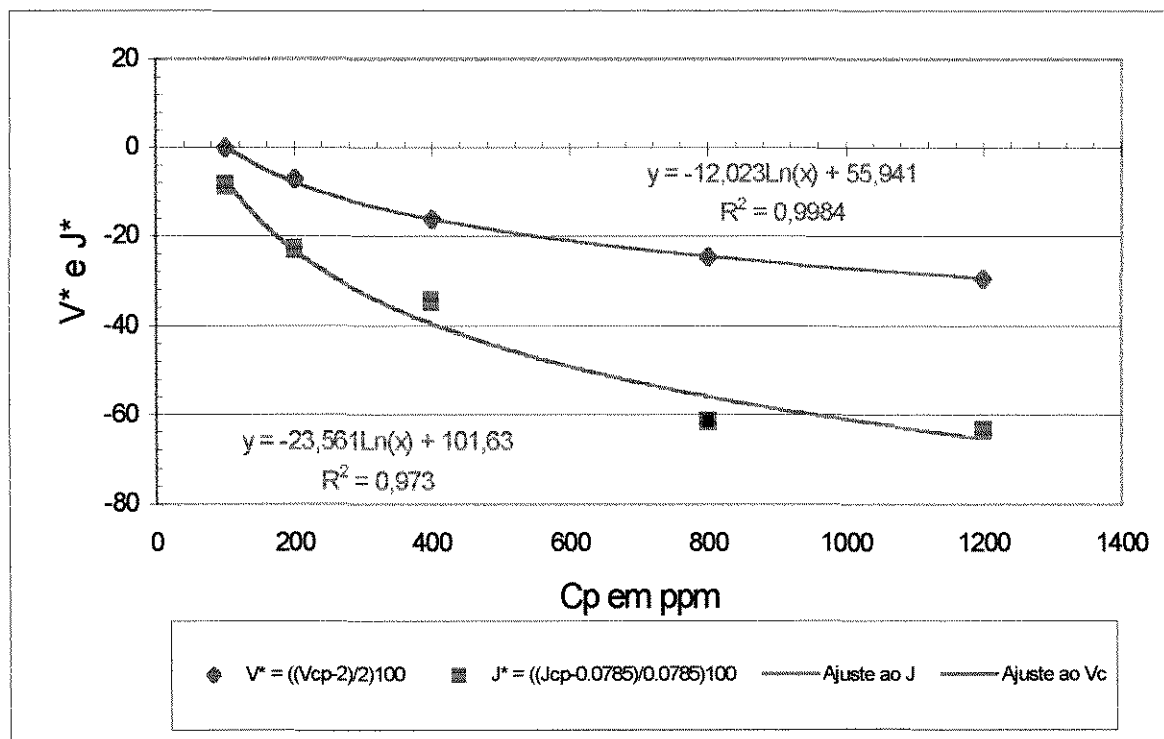


Figura 5.5.3.1.5 – Reduções da velocidade crítica e da perda de carga devido à adição de polímero em escoamento de mistura (água - areia) à 15% em volume da mistura.

5.5.4 – Conclusões sobre o escoamento de areia e água

5.5.4.1 – Programa de Soliman, R. H. e Collier, P. B.

O programa BASIC desenvolvido por Soliman, R. H. e Collier, P. B. (1990), foi transformado em programa FORTRAN para a finalidade de comparação entre resultados do programa e resultados experimentais da presente pesquisa.

O programa FORTRAN utilizado encontra-se no ANEXO 1.

O programa FORTRAN com entrada de dados no Sistema SI, fornece respostas em ambos os Sistemas, SI e Inglês. As equações são as descritas no programa original, conforme abordado na revisão bibliográfica deste trabalho.

Turian et al (1977) e Oroskar, A. R. et al (1980) desenvolveram suas equações para grãos de tamanhos uniformes. A granulometria das areias BC e A, ensaiadas nos escoamentos com água, é variada, o que as caracteriza como areias não uniformes. Devido à não uniformidade de grãos, e à necessidade de se estabelecer um diâmetro representativo da amostra, adotou-se o diâmetro d_{50} , ou seja, d_{50} é o diâmetro da partícula, tal que 50% da amostra tem diâmetro inferior a ela.

Para cada valor de concentração média de areia no tubo, e para cada tipo de areia BC e A, através do programa calculou-se a perda de carga unitária e a velocidade crítica. Os valores de vazão de entrada ao programa, foram os correspondentes às velocidades médias de 0,5, 1,0, 2,0, 3,0 4,0, e 5,0 m/s. Assim, com estes seis pontos, de velocidade média e correspondentes perdas de carga unitária e também pontos de velocidade crítica, foram construídos as Figuras 5.5.4.1 e 5.5.4.2

As Figuras 5.2.1.5 e 5.2.2.4 dos valores obtidos por interpolação manual aos dados experimentais foram colocados respectivamente próximos às Figuras 5.5.4.1 e 5.5.4.2, para melhor observação comparativa.

Para a areia BC, os valores de perda de carga experimentais são menores que os calculados pelas equações de Turian et al (1977).

Para a areia A, os valores de perda de carga experimentais são menores que os calculados pelas equações de Turian et al (1977) para valores de velocidade maiores que 2m/s, sendo que para velocidades menores que 2m/s os valores de J são aproximadamente iguais.

A velocidade crítica de sedimentação, calculada da correlação de OROSKAR & TURIAN (1980) foi discutida no item 5.5.1.

Os resultados experimentais indicaram a convergência das curvas de equiconcentrações de $J = f(v)$, em altas velocidade em direção à curva de água limpa. Esta convergência foi verificada em aproximadamente 5 m/s para a areia BC e em aproximadamente 5,5 m/s para a areia A. Porém as equações de Turian et al (1977) indicam convergência em velocidades muito superiores.

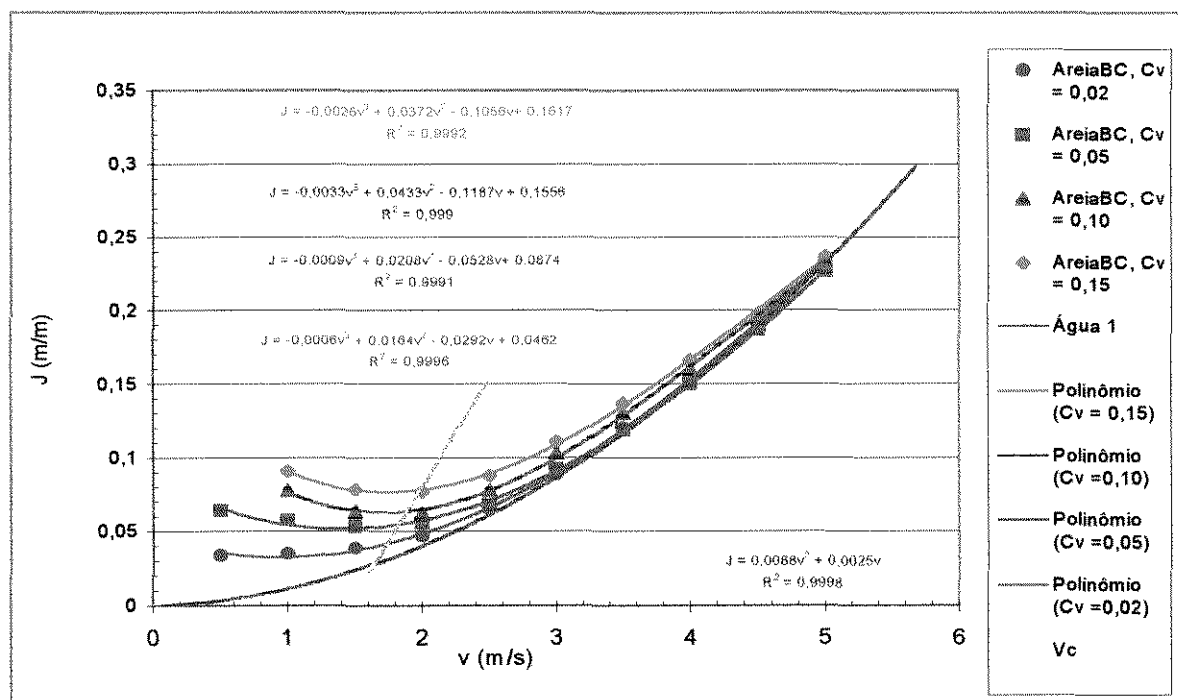


Figura 5.2.1.5 – Valores de J (m/m) em função de velocidade média do fluxo e da concentração média (areia BC) ajustados aos valores interpolados e experimentais. Indicação do ajuste à velocidade crítica de sedimentação obtida experimentalmente.

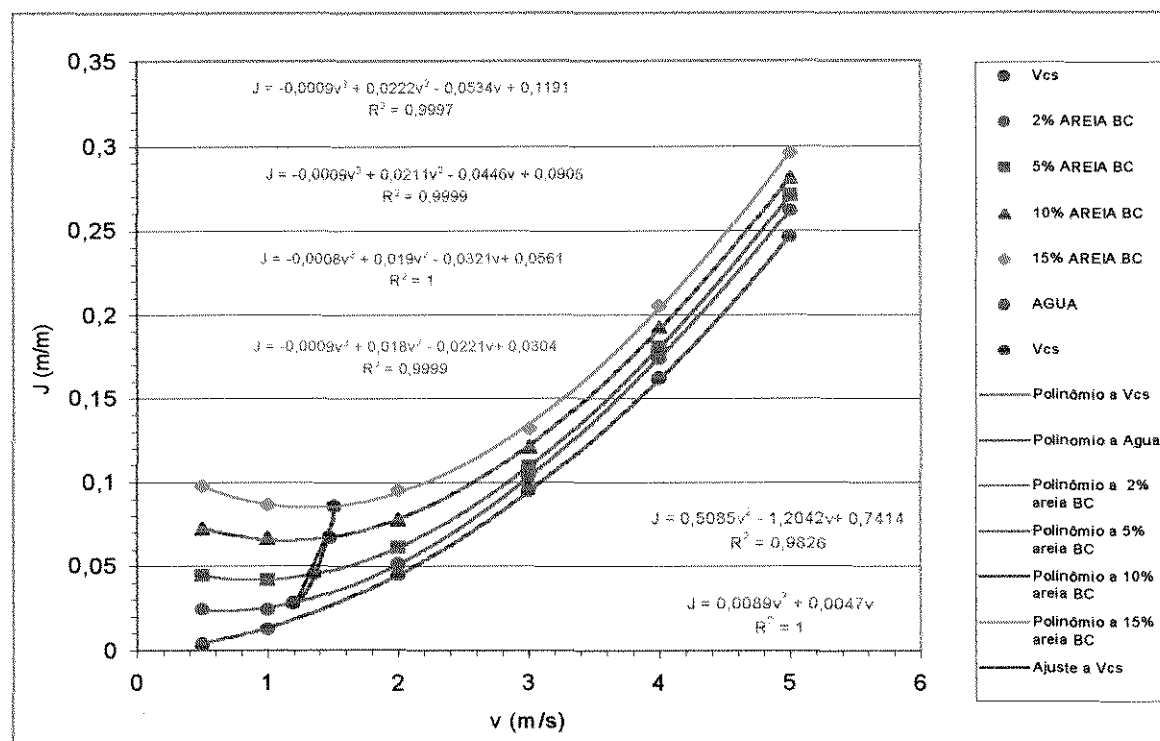


Figura 5.5.4.1 – Valores de J (m/m) em função de velocidade média do fluxo e da concentração média (areia BC) obtidos do programa FORTRAN. Valores de velocidade crítica de sedimentação obtidos do programa. E funções polinomiais de ajuste.

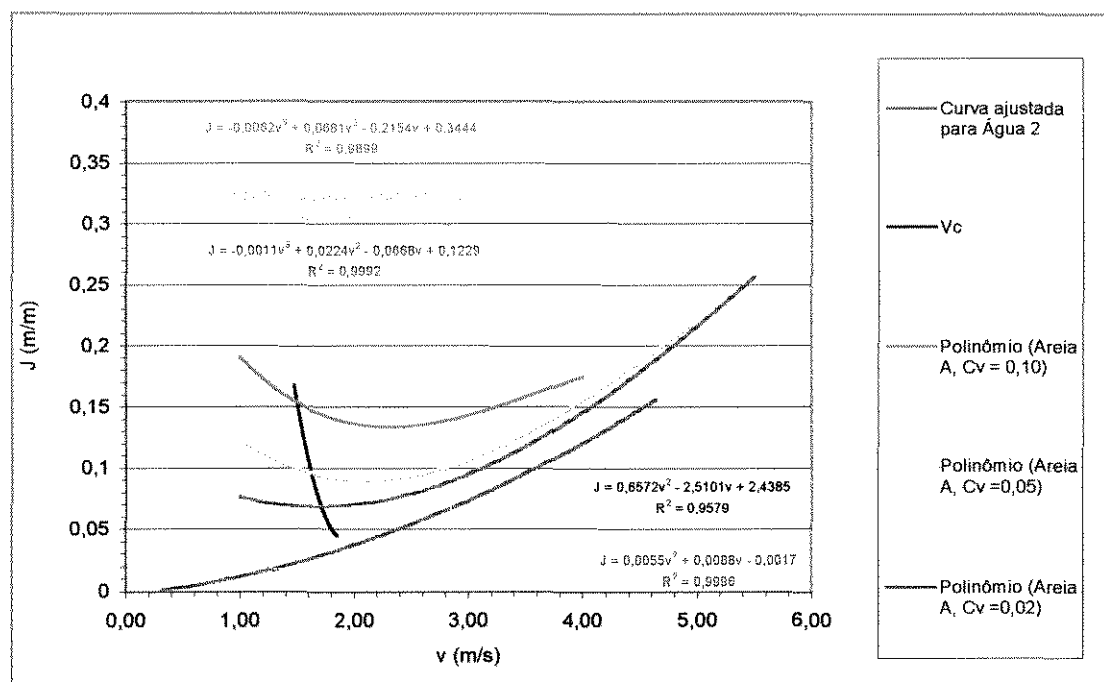


Figura 5.2.2.4 – Valores de J (m/m) em função de velocidade média do fluxo e da concentração média (areia A) ajustados aos valores interpolados e experimentais. Indicação do ajuste à velocidade crítica de sedimentação obtida experimentalmente.

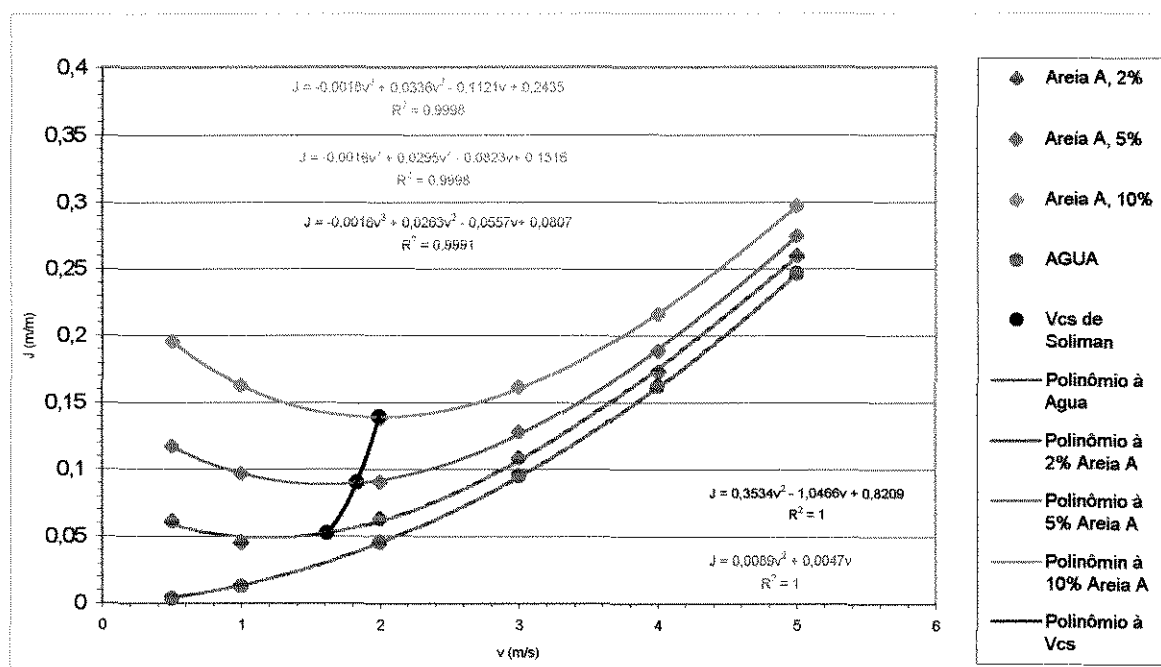


Figura 5.5.4.2 – Valores de J (m/m) em função de velocidade média do fluxo e da concentração média (areia A) obtidos do programa FORTRAN. Valores de velocidade crítica de sedimentação obtidos do programa. E funções polinomiais de ajuste.

5.6 – Fator de atrito de Fanning

Os resultados e conclusões sobre o fator de atrito de Fanning são apresentados a seguir para a água, fluxo de areia BC em água, fluxo de areia A em água, fluxo de areia em soluções de polímero e fluxo de soluções de polímero.

5.6.1 – Escoamento de água

O comportamento do fator de atrito de Fanning no tubo de PVC, após os ensaios com as areias pode ser observado na Figura 5.6.1.1 referente aos ensaios **Água 1**, **Água 2** e **Água 3**. Este gráfico apresenta os valores de f em função da velocidade média no tubo. Nesta Figura se observa, em altas velocidades, que o valor do fator de atrito do tubo novo (**Água 1**) diminuiu um pouco após os ensaios com areia BC (**Água 2**) e depois aumentou após os ensaios com areia A (**Água 3**), não voltando a atingir os valores do tubo novo.

Compara-se também o fator de atrito do tubo com a lei de atrito universal de Prandtl para tubos lisos dada pela equação: $(1/f)^{1/2} = 4,0 \log (Re \cdot f^{1/2}) - 0,40$, Equação esta comprovada para números de Reynolds até $3,4 \cdot 10^6$ por medidas de Nikuradse e confirmações posteriores, segundo Schlichting, H. (1972).

A Figura 5.6.1.2 estabelece esta comparação da lei universal de Prandtl com o tubo nos ensaios **Água 1**, **Água 2** e **Água 3**. Pode-se observar que os ensaios **Água 1** e **Água 3** forneceram dados que mais se aproximam da lei de Prandtl para tubos lisos. Observa-se também neste gráfico, a variação da inclinação da curva em função do polimento e do desgaste causados pelas areias BC e A, respectivamente. As declividades variaram de 2,476, para 8,975 e para 5,546, respectivamente nos ensaios **Água 1**, **Água 2** e **Água 3**.

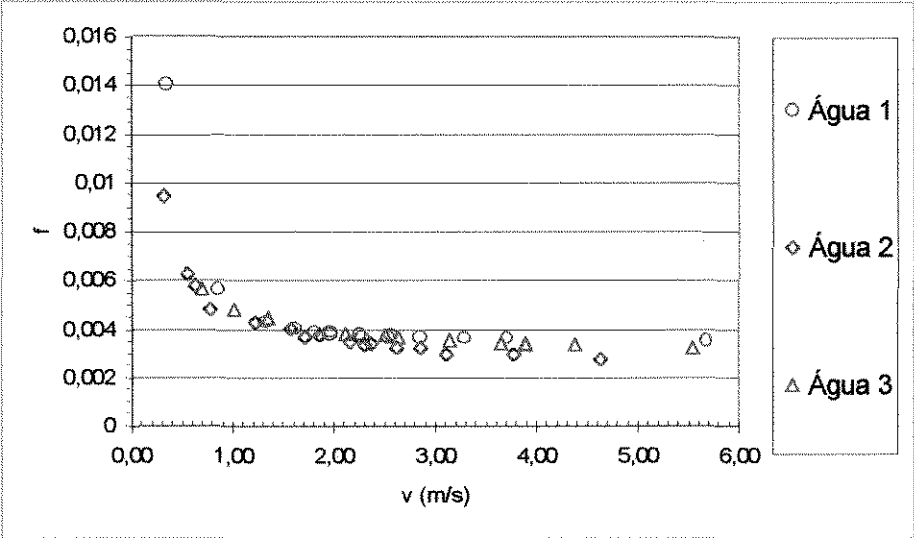


Figura 5.6.1.1 - Fator de atrito de Fanning em função da velocidade para tubo novo (Água 1) e após ensaios com areia BC (Água 2) e areia A (Água 3).

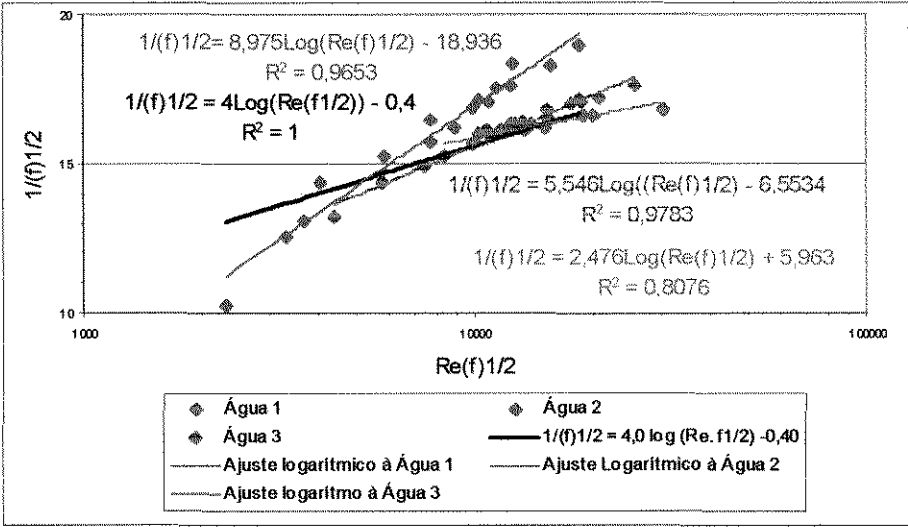


Figura 5.6.1.2 - Equação do fator de atrito de Fanning para tubo novo (Água 1) e após ensaios com areia BC (Água 2) e areia A (Água 3).

5.6.2 – Escoamento de Água + Areia BC

A partir das curvas de J em função da velocidade, para equiconcentrações de areia BC foram determinados os valores do fator de atrito de Fanning (f).

Na Figura 5.6.2.1 apresenta-se os valores de f em função da velocidade para concentrações constantes de areia BC.

Para velocidades altas o fator de atrito independe da concentração e da velocidade.

Para velocidades baixas, o fator de atrito depende da concentração e da velocidade. Este comportamento é semelhante ao de substâncias não Newtonianas com comportamento Plástico de Bingham observado em Wasp, E.J. (1977), página 78.

Observa-se também que no escoamento com leito de sedimentos, são elevados os valores de f e com o aumento da velocidade média do fluxo o valor de f diminui assintoticamente até atingir o valor obtido para a água limpa.

5.6.3 – Escoamento de Água + Areia A

A partir das curvas de $J = f(v)$ para equiconcentrações, obteve-se a Figura 5.6.3.1 de fator de atrito de Fanning em função da velocidade média no tubo. Desta Figura conclui-se:

O fator de atrito de Fanning assume valores muito maiores do que os obtidos para água limpa no escoamento com leito de sedimentos e diminui consideravelmente no escoamento de maiores velocidades até assintoticamente atingir os valores da água limpa.

Para velocidades altas o fator de atrito independe da concentração e da velocidade.

Para velocidades baixas o fator de atrito depende da concentração e da velocidade.

De modo semelhante ao que se verificou para fluxo de água e areia BC, o fator de atrito possui função semelhante ao que se observa em fluidos não Newtonianos, tipo plástico de Bingham.

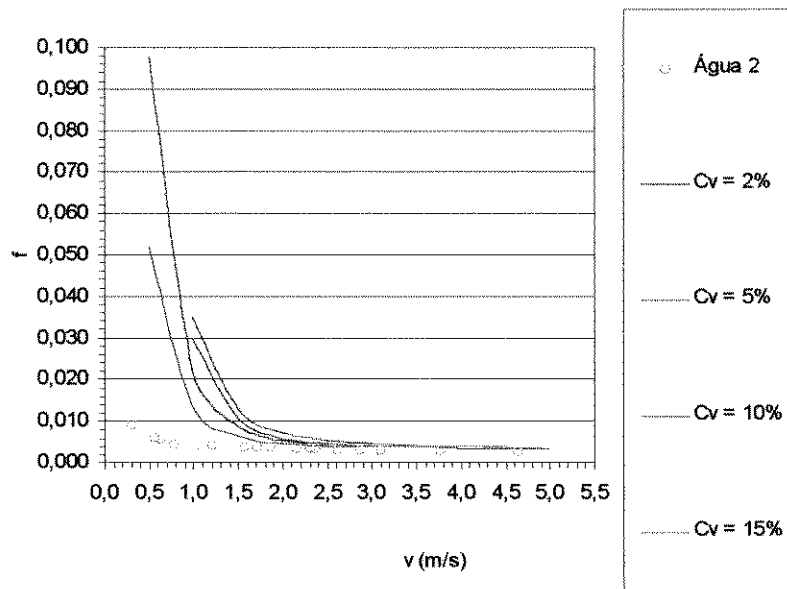


Figura 5.6.2.1.- Fator de atrito de Fanning em função da velocidade para fluxo de areia BC em água em concentrações iguais a 2%, 5%, 10% e 15%.

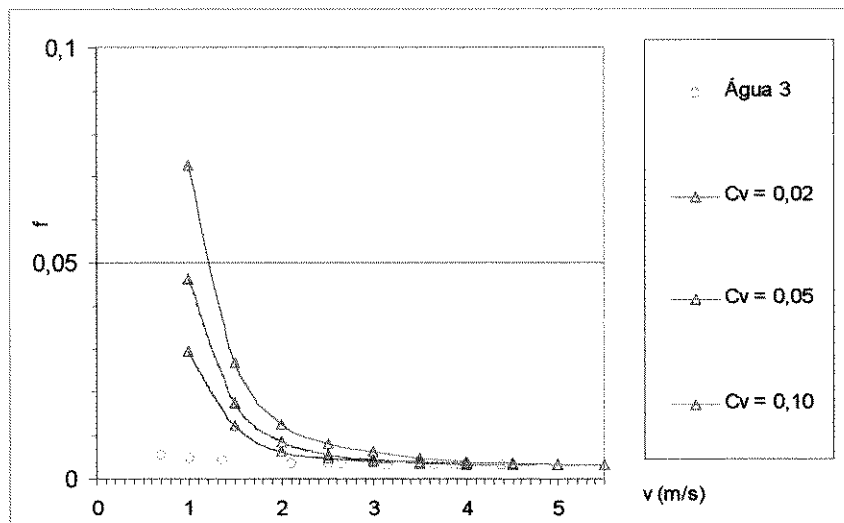


Figura 5.6.3.1 - Fator de atrito de Fanning em função da velocidade média para fluxo de areia A em água, em concentração de 2%, 5% e 10%.

5.6.4 – Escoamento de soluções de polímero e de soluções de polímero com areia BC

A Figura 5.6.4.1 apresenta o fator de atrito de Fanning em função da velocidade média do fluxo de solução de polímero a 100 ppm, 200 ppm e 400 ppm. Verifica-se neste gráfico que para toda a faixa obtida de velocidade, as soluções de polímero apresentam fator de atrito menor do que a água limpa. Maiores concentrações de polímero e maiores velocidades médias do fluxo, apresentam menor fator de atrito.

As Figuras 5.6.4.2 e 5.6.4.3 apresentam o fator de atrito de Fanning em função da velocidade média do fluxo para concentrações aproximadas de areia BC iguais a 5% e 15% em respectivamente 100 ppm e 400 ppm de polímero. Nestes gráficos se observa o alto fator de atrito no escoamento com leito de sedimentos. Para 100 ppm e 15% de areia BC, o fator de atrito atinge os valor da água em alta velocidade média de aproximadamente 6 m/s (Figura 5.6.4.2). Para 100 ppm e 5% de areia BC, atinge o valor da água em velocidade de 2,6 m/s e diminui em velocidades maiores (Figura 5.6.4.2).

Na Figura 5.6.4.3 observa-se que a 400 ppm, o transporte de 5% de areia BC apresenta redução do fator de atrito para valores menores do que os da água em velocidades superiores a 2,1 m/s. O transporte de 15% de areia BC apresenta valores de fator de atrito menores que os da água para velocidade superiores a 2,7 m/s. O que indica que maiores concentrações de areia exigem maior turbulência para garantir redução de arraste de valor menor que o arraste da água.

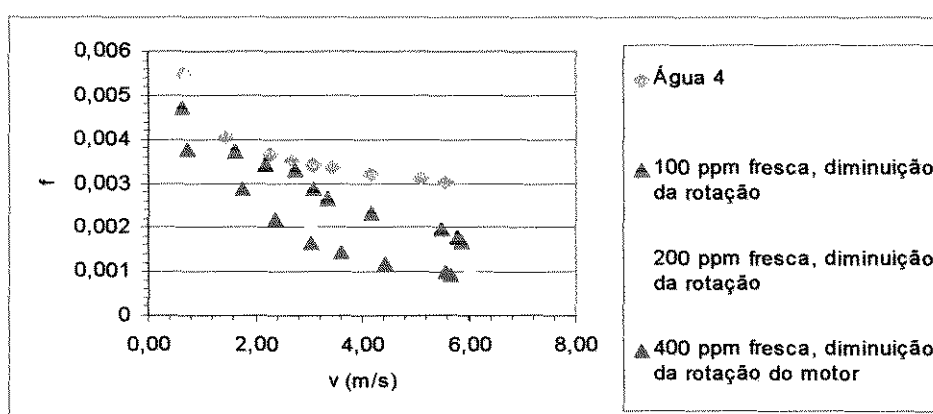


Figura 5.6.4.1 – Fator de atrito de Fanning em função da velocidade média do fluxo de solução de polímero a 100 ppm, 200 ppm e 400 ppm.

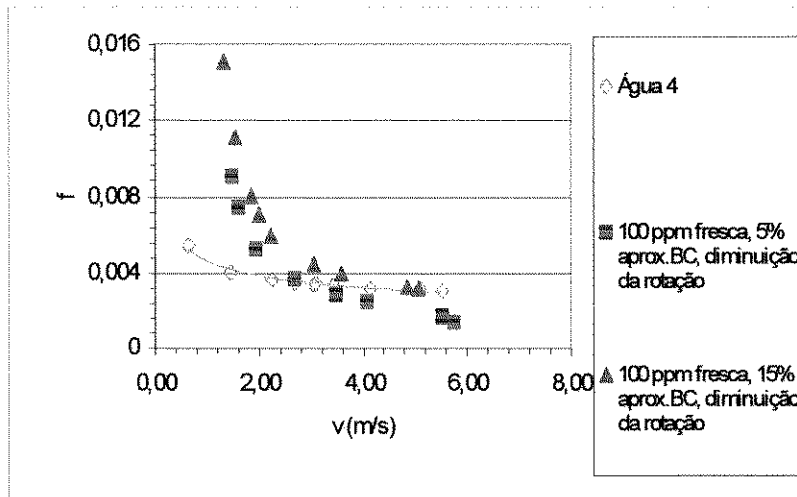


Figura 5.6.4.2 – Fator de atrito de Fanning em função da velocidade média do fluxo para 100 ppm de polímero e concentrações aproximadas de areia BC iguais a 5% e 15%.

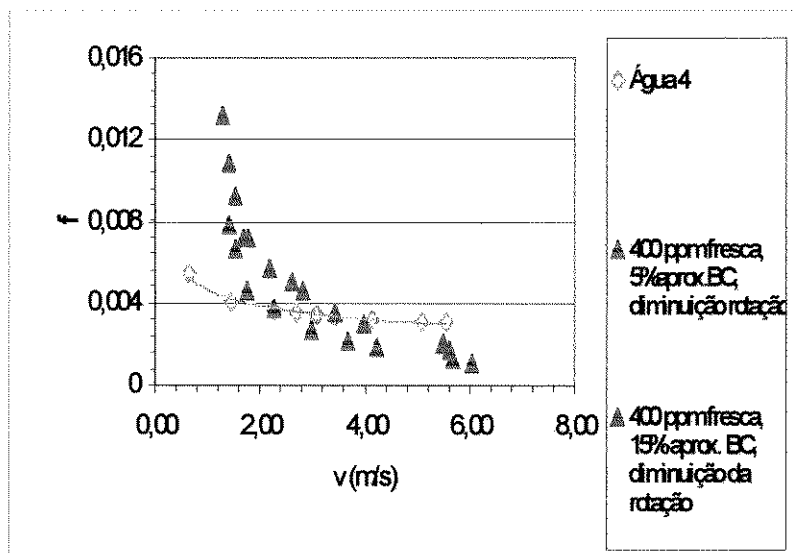


Figura 5.6.4.3 – Fator de atrito de Fanning em função da velocidade média do fluxo para 400 ppm de polímero e concentrações aproximadas de areia BC iguais a 5% e 15%.

5.7 - Distribuição vertical pontual de velocidades na seção do tubo

As Figuras A3-1, A3-2, A3-3, A3-4 e A3-5 constantes do ANEXO 3 representam a distribuição vertical de velocidades no tubo para as misturas de água e areia BC. Encontram-se indicadas as respectivas vazões, concentrações médias no tubo e o tipo de escoamento. Nas Figuras, os escoamentos foram abreviadamente denominados por leito, indicando a presença de um leito estacionário no fundo do tubo, ou crítico, indicando tratar-se de instante de transição e início de deposição no fundo do tubo, e finalmente a indicação turbulento referindo-se ao escoamento heterogêneo.

Para mistura de água e areia BC, observa-se nestas Figuras de distribuição vertical de velocidade, a não simetria em relação ao eixo central e longitudinal do tubo, como se verifica no escoamento de água sem areia.

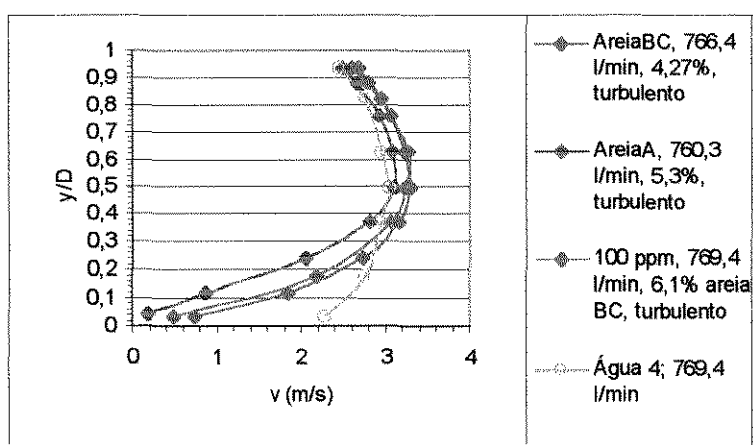


Figura 5.7.1 – Distribuição vertical de velocidade pontual de fluxo de água e areia BC, de fluxo de água e areia A e de fluxo de 100 ppm de polímero com areia BC, em vazão e em concentração de areia aproximadamente iguais.

Nas Figuras 5.7.1 e 5.7.2 apresentam-se as distribuições verticais de velocidade pontual de fluxo de água e areia BC, de fluxo de água e areia A e de fluxo de 100 ppm de polímero com areia BC, em vazão e em concentração de areia aproximadamente iguais. Nas Figuras 5.7.1, 5.7.2, 5.7.3, 5.7.4, 5.7.5 e 5.7.6 estão indicadas também para efeito de comparação, a distribuição teórica de velocidade pontual para fluxo de água, calculada pela lei logarítmica adimensional de distribuição de velocidade. As distribuições de velocidade foram obtidas com tubo de Pitot e os correspondentes valores de velocidades experimentais indicados não foram corrigidos, ou seja, as velocidades pontuais indicadas nos gráficos são maiores que as velocidades reais pontuais do fluxo pois não foram corrigidas pelo coeficiente do Tubo de Pitot.

Nas Figuras 5.7.1 e 5.7.2, observa-se que adição de 100 ppm de polímero à água com areia BC, causa uma distribuição de velocidade pontual de água e areia BC igual à distribuição de velocidade pontual de solução à 100 ppm com areia BC, para as vazões e

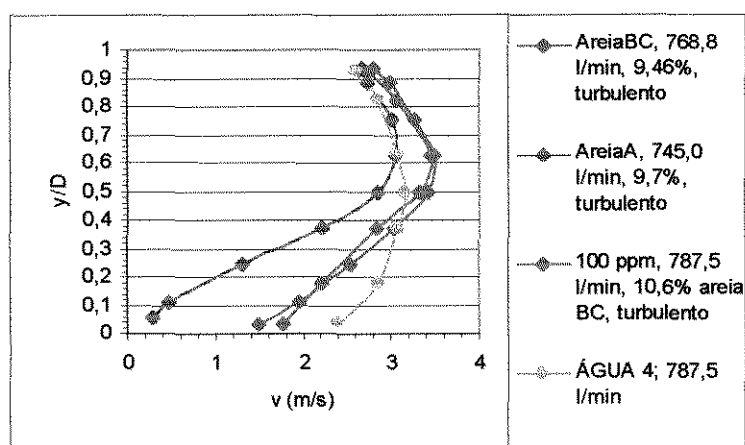


Figura 5.7.2 – Distribuição vertical de velocidade pontual de fluxo de água e areia BC, de fluxo de água e areia A e de fluxo de 100 ppm de polímero com areia BC, em vazão e em concentração de areia aproximadamente iguais.

concentrações médias indicadas. Embora as distribuições de velocidade sejam praticamente iguais, deve-se notar que para mesma vazão, a adição de polímero permite o transporte de maior concentração média de sólido. Na Figura 5.7.1, este aumento de concentração foi de

4,27% para 6,1%, ou seja, o aumento foi de 40%. Na Figura 5.7.2, o aumento foi de 9,46% para 10,6%, ou seja, o aumento foi de 12%.

Quando se compara os perfis de velocidade de areia com o perfil da água, observa-se que devido à distribuição de concentração de areia, crescente desde o topo à base do tubo, ocorre um retardamento na velocidade do fluido na base do tubo, com compensação de aumento de velocidade na parte superior da tubulação.

Na Figura 5.7.1, com concentração média de 5,0%, os perfis de velocidade da areia BC sem e com polímero, têm uma vazão média de 768 l/min, e a da areia A tem uma vazão de 760 l/min, portanto uma redução de 1% na vazão. Se compararmos as velocidades pontuais médias máximas dos perfis de areia BC (sem e com polímero) com a da areia A, observa-se que esta redução é cerca de 6%. Isto deve-se à maior granulometria da areia A do que da areia BC, que devido ao atrito, retarda a velocidade do fluxo da água.

Na Figura 5.7.2, com concentração média 10%, observa-se que para uma redução de 4% na vazão da areia BC (sem e com polímero) em relação a da areia A, observa-se uma redução de 17% na velocidade pontual máxima do fluxo com areia A.

Na Figura 5.7.2, a vazão média para fluxo de areia A igual a 745,0 l/min é menor do que a vazão de água, 787,5 l/min, porém ainda pode-se observar que a areia A causa diminuição de velocidade na base do tubo e uma compensação de aumento de velocidade na parte superior do tubo.

Comparando-se as Figuras 5.7.1 (5%) e 5.7.2 (10%), os perfis de velocidade da areia BC (sem e com polímero) e a da areia A ficam cada vez mais distintas da forma parabólica com o aumento da concentração, particularmente na parte inferior do tubo onde há uma tendência de distribuição linear de velocidade. Deve-se observar que nos dois gráficos, a vazão da areia A é menor que da areia BC e que a concentração da areia A é maior que da areia BC. De modo que as diferenças nos dois perfis deve também ser atribuída a estes fatores.

Na Figura 5.7.3 apresentam-se as distribuições verticais de velocidade pontual de fluxo de água e areia BC, de fluxo de água e areia A e de fluxo de 400 ppm de polímero com areia BC, na condição de velocidade crítica de sedimentação para concentrações aproximadas. Para concentração em torno de 4% de areia, a vazão média é maior para a areia BC do que para a areia A, ou seja, a velocidade crítica de sedimentação da areia BC

($d_{50} = 0,20$ mm) é maior que a velocidade crítica de sedimentação da areia A ($d_{50} = 1,30$ mm).

Durand, R. (1953), obteve para concentração volumétrica média de 5% de areia com $d = 0,42$ mm, o seguinte valor : $v_{cs} = 2,9$ m/s e para areia mais grossa $d = 2,04$ mm, $v_{cs} = 2,8$ m/s. Para concentração volumétrica média de 10% de areia com $d = 0,42$ mm, o seguinte valor : $v_{cs} = 3,05$ m/s e para areia mais grossa $d = 2,04$ mm, $v_{cs} = 2,95$ m/s.

Dos valores de v_{cs} obtidos por **Durand, R. (1953)**, e dos obtidos para as areias A e BC, observa-se que partículas de maior tamanho apresentam menor valor de v_{cs} do que partículas menores.

Na velocidade crítica de sedimentação em fluxo de suspensão polimérica com areia BC, as medições experimentais com tubo de Pitot posicionado nos pontos próximos ao fundo da tubulação, ficaram sujeitas a ocasionais interrupções devido à ocorrência de entupimentos. Estes entupimentos ocorreram devido à presença de sólido em solução de polímero. A solução polimérica aniônica possui a facilidade de agregar partículas sólidas e apesar do constante bombeamento e misturação no tanque principal, algum aglomerado de sólidos eventualmente causava o entupimento do tubo de Pitot, devido à maior concentração de sólidos na parte inferior do tubo. Devido a este fenômeno, apresenta-se incompleta a distribuição vertical de velocidades pontuais com 400 ppm de polímero, apresentada na Figura 5.7.3.

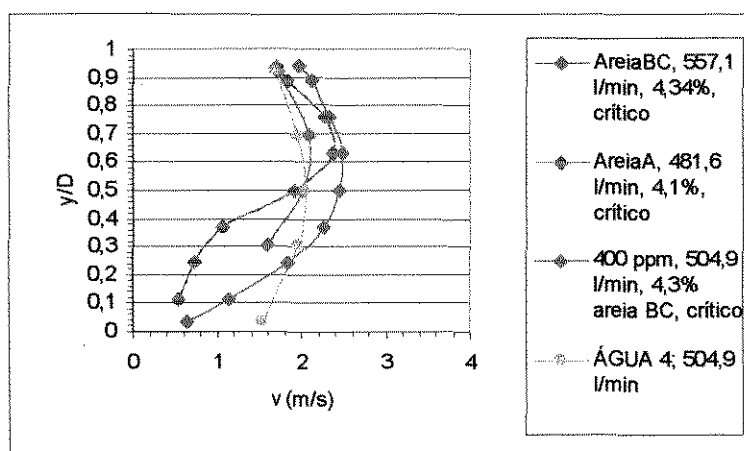


Figura 5.7.3 – Distribuição vertical de velocidade pontual de fluxo de água e areia BC, de fluxo de água e areia A e de fluxo de 400 ppm de polímero com areia BC, em velocidade crítica de sedimentação, para concentrações médias aproximadas.

Na Figura 5.7.3, observa-se que na condição de velocidade crítica de sedimentação para a areia A, devido à maior concentração de sólidos no fundo do tubo, a forma do perfil de velocidades altera-se em relação ao perfil em maiores velocidades (Figura 5.7.1).

Na Figura 5.7.4 apresentam-se as distribuições de velocidade pontual na condição de velocidade crítica de sedimentação para fluxo de água com areia BC e para fluxo de solução de 200 ppm de polímero com areia BC e em concentração média aproximada de 10% de areia BC.

Na Figura 5.7.5 apresentam-se as distribuições de velocidade pontual na velocidade crítica de sedimentação para fluxo de água com areia BC e para fluxo de solução de 400 ppm de polímero com areia BC e em concentração média aproximada de 16% de areia BC.

Das Figuras 5.7.3, 5.7.4 e 5.7.5, para a areia BC, pode-se observar que em presença de polímero, a vazão correspondente à velocidade crítica de sedimentação é menor do que em presença de água. Conclui-se portanto que para igual concentração de sólidos, a solução polimérica necessita de menor velocidade média de transporte do que o fluxo de água sem polímero.

Da Figura 5.7.4, concentração de 10%, observa-se que os perfis de velocidade para a areia BC (sem e com polímero) são aproximadamente lineares na metade inferior do tubo. Já nas Figuras 5.7.5 e 5.7.6, para a concentração de 15%, estes perfis são aproximadamente lineares na região abaixo de $y/D = 0,6$. Este fato indica uma tendência de aumento da linearidade da distribuição de velocidade com o aumento da concentração.

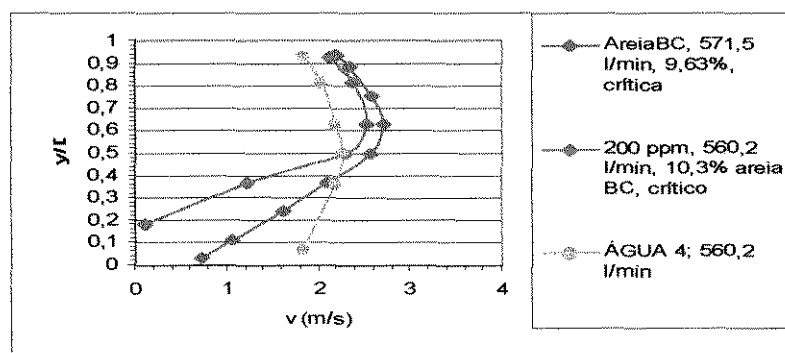


Figura 5.7.4 – Distribuição vertical de velocidade pontual de fluxo de água e areia BC e de fluxo de 200 ppm de polímero com areia BC, em velocidade crítica de sedimentação, para concentrações médias aproximadas.

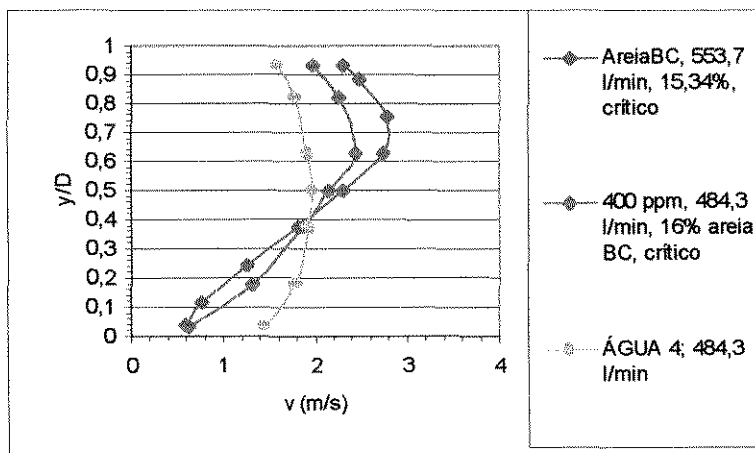


Figura 5.7.5 – Distribuição vertical de velocidade pontual de fluxo de água e areia BC e de fluxo de 400 ppm de polímero com areia BC, em velocidade crítica de sedimentação, para concentrações médias aproximadas.

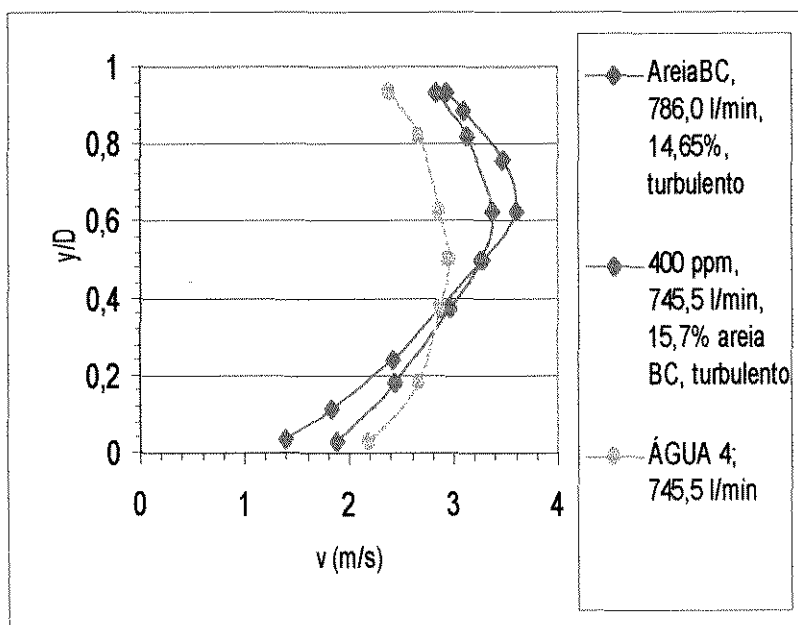


Figura 5.7.6 – Distribuição vertical de velocidade pontual de fluxo de água e areia BC e de fluxo de 400 ppm de polímero com areia BC, em vazão e em concentração de areia aproximadas.

5.8 – Perfil adimensional de velocidades pontuais

O perfil adimensional de velocidades pontuais caracteriza-se pela função $u^+ = f(y^+)$. Para as misturas sólido-líquido, esta função será discutida inicialmente tratando do escoamento de água e areia BC, depois, abordando o escoamento de água e areia A e finalmente realizando comparação dos dois escoamentos anteriores com o escoamento de solução polimérica com areia BC.

5.8.1 - Escoamento de água e areia BC

As Figuras A2-1, A2-2, A2-3, A2-4, A2-5, A2-6, A2-7, A2-8 e A2-9, constantes do ANEXO 2, representam os valores pontuais de u^+ em função de y^+ de fluxo de misturas de água e areia BC, em conjunto com a curva para a água das duas camadas Newtonianas : sub camada laminar ($u^+ = y^+$) e centro turbulento ($u^+ = 2,5 \ln y^+ + 5,5$).

Observou-se nestas curvas que pontos situados na parte superior do tubo e acima do ponto de máxima velocidade pontual, apresentaram nenhuma alteração no comprimento de mistura, ou seja no valor da constante de Von Karman. Nesta região, alta vazão como 816,9 l/min e concentração média de 8,67%, Figura A2.5, na parte superior do tubo não houve alteração no comprimento de mistura, sendo igual ao da água e os valores de velocidade adimensional mantiveram-se praticamente iguais ao da água. Na Figura A2.5 observa-se que também baixa vazão como 488,2 l/min no escoamento com leito de sedimentos apresenta na parte superior do tubo uma constante de Von Karman constante igual a 0,4.

Os pontos u^+ e y^+ obtidos experimentalmente com a água, situaram-se sobre a curva $u^+ = 2,5 \ln y^+ + 5,5$. Para misturas de água e areia o gráfico da função $y^+ = f(u^+)$ não se apresenta através de uma única função. Pontos acima da posição y^+ correspondente ao máximo valor de u^+ definem praticamente uma função com mesma inclinação da obtida para a água limpa (ou seja $K =$ constante de Von Karman $= 0,4$). Pontos situados abaixo deste máximo valor de u^+ definem outra função com diferente inclinação e função da velocidade média do fluxo e da concentração média de sólidos.

O perfil adimensional de velocidades pontuais medido em água na presença de sólidos, sofre a influência da granulometria uniforme ou não do sólido, da concentração média e do tipo de escoamento. O escoamento de fluido com areia BC trata-se de um escoamento com partícula sólida de granulometria não uniforme.

O gradiente de concentração de sólidos ao longo da vertical deforma o perfil de velocidade. Tal perfil deixa de ser simétrico, apresentando velocidade máxima acima do centro do tubo e em posição que depende da velocidade média e da concentração média de sólidos presente no fluxo.

Pontos situados a partir da máxima velocidade para posições inferiores, vazão alta ou baixa e concentrações menores que cerca de 14,7% de areia BC apresentam comprimento de mistura aproximadamente constante (redução na constante de Von Karman) até uma região próxima à parede do tubo, e, para concentrações maiores que 14,7%, o comportamento da velocidade adimensional u^+ assume comportamento semelhante ao da subcamada laminar (ou viscosa).

Assim para as diversas vazões ensaiadas, baixas e altas vazões e concentrações médias menores que 14,7%, o perfil adimensional de velocidades para fluxo de água e areia BC parece apresentar-se composto das seguintes camadas, desde a posição superior do tubo até a mínima posição inferior do tubo: subcamada laminar até $y^+ = 11,6$; centro turbulento com comprimento de mistura constante (constante de Von Karman igual a 0,4) até o ponto de velocidade pontual máxima; centro turbulento com comprimento de mistura (kks) constante e menor que 0,4; e subcamada laminar com equacionamento do tipo: $u^+ = (kls)y^+$; para pontos próximos à parede, podendo ou não se estender à parede, o que não pode ser definitivamente afirmado uma vez que o tubo de Pitot possui a limitação de não efetuar medições muito próximas à parede do tubo.

Para vazões baixas ou altas e grandes concentrações médias no tubo superiores a 14,7% de areia BC, observa-se a partir dos valores obtidos experimentalmente, que pontos de velocidade adimensional u^+ situados em posições inferiores ao seu valor máximo, definem uma função que diferencia-se daquela verificada para a água limpa e apresentam comportamento semelhante ao da subcamada laminar de água limpa. Para a água limpa a equação da subcamada laminar é a seguinte: $u^+ = y^+$. O comportamento semelhante

observado em presença de areia BC pode ser equacionado da seguinte forma : $u^+ = (kls) y^+$, onde kls é um valor constante..

Assim para as diversas vazões ensaiadas, baixas e altas vazões e concentrações médias superiores a 14,7%, o perfil adimensional de velocidades para fluxo de água e areia BC parece apresentar-se composto das seguintes camadas, desde a posição superior do tubo até a mínima posição inferior do tubo: subcamada laminar até $y^+ = 11,6$; centro turbulento com comprimento de mistura constante (constante de Von Kármán igual a 0,4) até o ponto de velocidade pontual máxima; e subcamada laminar com equacionamento do tipo : $u^+ = (kls) y^+$; até pontos próximos à parede do tubo, a qual pode ou não se estender até à parede onde $y^+ = 0$, e consequentemente, $u^+ = 0$.

A partir dos diversos perfis adimensionais de velocidade pontual $u^+ = f(y^+)$ obtidos nos testes experimentais, para concentrações médias menores que 14,7%, com valores de vazão média, e de concentração de areia BC, foram ajustadas curvas às subcamadas situadas nas posições inferiores ao ponto de máxima velocidade do fluxo. Tais camadas podem ser vistas na Figura 5.8.1.1.

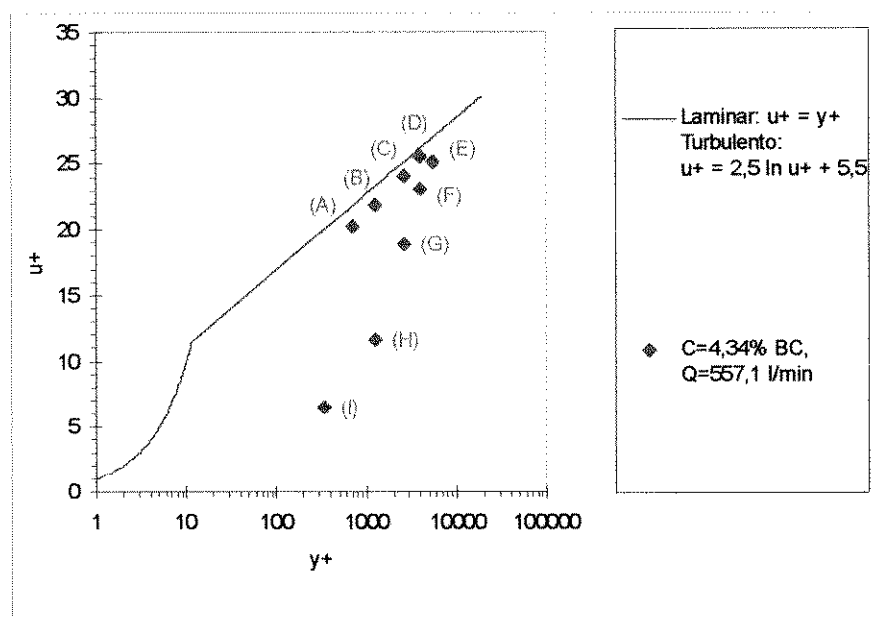


Figura 5.8.1.1 – Distribuição vertical de velocidade pontual adimensional obtido para fluxo médio de 557,1 l/min de mistura de água e areia BC à concentração volumétrica de 4,34%.

Na Figura 5.8.1.1, os pontos A, B, C, D, E, F, G, H e I nesta ordem, são as posições ocupadas pelo ponto de estagnação do tubo de Pitot, numa vertical passando pelo centro do tubo. A posição central do tubo portanto refere-se ao ponto E.

Os pontos A, B, C, D, E, F, G, H e I correspondem respectivamente, em relação ao centro do tubo às posições em milímetros iguais a +34; +30; +20; +10; 0; -10; -20; -30; e -36,5. As posições positivas situam-se na metade superior do tubo e as negativas, na metade inferior da tubulação.

O ajuste logarítmico realizado com os pontos E, F e G, apresenta-se na Figura 5.8.1.2 e o ajuste linear realizado com os pontos G, H e I, na Figura 5.8.1.3. Observa-se nas equações de ajuste apresentadas nas Figuras 5.8.1.2 e 5.8.1.3, um coeficiente de correlação alto.

O ajuste aos pontos E, F e G, refere-se à uma subcamada com comportamento semelhante ao centro turbulento da água com comprimento de mistura (kks) igual a $1/8,9137$, ou seja, igual a $0,112$. O ajuste aos pontos G, H e I, indicam que nesta subcamada o comportamento da função $u^+ = f(y^+)$ é linear e apresenta uma inclinação igual a $k_{ls} = 0,0054$.

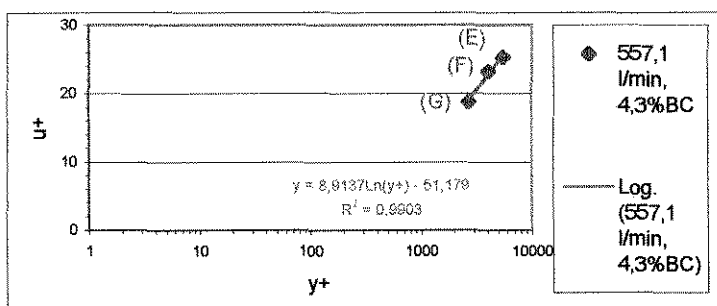


Figura 5.8.1.2 – Ajuste logarítmico aos pontos E, F e G.

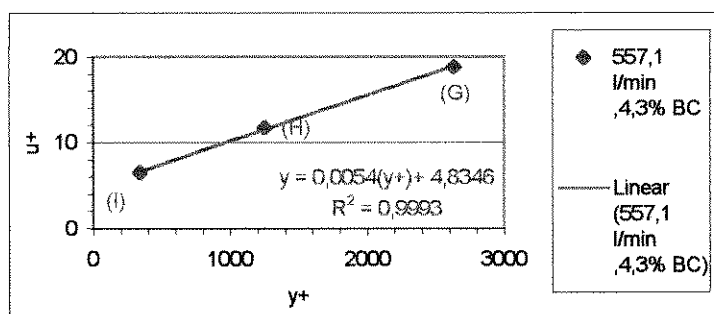


Figura 5.8.1.3 – Ajuste linear aos pontos G, H e I.

Os ajustes descritos através das Figuras 5.8.1.2 e 5.8.1.3 e realizados para o perfil adimensional da Figura 5.8.1.1, foram realizados também para todos os outros perfis adimensionais obtidos experimentalmente para misturas de água e areia BC.

Na tabela 5.8.1.1 encontram-se os resultados destes ajustes. Para cada perfil de velocidade indica-se a vazão ensaiada, sua correspondente concentração média, o inverso do comprimento de mistura, a constante de Von Karman kks para a mistura, a inclinação da reta kls e a descrição do tipo de escoamento.

Para os três valores de vazão média, correspondentes aos três tipos de escoamentos denominados por leito, crítico e turbulento, respectivamente referentes ao leito de sedimentos, velocidade crítica de sedimentação e escoamento heterogêneo, foram construídos os gráficos de kks em função de C_v . Estes gráficos são apresentados simultaneamente na Figura 5.8.1.4.

Na Figura 5.8.1.4, observa-se que na velocidade crítica de sedimentação e no turbulento existe uma função entre a constante de Von Kármán (kks) e a concentração média de sólidos (C_v). Os polinômios apresentados como resultado de ajuste aos diversos pontos de vazão da tabela 5.8.1.1, tanto para o escoamento na crítica de sedimentação como no turbulento, são portanto polinômios obtidos para uma vazão média respectivamente igual a (557 ± 28) l/min e (784 ± 24) l/min.

Tabela 5.8.1.1- Valores de kks e kls para Cv menores que 14,7% de areia BC.

	Vazão	Concentração	Inverso do	Constante de	Comp Mistura	Descrição
	Q	Media	Comp. Mistura	Von Karman	Laminar	do tipo de
	(l/min)	Cv	Turbulento	kks	kls	escoamento
	410,3	0,042	6,117	0,16	0,0072	leito
	468,1	0,037	15,573	0,06	0,0052	leito
	488,2	0,090	15,095	0,07	0,0026	leito
	497,1	0,046	13,430	0,07	0,0042	leito
média	465,9					
desvp	39,0					
	497,7	0,025	7,112	0,14	0,0079	crítico
	552,3	0,053	11,048	0,09	0,0045	crítico
	557,1	0,043	8,914	0,11	0,0054	crítico
	564,4	0,049	9,732	0,10	0,0051	crítico
	571,5	0,096	12,071	0,08	0,0035	crítico
	573,9	0,077	11,933	0,08	0,0041	crítico
	584,3	0,063	11,446	0,09	0,0051	crítico
média	557,3					
desvp	28,4					
	757,2	0,118	10,666	0,09	0,0025	turbulento
	766,4	0,043	6,505	0,15	0,0084	turbulento
	768,8	0,095	9,641	0,10	0,003	turbulento
	786,0	0,146	8,769	0,11	0,0027	turbulento
	807,6	0,152	9,114	0,11	0,0021	turbulento
	816,9	0,087	10,122	0,10	0,0026	turbulento
média	783,8					
desvp	24,1					

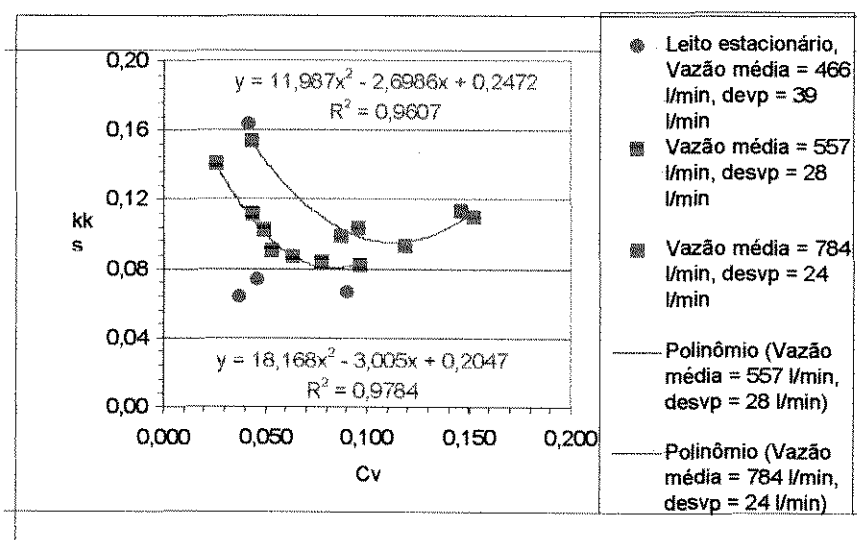


Figura 5.8.1.4 – Relação entre kks, Cv e vazão média.

Para o escoamento de leito de sedimentos, os valores de $k_{ks} = f(C_v)$ parecem seguir também o mesmo tipo de polinômio na parte inferior da Figura 5.8.1.4, porém, devido à grande dispersão de todos os valores de k_{ks} determinados para o leito de sedimentos por ajuste com mesma metodologia e procedimento, optou-se pela apresentação única dos valores obtidos, sem a realização de um ajuste aos pontos. Se a metodologia for um pouco modificada provavelmente encontrar-se-á um polinômio para $k_{ks} = f(C_v)$ referente ao escoamento de leito de sedimentos. Observando-se a Figura A2-5, APÊNDICE 2, onde se apresenta duas vazões distintas para uma concentração média aproximadamente igual de areia BC, nota-se em vazão maior, uma curvatura mais acentuada no ponto de máxima velocidade do que em menor vazão. Também observa-se que em maior vazão a região de comprimento de mistura constante é mais evidente do que na menor vazão devido à diferença de curvatura no ponto de máxima velocidade.

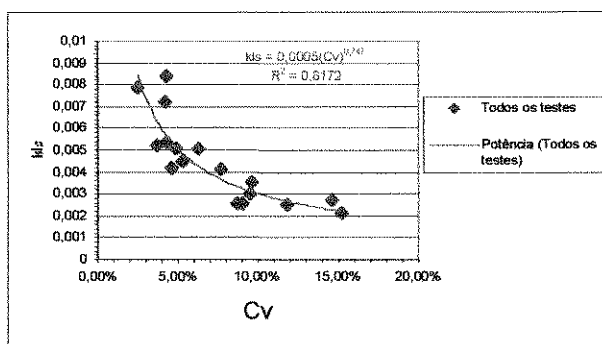


Figura 5.8.1.5 – Influência da concentração média de areia BC sobre k_{ks} .

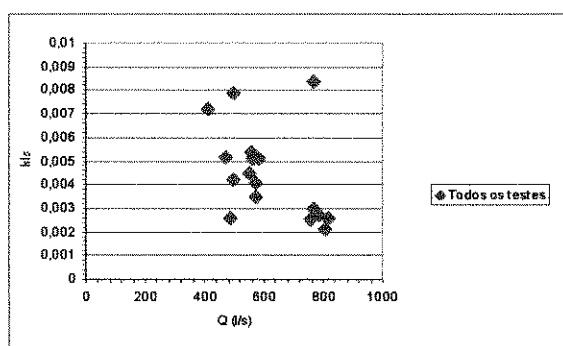


Figura 5.8.1.6 – Influência da vazão média de areia BC sobre os valores k_{ks} .

A partir dos valores de kls da tabela 5.8.1.1 foram construídos as Figuras 5.8.1.5 e 5.8.1.6, respectivamente para ilustração dos efeitos da vazão e da concentração sobre seus valores (kls). Na Figura 5.8.1.5 observa-se que existe influência da concentração de sólidos sobre kls, de modo que para maiores concentrações médias de areia BC, menores serão os valores de kls. Na Figura 5.8.1.6, pode-se deduzir que não há influência da vazão sobre os valores de kls. Conclui-se assim que os valores de kls são mais fortemente determinados pela intensidade de concentração de sólidos do que pelo valor da vazão.

Para concentrações maiores que 14,7% de areia BC, foram determinados os valores de kls por ajuste linear aos pontos E, F, G, H e I. Estes valores encontram-se na tabela 5.8.1.2.

A Figura 5.8.1.7 apresenta estes valores de kls para concentrações maiores que 14,7% de areia BC em função da vazão média do fluxo e observa-se pequena variação entre os valores de kls para as vazões ensaiadas.

Tabela 5.8.1.2- Valores de kls para concentrações maiores que 14,7% de areia BC

Vazão	Concentração	kls
	Media	
Q (l/min)	Cv	
807,6	0,152	0,0019
710,4	0,154	0,0021
464	0,149	0,0023
553,7	0,153	0,0025
Cv médio =	0,152	
desvp(Cv) =	0,00216	

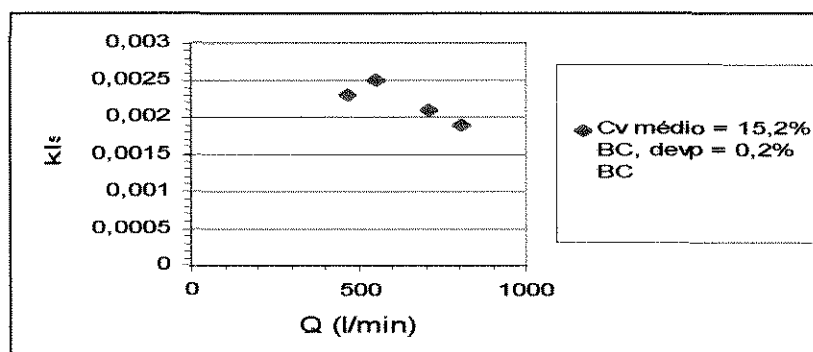


Figura 5.8.1.7 – Valores de kls para Cv maiores que 14,7% de areia BC.

Einstein et al (1955) apud Graf, W.H. (1971) página 183, divide o fluxo de mistura sólido-líquido em duas zonas: uma zona de fluido leve com pequenas concentrações e uma zona de fluido pesado, de maiores concentrações. Segundo o autor, para a zona de fluido leve, aplica-se uma equação de velocidade adimensional u/u^* , logarítmica semelhante à da água limpa, com diferentes constantes numéricas. E para a outra zona de fluido pesado, aplica-se outra equação de velocidade adimensional u/u^* , também logarítmica dependente da rugosidade do tubo, da densidade do fluido e do sólido, e da concentração.

Yano et al (1969) apud Graf, W.H. (1971) página 183, em estudo teórico e experimental mostrou que a distribuição de velocidade, modificada pela presença de leito móvel de sólidos, desvia-se da expressão logarítmica perto do leito, e sugeriu que este desvio ocorre devido à tensão de cisalhamento que é gerada pela rotação das partículas sólidas.

Nesta pesquisa, para fluxo de água e areia BC, verificou-se que para concentrações médias superiores a aproximadamente 14,7%, na zona de fluido pesado, a função de velocidade adimensional diferencia-se de uma lei logarítmica e apresenta comportamento semelhante ao da subcamada laminar de água limpa. Para a água limpa a equação da subcamada laminar é a seguinte: $u^+ = y^+$. O comportamento semelhante observado em presença de areia BC pode ser equacionado da seguinte forma: $u^+ = (kls) y^+$, conforme verificado anteriormente.

5.8.2 – Escoamento de água e areia A

As Figuras A2-10, A2-11, A2-12 e A2-13, constantes do ANEXO 2, apresentam os valores de u^+ em função de y^+ de misturas de água e areia A.

De todos os testes realizados com água e areia A, conclui-se que na zona de fluido leve tem-se comprimento de mistura constante, ou seja constante de Von Karman igual a 0,40. Conclusão idêntica foi observada no escoamento de água e areia BC e também no escoamento de soluções de polímero com areia BC.

Na zona de fluido leve, para uma mesma vazão média, quanto maior for a concentração média transportada, menores são as velocidades adimensionais pontuais, para os escoamentos leito de sedimentos e heterogêneo (Figuras A2-12 e A2-13).

Na zona de fluido pesado, pequenas concentrações em torno de 1% de areia A em água, mantém comprimento de mistura praticamente constante até u^+ aproximadamente igual a 5 (Figura A2-10).

Na Figura A2-11, observa-se que em concentração aproximada de 5% de areia A, no escoamento turbulento, tem-se comprimento de mistura constante na zona de fluido pesado até $u^+ = 7$, aproximadamente o que indica uma função $u^+ = f(y^+)$ do tipo logarítmica. E na condição de velocidade crítica de sedimentação, escoamento com menor velocidade média, a zona de fluido pesado adquire forma diferenciada com $u^+ = f(y^+)$ do tipo linear (semelhante ao comportamento da subcamada viscosa).

Na Figura A2-12, ANEXO 2, pode-se observar o efeito do aumento da concentração nas zonas de fluido leve e fluido pesado. A região de comprimento de mistura igual a 0,4 (zona de fluido leve), torna-se mais estreita com o aumento da concentração média. Na zona de fluido pesado, as concentrações de 4,1% e 29,8% apresentam $u^+ = f(y^+)$ do tipo linear (semelhante ao comportamento da subcamada viscosa).

5.8.3 – Escoamento de água e areias BC e A, e escoamento de areia BC em solução de polímero

Nas Figuras 5.8.3.1, 5.8.3.2, 5.8.3.3, 5.8.3.4, 5.8.3.5 e 5.8.3.6 apresenta-se o perfil adimensional de velocidade $u^+ = f(y^+)$ para vazão e concentração aproximadas no escoamento heterogêneo de misturas sólido-líquido. Nestes gráficos encontram-se representadas as curvas teóricas de $u^+ = f(y^+)$ para escoamento de água limpa e para escoamento em máxima redução de arraste (perfil limite máximo).

Observa-se nestas Figuras o comprimento de mistura constante na zona de fluido leve para todos os tipos de mistura sólido-líquido. A velocidade adimensional u^+ em presença de polímero é sempre maior do que na mistura sem polímero. Na zona de fluido pesado observa-se a diminuição do comprimento de mistura em todos os tipos de mistura apresentados.

Observa-se nestas Figuras a redução de arraste causada pela presença de polímero, caracterizada pelo deslocamento da curva da areia BC em presença de polímero, para cima (zona de fluido leve) e para a esquerda (zona de fluido pesado), indicando a presença de zona elástica. Enquanto a curva adimensional de areia BC sem polímero situa-se sempre abaixo (zona de fluido leve) e à direita (zona de fluido pesado).

Nas Figuras 5.8.3.1 e 5.8.3.2 apresenta-se o perfil adimensional de velocidade $u^+ = f(y^+)$ para vazão e concentração aproximadas no escoamento heterogêneo de areias A e BC em água e em solução de 100 ppm de polímero.

Nestes gráficos, observa-se na zona de fluido leve que a areia BC possui maior velocidade adimensional u^+ do que a areia A. Este efeito é atribuído à diferença entre as granulometrias das areias BC e A. Na zona de fluido leve, a velocidade pontual do fluxo de areia BC é maior que a velocidade pontual do fluxo de areia A, enquanto que a perda de carga do fluxo de areia A é maior que a da areia BC. Observa-se que estes dois efeitos são somados causando a maior velocidade adimensional do fluxo de areia BC.

Na zona de fluido pesado, a areia BC também apresenta maior velocidade adimensional do que a areia A. Devido ao maior atrito, a areia A causa maior retardamento na velocidade do fluxo da água do que a areia BC.

Na Figura 5.8.3.1, observa-se na zona de fluido pesado que o comprimento de mistura para a concentração aproximada de 5%, para todas as misturas permanece praticamente constante e de mesmo valor para todas as misturas.

Na Figura 5.8.3.2, observa-se na zona de fluido pesado que o comprimento de mistura para a concentração aproximada de 10%, para todas as misturas permanece praticamente constante e de mesmo valor para todas as misturas até o valor aproximado de $u^+ = 15$.

Na Figura 5.8.3.3 apresenta-se o perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ para a condição de velocidade crítica de sedimentação de areias A e BC em água e em solução de 400 ppm de polímero.

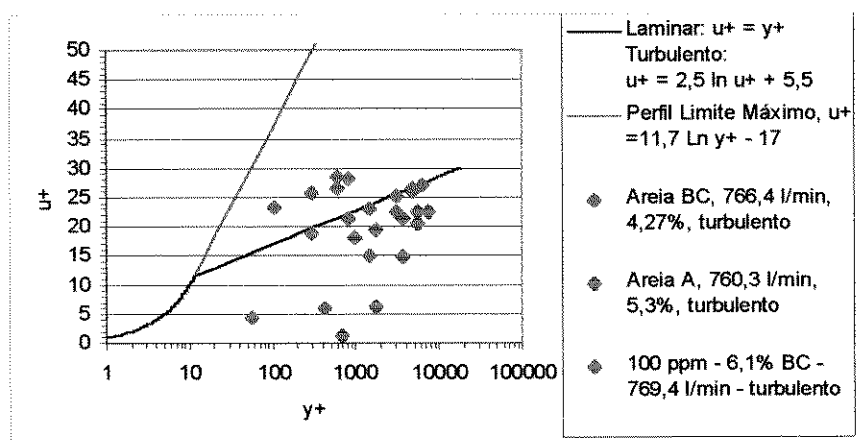


Figura 5.8.3.1 – Perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ para vazão e concentração aproximadas no escoamento heterogêneo de areias A e BC em água e em solução de 100 ppm de polímero.

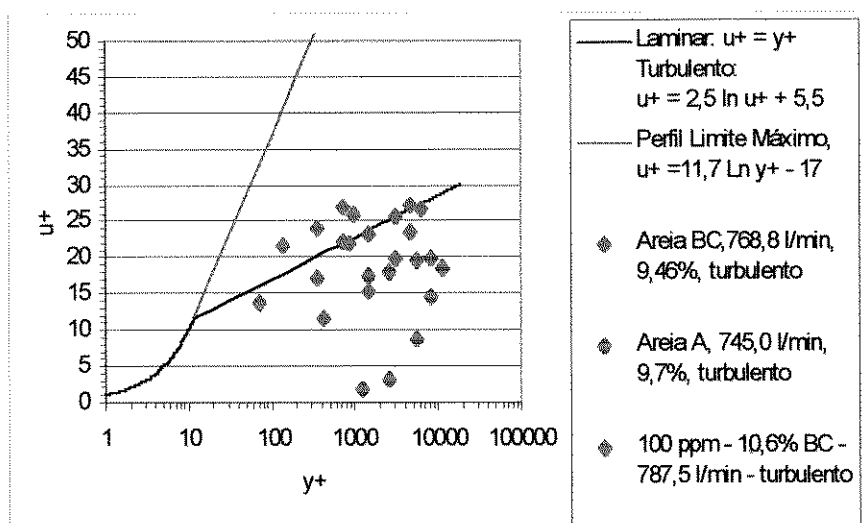


Figura 5.8.3.2 - Perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ para vazão e concentração aproximadas no escoamento heterogêneo de areias A e BC em água e em solução de 100 ppm de polímero.

Nesta Figura observa-se que na condição crítica de sedimentação e nas zonas de fluido leve e de fluido pesado, a areia BC apresenta maior velocidade adimensional que a areia A. Este fato ocorre porque a areia A retarda a velocidade do fluido mais que a areia

BC ou porque a perda de carga do fluxo de areia A é maior que a perda de carga do fluxo de areia BC.

Nas Figuras 5.8.3.4 e 5.8.3.5, apresenta-se o perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ na condição de velocidade crítica de sedimentação de areia BC em água e em concentrações aproximadas de 10% e 16% de areia respectivamente em solução de 200 ppm e 400 ppm de polímero. Nestes gráficos, observa-se que a adição de polímero diminui a vazão de transporte para uma mesma concentração de sólidos, além de diminuir o atrito e aumentar a velocidade adimensional do fluxo.

Na Figura 5.8.3.5 observa-se que a adição de polímero modifica a forma da função $u^+ = f(y^+)$ transformando-a (na zona de fluido pesado) de linear para logarítmica, aumentando a região de comprimento de mistura constante.

A Figura 5.8.3.6 ilustra o perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ para vazão e concentração aproximadas no escoamento heterogêneo de areia BC em água e em solução de 400 ppm de polímero. Observa-se que a adição de polímero neste escoamento aumenta a velocidade adimensional tanto na zona de fluido leve como na zona de fluido pesado, de modo que na zona de fluido pesado a função $u^+ = f(y^+)$ segue à da água limpa.

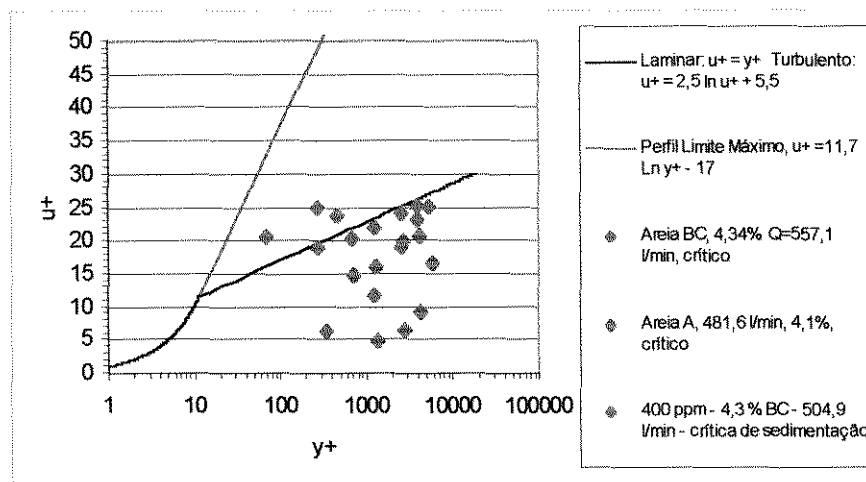


Figura 5.8.3.3 - Perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ para a condição de velocidade crítica de sedimentação de areias A e BC em água e em solução de 400 ppm de polímero.

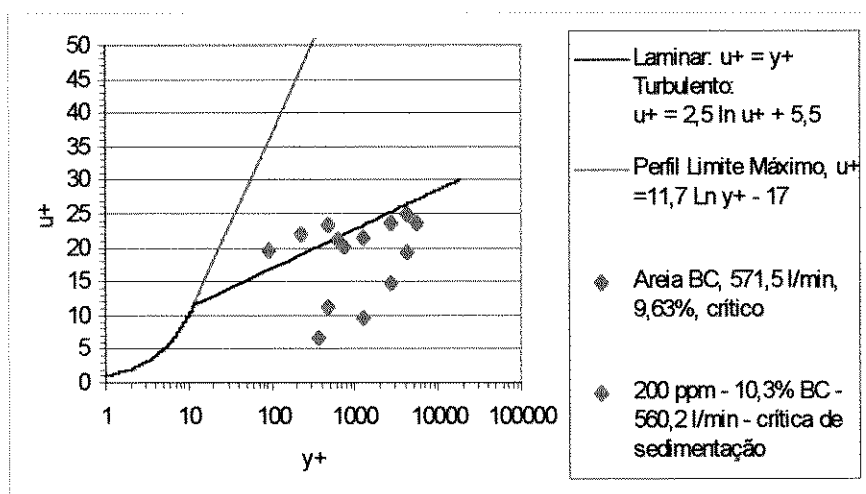


Figura 5.8.3.4 - Perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ para vazão e concentração aproximadas na condição de velocidade crítica de sedimentação de areia BC em água e em solução de 200 ppm de polímero.

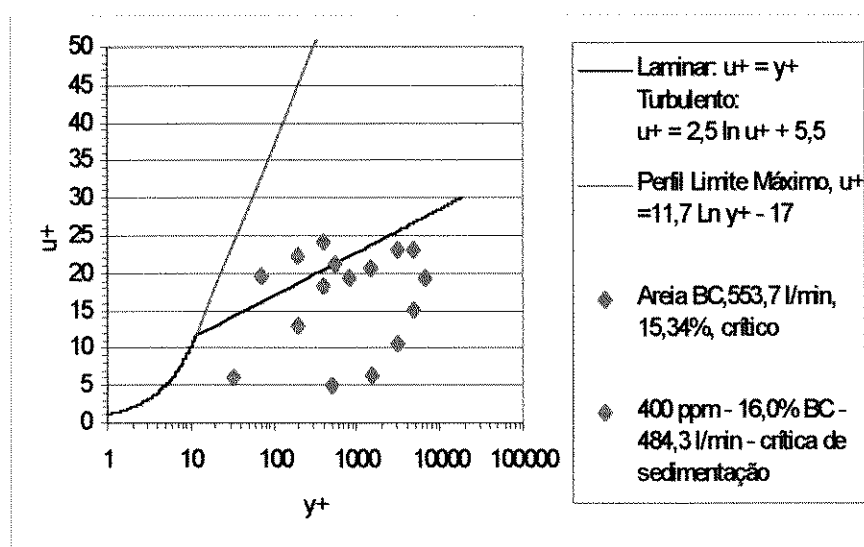


Figura 5.8.3.5 - Perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ para vazão e concentração aproximadas na condição de velocidade crítica de sedimentação de areia BC em água e em solução de 400 ppm de polímero.

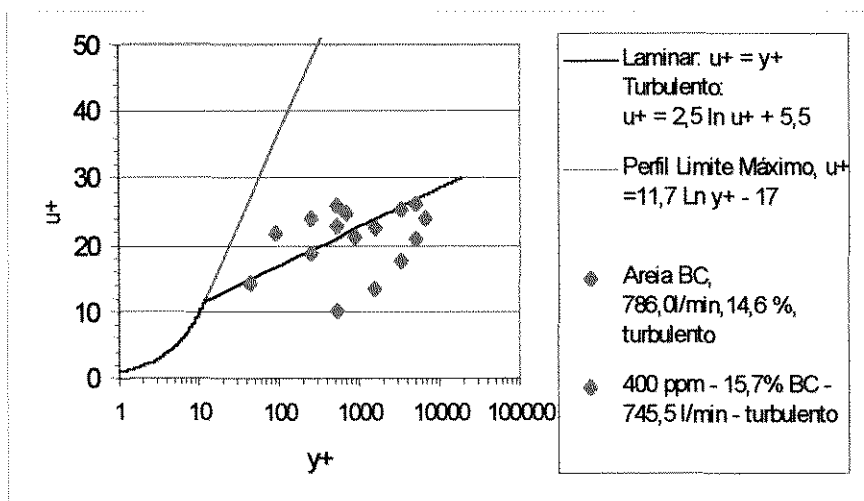


Figura 5.8.3.6 - Perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ para vazão e concentração aproximadas no escoamento heterogêneo de areia BC em água e em solução de 400 ppm de polímero.

5.8.4 – Distribuição de velocidade de Einstein

Einstein, H.A. (1950), apud YANG, CHIH TED (1996) página 129 expressou a distribuição de velocidades da seguinte forma:

$$\frac{u}{u^*} = 5,75 \log \left(\frac{30,2y}{\Delta} \right) \quad 5.8.4.1$$

onde $\Delta = k_s/x_x = d_{65}/x_x$

x_x = fator de correção apresentado na Figura 5.8.4.1

$\delta = 11,6 \nu/u^*$ = espessura da camada limite

$k_s = d_{65}$ = diâmetro da partícula que 65% da areia possui diâmetro menor que ela.

Sendo para a areia BC, $d_{65} = 0,2263$ mm.

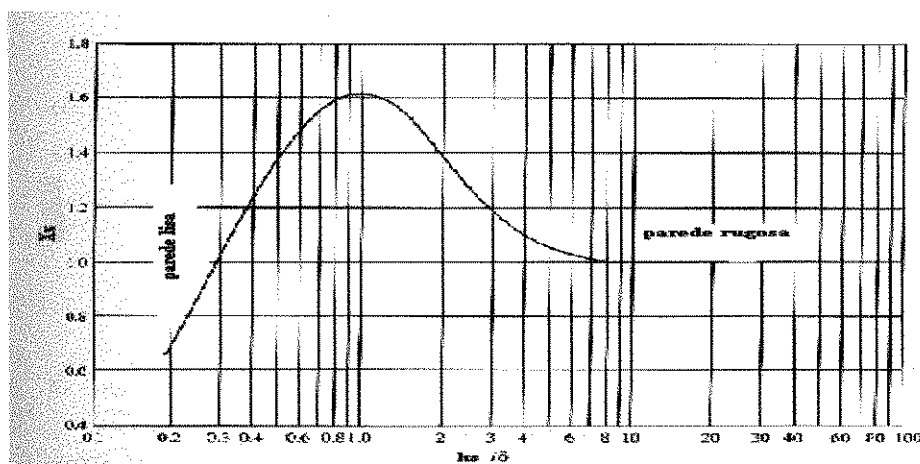


Figura 5.8.4.1 – Fator de correção $x_x = f(k_s/\delta)$ da distribuição logarítmica de velocidade de Einstein (1950)

Para a areia BC, a partir das velocidades pontuais medidas através do tubo de Pitot, foram determinados os valores de (u/u^*) e os valores de $(30,2 y/\Delta)$. Apresenta-se nas Figuras 5.8.4.2 e 5.8.4.3, os valores de (u/u^*) em função logarítmica de $(30,2 y/\Delta)$, no escoamento heterogêneo, e respectivamente para altas velocidades e para a condição de crítica de sedimentação.

Pode-se observar nestas Figuras 5.8.4.2 e 5.8.4.3, o desenvolvimento da função logarítmica com o aumento da concentração média de sólidos. Yano et al (1969), apud GRAF, W.H. (1971) mostrou que a distribuição de velocidade, afetada pelo leito móvel, desvia-se da função logarítmica perto do leito e o autor sugere que o desvio seja causado por força de cisalhamento causada pela rotação das partículas sólidas.

Observa-se a validade da função logarítmica para baixas concentrações, porém para concentrações superiores a cerca de 15%, a relação entre u^+ e $(30,2 y/\Delta)$ apresenta-se linear, significando haver uma relação tipo Newtoniana de tensão de cisalhamento em função da altura y . A Figura 5.8.4.4 ilustra esta observação. Nesta Figura, observa-se a distribuição de velocidade para o fluxo água e areia BC em 807,6 l/min e na condição de velocidade crítica de sedimentação.

Representa-se nesta Figura 5.8.4.4, a função linear de $u^+ = f(30,2 y/\Delta)$ para concentração superior a 15%. Na região superior de cada perfil de velocidade, denominada como zona de fluido leve, é válida a função logarítmica com declividade 5,75. Na região inferior de cada perfil de velocidade, denominada de zona de fluido pesado, a função torna-se linear. Observação semelhante foi realizada com relação ao perfil adimensional de velocidade para fluxo de água com areia BC e com areia A.

Na Figura 5.8.4.4, observa-se, na zona de fluido pesado, uma aproximada igualdade entre as declividades dos dois perfis de velocidade.

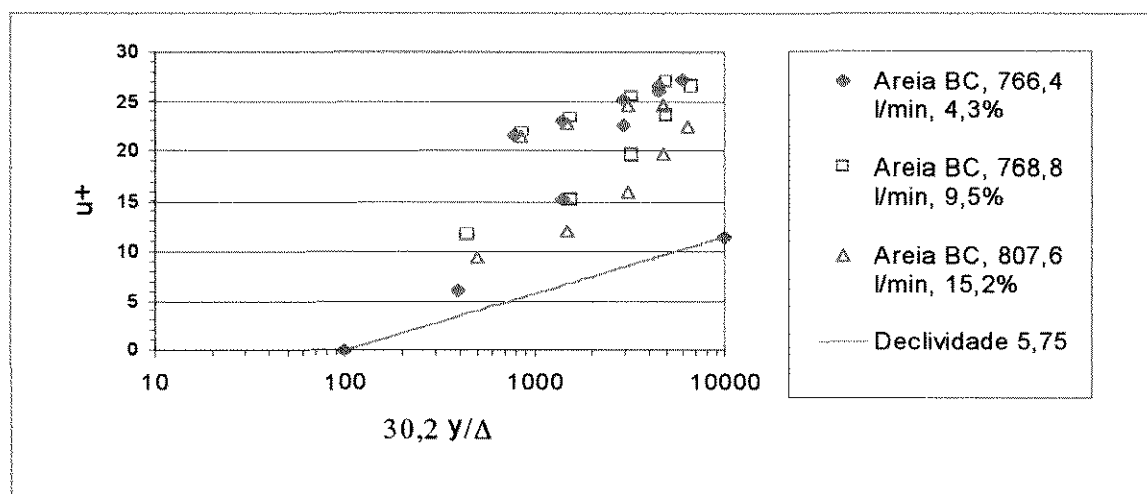


Figura 5.8.4.2 – $u^+ = f(\log(30,2 y/\Delta))$ no escoamento heterogêneo de água e areia BC em diversas concentrações médias.

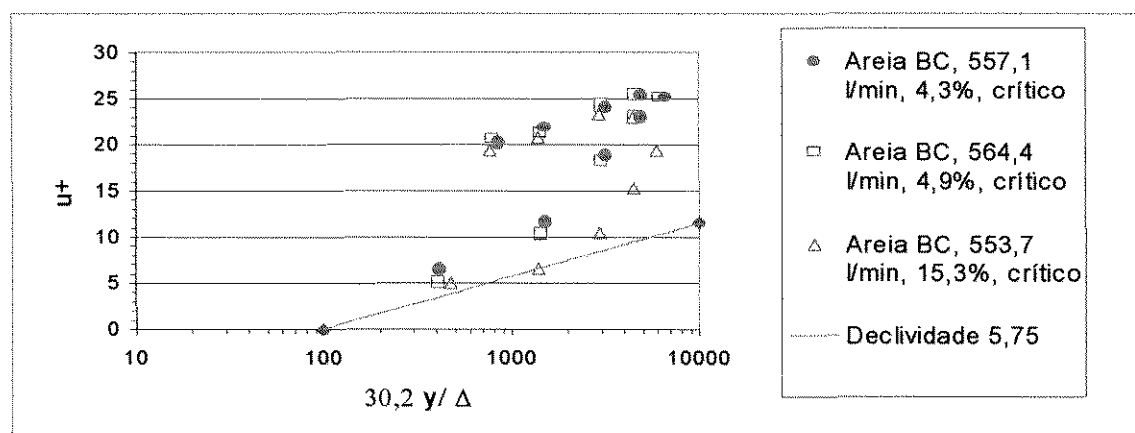


Figura 5.8.4.3 - $u^+ = f(\log(30,2 y/\Delta))$ na condição de velocidade crítica de sedimentação para fluxo de água e areia BC em diversas concentrações médias.

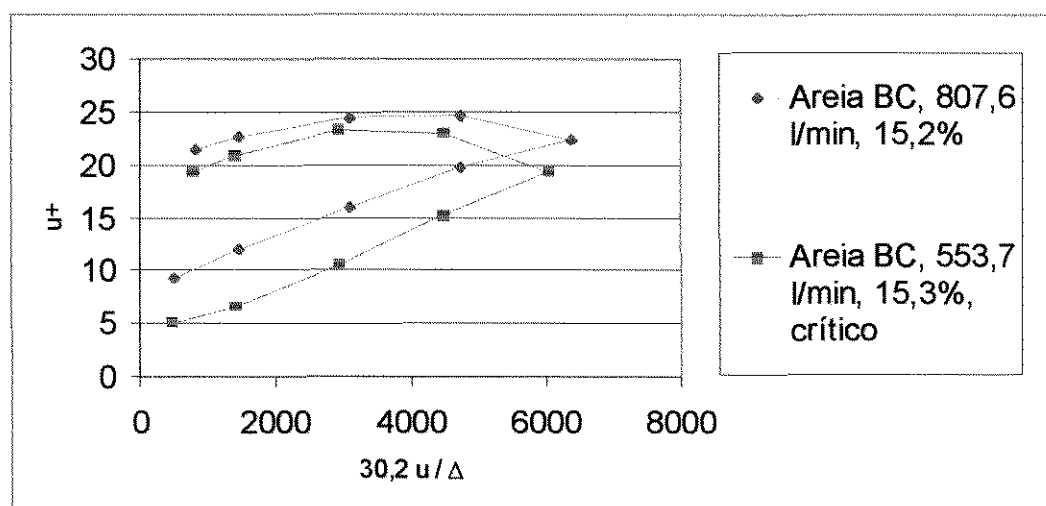


Figura 5.8.4.4 - $u^+ = f(30,2 y/\Delta)$ para concentração média de areia BC superior a 15% no escoamento heterogêneo. Fluxo de 807,6 l/min e na condição de velocidade crítica de sedimentação.

5.9- Distribuição vertical de concentração por amostragem isocinética

As distribuições de concentração pontual foram obtidas experimentalmente por amostragem isocinética com o tubo de Pitot. Foram obtidas para variadas vazões e concentrações médias de areia BC em água.

Na Figura 5.9.1 observa-se para concentração média aproximadamente constante (4,2% a 4,6%), e vazões diferentes, a variação da função de concentração pontual. Observa-se que menor vazão média transporta maior concentração de areia no fundo da tubulação.

Nas Figuras 5.9.2 e 5.9.3, observam-se as variações da função de concentração pontual para concentração média constante e próxima de 9,5% e 9,0% respectivamente. Para uma concentração média constante, verifica-se que a menor vazão transporta maior concentração no fundo da tubulação, sendo que vazões maiores apresentam um perfil distribuído mais uniformemente na seção do tubo.

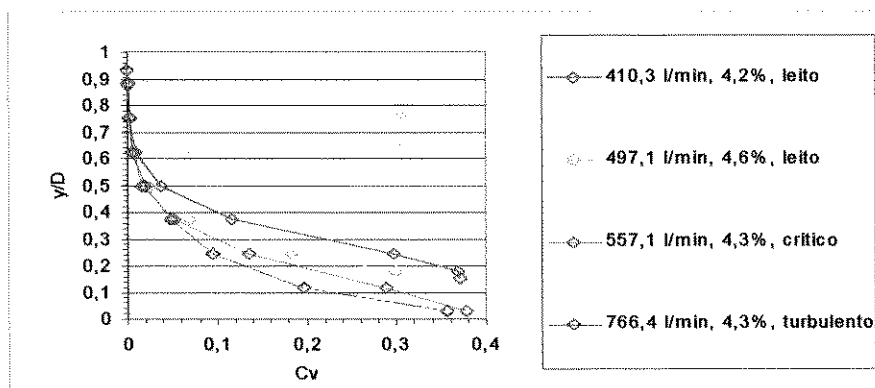


Figura 5.9.1 – Distribuição vertical de concentração pontual para concentração média praticamente igual (4,2% a 4,6%) de areia BC em água e crescentes vazões médias.

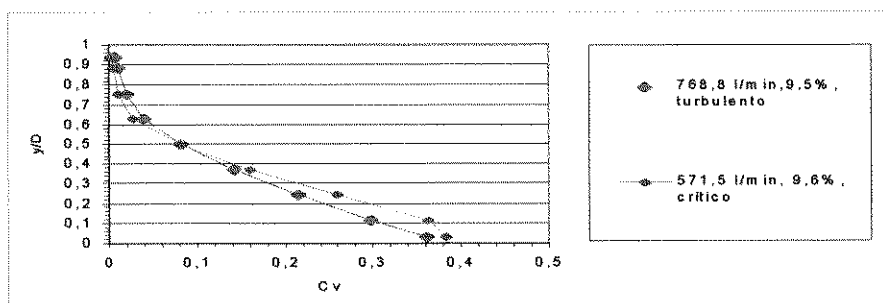


Figura 5.9.2 – Distribuição vertical de concentração pontual para concentração aproximada de 9,5% de areia BC em água e vazões médias alta e na condição de crítica de sedimentação.

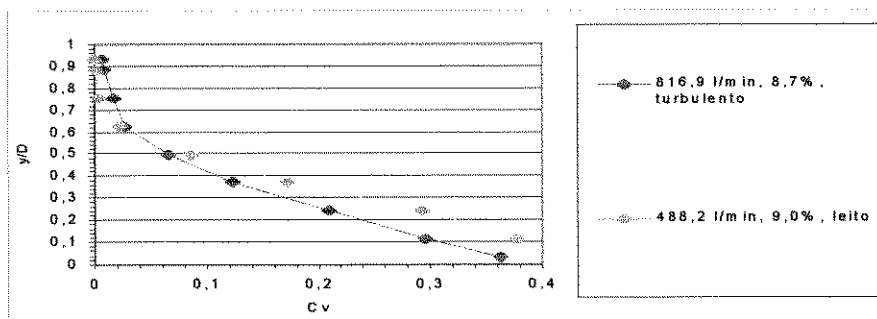


Figura 5.9.3 – Distribuição vertical de concentração pontual para concentração média praticamente igual (8,7% e 9,0%) de areia BC em água e crescentes vazões médias.

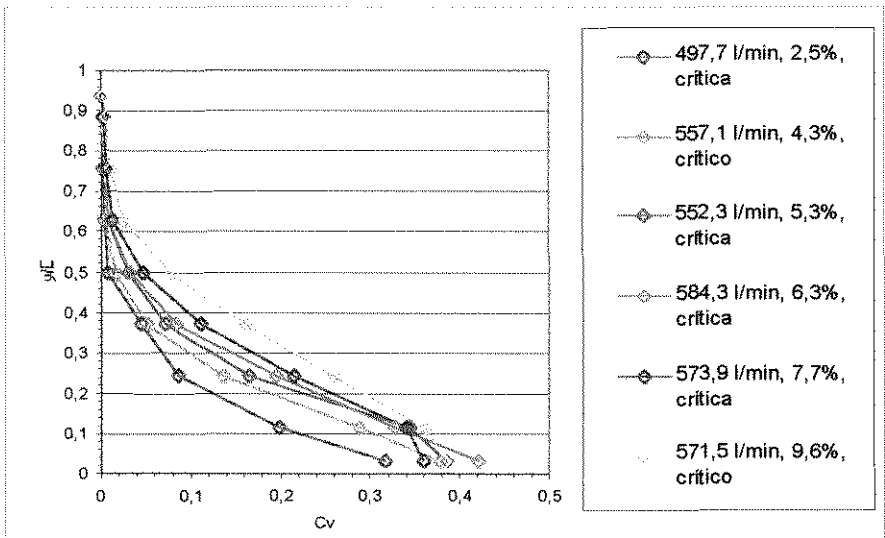


Figura 5.9.4 – Distribuição vertical de concentração pontual para a velocidade crítica de sedimentação de areia BC em água em concentração média volumétrica variada de 2,5% a 9,6%.

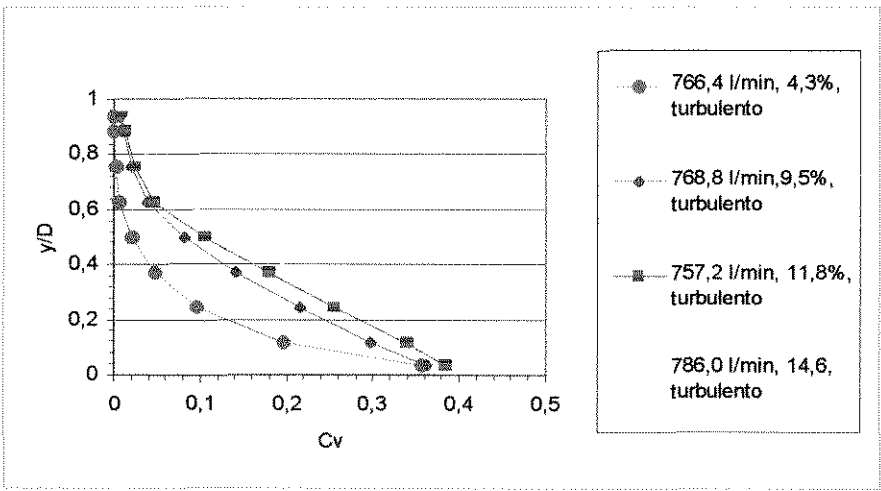


Figura 5.9.5 – Distribuição vertical de concentração pontual para o escoamento heterogêneo de areia BC em água em concentração média volumétrica variada de 4,3% a 14,6%.

Na Figura 5.9.4 para vazões na condição de velocidade crítica de sedimentação, e diferentes concentrações médias, observa-se o desenvolvimento da função concentração pontual. Os perfis mantêm-se semelhantes, aumentando a concentração no fundo da tubulação ao se elevar a concentração média de transporte.

A Figura 5.9.5 apresenta para vazões próximas à 765 l/min, e concentrações médias variadas, a variação da função concentração pontual. Observa-se que mesmo nesta alta vazão, a distribuição de concentração pontual para concentração média igual a 4,3% ainda se mantém alta na parte inferior da tubulação e na parte superior a concentração é muito pequena (praticamente nula).

As Figuras A4.1, A4.2, A4.3 e A4.4 constantes do APÊNDICE 4, representam todas as concentrações pontuais obtidas para misturas de água e areia BC. Indicam-se nestes gráficos os valores de vazão, concentração média da mistura e regime de escoamento.

Nestas Figuras A4.1, A4.2, A4.3 e A4.4 constantes do APÊNDICE 4, as distribuições verticais de concentração pontual são apresentadas em função de y/D . Também encontram-se apresentados nestes gráficos a equação teórica de Rouse (equação 3.9) para velocidade de sedimentação w constante e para valores de w corrigidos de acordo com a concentração pontual obtida experimentalmente. A posição de referência, a (equação 3.9) foi adotada como sendo sempre a posição mais próxima da parede inferior do tubo, ou seja, parte mais inferior do tubo onde se obteve medida de concentração pontual.

Para todas as distribuições de concentração obtidas experimentalmente, observou-se a não concordância com a equação teórica de Rouse, equações 3.9 e 3.9a. Esta equação, por sua estrutura, considera para $y = D$, um valor de concentração nulo, ou seja, na parede superior do tubo a equação de Rouse sempre levará à concentração nula. Também, na base do tubo onde $y = 0$, a equação de Rouse fornece valor infinito de concentração, o que na realidade é impossível. Segundo Graf, W. H. (1971), a equação de Rouse em laboratório como no campo, descreve muito bem a distribuição de concentração na sua forma, quando os valores de z utilizados são adotados por melhor ajuste.

Na equação 3.9a o valor do expoente z é igual a: $z = w/(\beta \kappa u^*)$. Onde w é a velocidade de sedimentação em água limpa em repouso e de dimensões infinitas, κ é a constante de Von Karman, u^* é a velocidade de atrito e β é a relação entre os coeficientes

de transferência de massa em fluido com partículas sólidas e de transferência de momento para fluidos homogêneos.

A não concordância entre os valores teóricos da equação de Rouse e os experimentais, entre outros fatores, foi atribuída à utilização de valor constante para a velocidade de sedimentação w . A velocidade de sedimentação w em fluido (água) de grandes dimensões e em repouso foi determinada para $d_{50} = 0,2019$ mm. O valor encontrado para a temperatura de 20°C foi $w = 0,022489$ m/s.

O valor de β foi assumido igual à unidade, considerando-se assim iguais os coeficientes de transferência de momento e de transferência de massa para partículas. Von Karman mostrou que eles são iguais embora outros autores tenham demonstrado que eles são proporcionais entre si (Wasp, E. J. et al, 1977, p.61).

Segundo Graf, W. H. (1971), será um engano a atribuição de todas as discordâncias ao valor de β , mas deve-se levar em consideração os efeitos de turbulência e da concentração sobre o valor de κ e sobre o valor da velocidade de sedimentação.

A velocidade de sedimentação da partícula em presença de outras partículas, torna-se dependente da concentração volumétrica presente. Na região de Lei de Stokes, esta velocidade de sedimentação é dada por (Wasp, E. J. et al, 1977, p.41):

$$w = (w_0) \varepsilon^{nn} \quad (5.9.1)$$

onde: w_0 = velocidade de sedimentação de uma partícula em fluido infinito e em repouso,

w = velocidade de sedimentação de uma partícula em presença de outras partículas,

ε = fração volumétrica de vazios.

$nn = 4,5$

Cheng, Nian-Sheng (1997) apresenta valores de nn , para misturas de água e areia aproximadamente igual a 4,2, assim devido à pequena diferença com o de Wasp, E. J. et al, considera-se nesta pesquisa o valor 4,5 deste último autor.

Utilizando-se a equação 5.9.1, foram corrigidos os valores de w na equação 3.9. De modo que foram obtidos novos valores de concentração pontual para a equação de Rouse com valores de w corrigidos.

Nas Figuras 5.9.6, 5.9.7 e 5.9.8 podem ser observados os efeitos da correção nos valores da velocidade de sedimentação w sobre a equação de Rouse. Nestas Figuras também se apresenta a equação de Rouse para valor constante da velocidade de sedimentação w_0 em água limpa e em repouso. Nota-se perfeita concordância entre pontos experimentais e a equação de Rouse com valores corrigidos de w na zona de fluido pesado em velocidade crítica e no escoamento heterogêneo. No escoamento com leito de sedimentos tal concordância não se apresenta. Estas conclusões foram verificadas em todos os testes realizados experimentalmente e podem ser verificadas nas Figuras A4.1, A4.2, A4.3 e A4.4 do APÊNDICE 4. O que sugere que esta concordância ocorre mesmo para concentrações baixas de 2,5% de areia BC e velocidades baixas do escoamento heterogêneo como na velocidade crítica de sedimentação.

Para melhor ilustração das observações gerais anteriormente citadas, apresenta-se a Figura 5.9.6, para a vazão $Q = 571,5$ l/min, $C_v = 9,6\%$ de areia BC e na velocidade crítica de sedimentação. Neste gráfico são apresentadas curvas referentes aos pontos experimentais, e as curvas da equação de Rouse sem e com a correção na velocidade de sedimentação (w). Observou-se que na zona de fluido pesado, a equação de Rouse determinada com a correção sobre w , ajusta-se perfeitamente aos dados experimentais, o que indica uma preponderância da velocidade de sedimentação, corrigida pelos efeitos da concentração, sobre a turbulência, na zona de fluido pesado. Observa-se nesta zona de fluido pesado, um valor de $\beta > 1$. Onde β é a relação entre o expoente z constante da equação 3.9a, e o expoente z que se ajusta aos dados experimentais. Os valores de β variam de 8,1 a 1,5. Na zona de fluido pesado, verificou-se alteração (redução) na constante de Von Karman, porém esta alteração não foi utilizada na correção dos valores de z uma vez que seus valores aumentariam a diferença entre os dados experimentais e os teóricos da equação de Rouse, e no sentido inverso ao esperado.

Na zona de fluido leve, observa-se na Figura 5.9.6, praticamente não houve alteração entre as equações de Rouse com e sem correção em w . Nesta zona portanto, como

já observado nos perfis adimensionais de velocidade, a constante de Von Karman permanece igual a $\kappa = 0,4$, e o valor de w permanece quase inalterado devido às pequenas concentrações nesta zona de fluido leve. Assim, assumindo a validade da equação de Rouse, nesta zona de fluido leve, conclui-se que o coeficiente β deve assumir valores entre 0,57 e 0,85, correspondendo respectivamente ao ponto superior da tubulação até um ponto próximo à máxima velocidade do fluxo.

Admitindo-se a validade da equação de Rouse, conclui-se que o valor do β , em toda a seção do tubo, da parte superior para a inferior, varia de 0,57 a 0,85, até um certo ponto próximo à velocidade máxima e depois varia de 1,5 a 8,1. Estes valores foram determinados para a Figura 5.9.6, ou seja, para o ponto de velocidade crítica de sedimentação, $Q = 571,5$ l/min e $C_v = 9,6\%$ de areia BC em água.

Na Figura 5.9.9 são representados estes valores de β em função de y/D . Um ajuste por potência foi realizado aos pontos, encontrando-se : $\beta = 0,5113(y/D)^{-0,919}$, com $R^2 = 0,9723$.

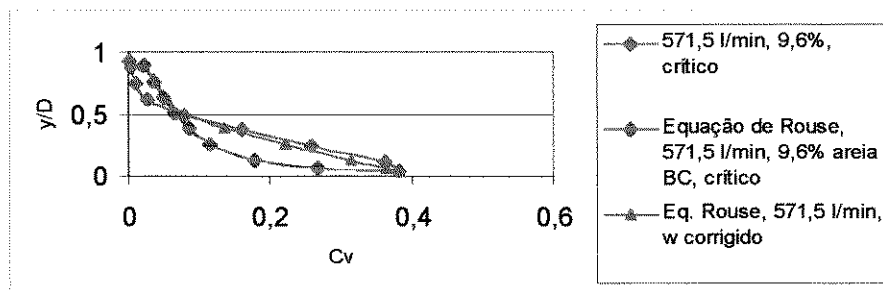


Figura 5.9.6 – Equação de Rouse na velocidade crítica de sedimentação e 9,6% de areia BC em água

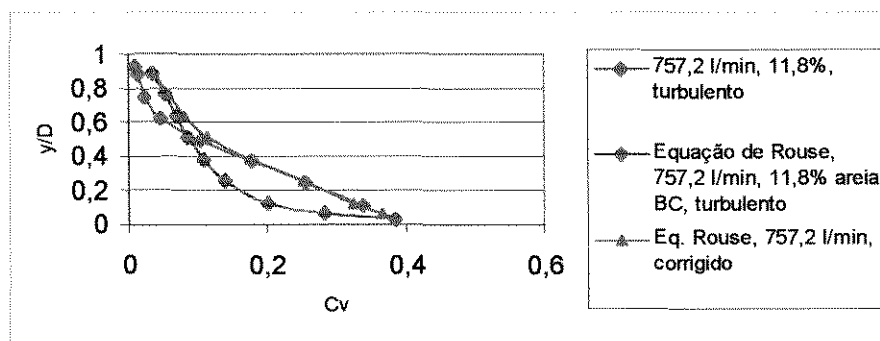


Figura 5.9.7 – Equação de Rouse no escoamento heterogêneo 757,2 l/min e 11,8% de areia BC em água. Com correção nos valores de velocidade de sedimentação w devido à concentração.

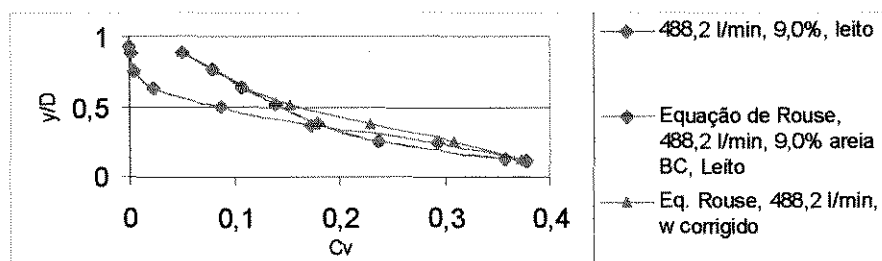


Figura 5.9.8 – Equação de Rouse no escoamento com leito de sedimentos e 9,0% de areia BC em água

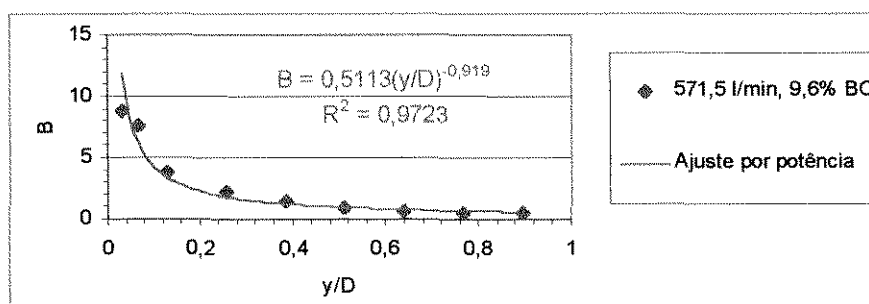


Figura 5.9.9 – Valores de β em função de y/D obtidos da distribuição de concentração pontual para $Q = 571,5$ l/min e $C_v = 9,6\%$ de areia BC em água.

Na Figura 5.9.7, apresenta-se valores experimentais de concentração pontual em função de y/D para $Q = 757,2$ l/min e $C_v = 11,8\%$ de areia BC em água e curvas da equação de Rouse sem e com correção nos valores de w devido à concentração. Observa-se

excelente concordância entre os valores experimentais e a equação de Rouse com correção em w , para pontos da zona de fluido pesado. Na zona de fluido leve não há a mesma concordância.

A observação de que na zona de fluido pesado, a equação de Rouse determinada com a correção sobre w , ajusta-se perfeitamente aos dados experimentais, indica uma preponderância da velocidade de sedimentação (ou seja dos efeitos de arraste e gravidade), corrigida pelos efeitos da concentração, sobre a turbulência, na zona de fluido pesado.

De modo semelhante ao procedimento de cálculo realizado aos dados experimentais da Figura 5.9.6, determinou-se os valores de β para os dados experimentais da Figura 5.9.7.

Estes valores de β em função de y/D encontram-se na Figura 5.9.10. Os valores de β variam de 8,8 a 0,67 respectivamente da base inferior ao ponto superior do tubo.

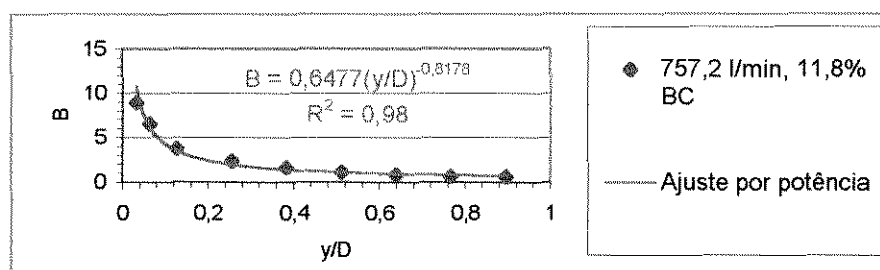


Figura 5.9.10 – Valores de β em função de y/D obtidos da distribuição de concentração pontual para $Q = 757,2$ l/min e $C_v = 11,8\%$ de areia BC em água.

Na Figura 5.9.8, apresenta-se a distribuição de concentração pontual em função de y/D obtida experimentalmente no escoamento com leito de sedimentos. A vazão correspondente foi de 488,2 l/min e a concentração média foi de 9,0% de areia BC em água.

Nesta Figura 5.9.8 são apresentadas as equações de Rouse sem e com correção nos valores de w . Observa-se que a correção em w , na zona de fluido pesado, ajustou a equação de Rouse aos dados experimentais, em todo o escoamento heterogêneo, mas não causou o mesmo ajuste para o escoamento com leito de sedimentos.

Foram determinados os valores de β para os dados experimentais da Figura 5.9.8. O procedimento realizou-se por escolhas arbitrárias de z (equação 3.9a) até que a função de

Rouse se ajustasse aos dados experimentais. A relação entre z teórico e constante da equação 9a e o valor de z do ajuste arbitrário, fornece o valor de β .

Estes valores de β em função de y/D encontram-se na Figura 5.9.11. Os valores de β variam de 4,2 a 0,54 respectivamente da base inferior ao ponto superior do tubo.

Observa-se na Figura 5.9.11 que a variação de β foi ajustada à função do tipo potência.

Na tabela 5.9.1, apresenta-se a faixa de variação de β obtida nas três Figuras 5.9.6, 5.9.7 e 5.9.8. Esta faixa de variação de β refere-se à valores desde a base inferior para a parte superior do tubo.

Da Tabela 5.9.1, observa-se que na região de fluido leve e próximo à parede superior do tubo, β assume sempre valor próximo a 0,6.

Tabela 5.9.1 – Valores de β para escoamento de água e areia BC

Tipo de escoamento	Vazão e concentração média	β
Crítica de sedimentação	571,5 l/min e 9,6%	8,1 a 0,57
Heterogêneo	757,2 l/min e 11,8%	8,8 a 0,67
Leito de sedimentos	488,2 l/min e 9,0%	4,2 a 0,54

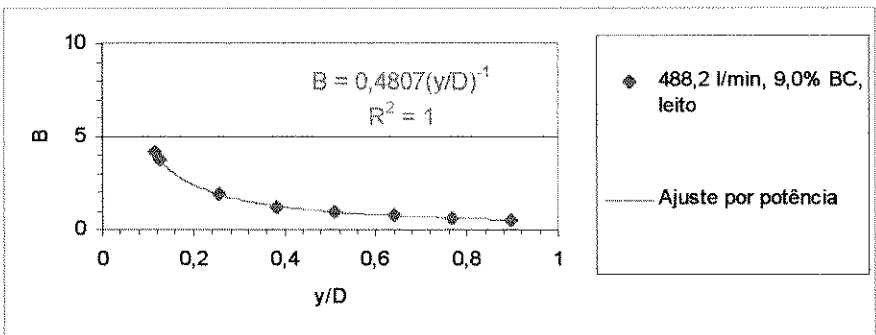


Figura 5.9.11 – Valores de β em função de y/D obtidos para a distribuição de concentração pontual onde $Q = 488,2$ l/min e $C_v = 9,0\%$ de areia BC em água.

Realizou-se até o presente, análises de distribuições de concentração vertical em escoamentos de misturas de água e areia BC. A seguir, analisam-se as distribuições de concentração vertical em escoamentos de solução polimérica com areia BC.

No APÊNDICE 4, as Figuras A4.5, A4.6, A4.7 e A4.8 apresentam distribuições verticais de concentração e de velocidade, obtidas experimentalmente com tubo de Pitot. Tais distribuições foram obtidas de escoamentos de suspensão de polímero com areia BC.

As suspensões de polímero foram ensaiadas em concentração igual a 100 ppm, 200 ppm e em 400 ppm. Para tais concentrações de polímero, calculou-se a velocidade de sedimentação (ou velocidade terminal) w da partícula de areia BC ($d_{50} = 0,2019$ mm) à temperatura de 30°C. O cálculo da velocidade de sedimentação foi efetuado pelo programa FORTRAN adaptado do programa BASIC de Soliman, R. H. e Collier, P. B. (1990). Os valores obtidos para w foram:

Para 100 ppm, $w = 0,0062511$ m/s

Para 200 ppm, $w = 0,0051173$ m/s

Para 400 ppm, $w = 0,0048092$ m/s

Estes valores de w foram aplicados nas equação 3.9 e 3.9a de distribuição de concentração de Rouse. Assim foram obtidas as distribuições de concentração de acordo com o esperado pela equação de Rouse (equação de Rouse sem correção).

Com os mesmos valores de w , e com os valores obtidos experimentalmente de concentração pontual, realizou-se correção nos valores de w de acordo com a equação 5.9.1, equação esta que determina os valores de velocidade de sedimentação “hindered” ou retardada pelo efeito da concentração. Com estes valores de w corrigidos, aplicados na equação de Rouse determinou-se novos valores para efeito de comparação.

Apresenta-se na Figura 5.9.12, para $Q = 769,4$ l/min e 6,1% de areia BC, os valores experimentais, e os valores teóricos da equação de Rouse sem e com correção nos valores de w , devido à concentração.

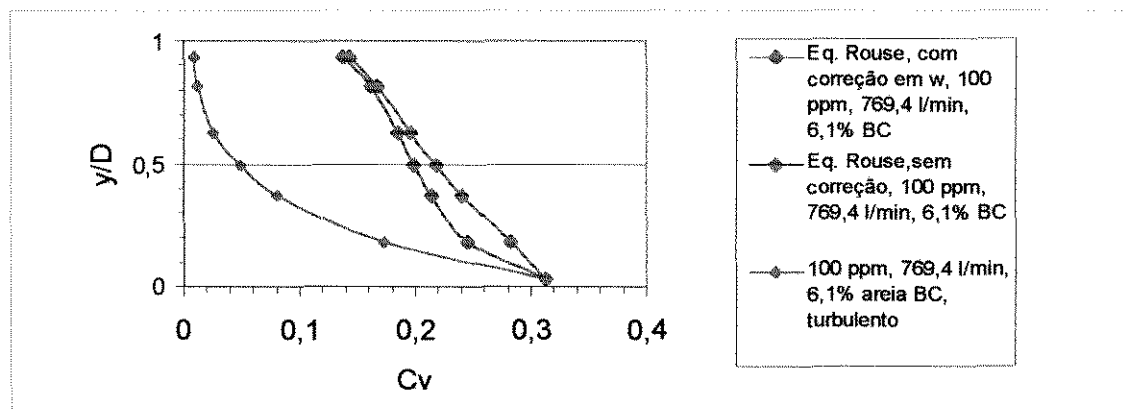


Figura 5.9.12- Distribuição vertical de concentração experimental para $Q = 769,4$ l/min e $C_v = 6,1\%$ e $C_{vp} = 100$ ppm. Distribuição teórica de Rouse sem e com correção em w .

Observa-se na Figura 5.9.12, nenhuma concordância da equação de Rouse sobre os valores experimentais de fluxo de areia BC em soluções poliméricas. Este fato ocorre porque o valor de w na equação de Rouse exerce importante função, assim devido aos altos valores de viscosidade das soluções poliméricas, os valores de w se tornam muito pequenos o que provoca o grande desvio entre os valores experimentais e os teóricos, e devido à turbulência do escoamento, ocorre provavelmente a alteração nos valores da viscosidade e a ação da subcamada elástica sobre a distribuição de concentração.

Para os valores experimentais da Figura 5.9.12, foram obtidos os valores de β . Estes foram calculados pela relação entre o expoente z da equação de Rouse sem correção, e o expoente z que se ajusta aos dados experimentais. O expoente z que melhor se ajustou aos dados experimentais foi determinado por processo de tentativa e erro. A planilha eletrônica do software Excel viabilizou o processo.

Apresenta-se na Figura 5.9.13 os valores de β em função de y/D para $C_{vp} = 100$ ppm, $Q = 769,4$ l/min e $C_v = 6,1\%$. Os valores de β em função de y/D foram ajustados à uma função polinomial e a equação resultante encontra-se apresentada no gráfico.

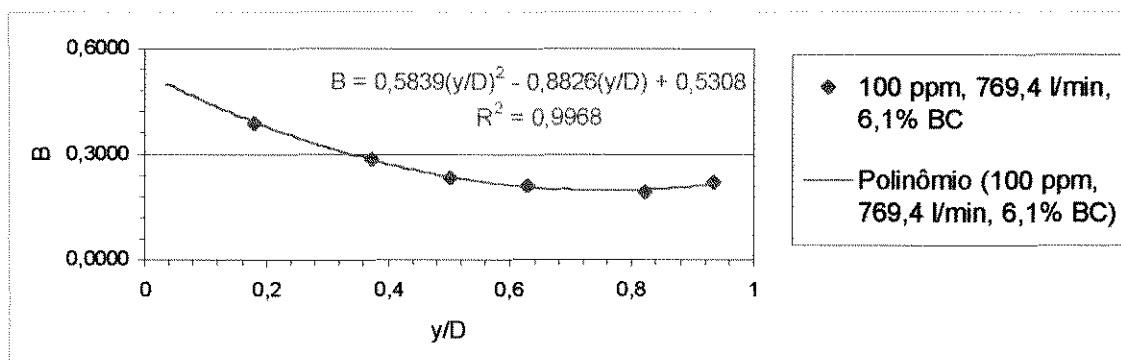


Figura 5.9.13 – Valores de β em função de y/D obtidos para a distribuição de concentração pontual onde $Q = 769,4$ l/min e $C_v = 6,1\%$ de areia BC em $C_{vp} = 100$ ppm.

Na Figura 5.9.14, apresenta-se as distribuições verticais de concentração para um escoamento com concentração média $C_v = 4,3\%$ de areia BC, em água e em 400 ppm de polímero, na velocidade crítica de sedimentação. Verifica-se nesta velocidade que apesar da adição do polímero ocorreu uma muito pequena variação entre os perfis de concentração. Esta ocorrência deve-se provavelmente à pequena velocidade de transporte e pequena turbulência. As soluções poliméricas apresentam maior eficiência em redução de arraste e em capacidade de transporte, em escoamentos com maiores turbulências.

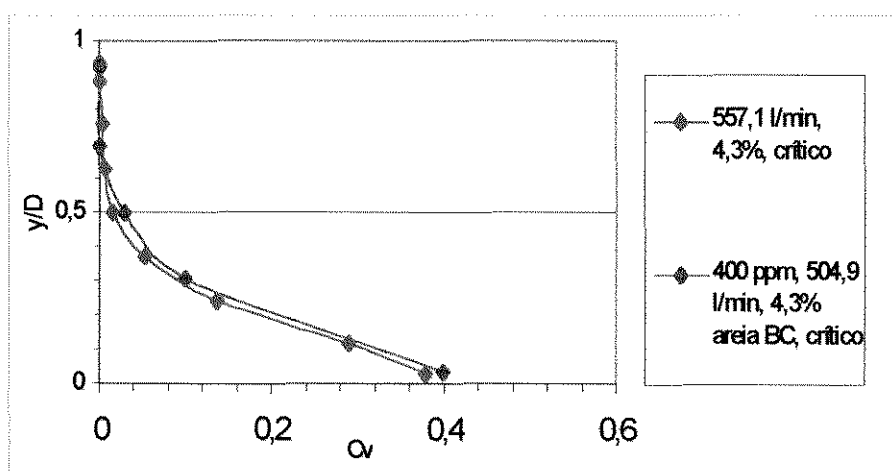


Figura 5.9.14 - Distribuição vertical de 4,3% de concentração média de areia BC em água e em 400 ppm de polímero, na velocidade crítica de sedimentação.

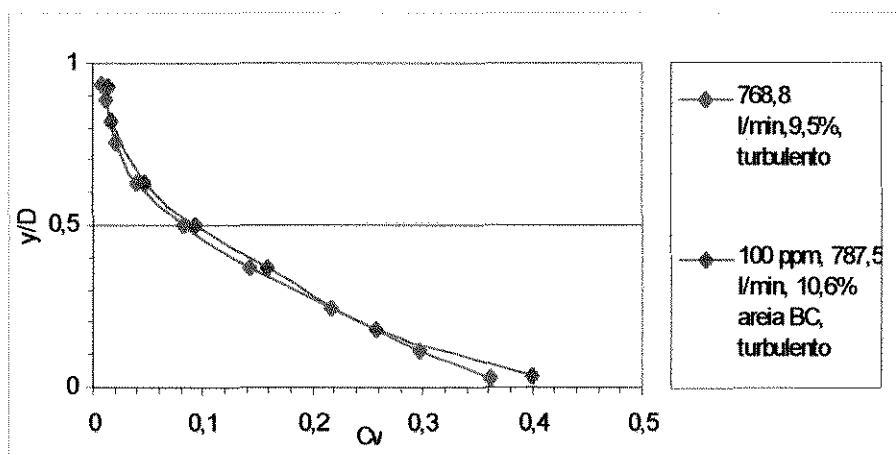


Figura 5.9.15 - Distribuição vertical de 10,0% de concentração média aproximada de areia BC em água ($Q = 768,8$ l/min) e em 100 ppm de polímero (787,5 l/min).

Nas Figuras 5.9.15, 5.9.16 e 5.9.17, pode-se avaliar melhor o desempenho da concentração do polímero e da turbulência sobre as distribuições de concentração. Na Figura 5.9.15 quase não há diferença entre as distribuições de concentração, em vazão aproximada de 770 l/min e em 100 ppm de polímero, porém na Figura 5.9.17, para concentração aproximadamente igual, e em vazão aproximada de 820 l/min, e 400 ppm, observa-se que a maior velocidade da solução polimérica causa uma distribuição de concentração mais uniforme.

Nas Figuras 5.9.16 e 5.9.17, observa-se que a adição de 400 ppm de polímero aumenta a concentração de areia na parte superior do tubo e diminui a concentração de areia na parte inferior do tubo, tornando o perfil de concentração mais uniforme. No gráfico 5.9.16, observa-se que a adição de polímero em 400 ppm, causou uma diminuição de cerca de 50% na concentração da base inferior do tubo.

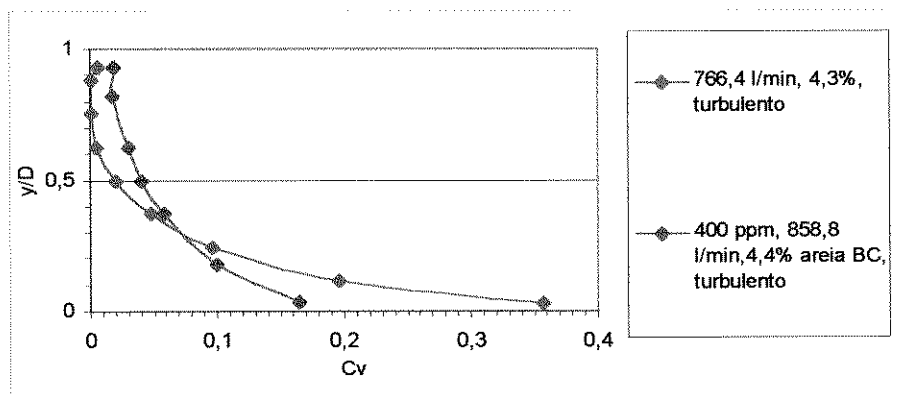


Figura 5.9.16 - Distribuição vertical de 4,3% de concentração média aproximada de areia BC em água ($Q = 766,4$ l/min) e em 100 ppm de polímero (858,8 l/min).

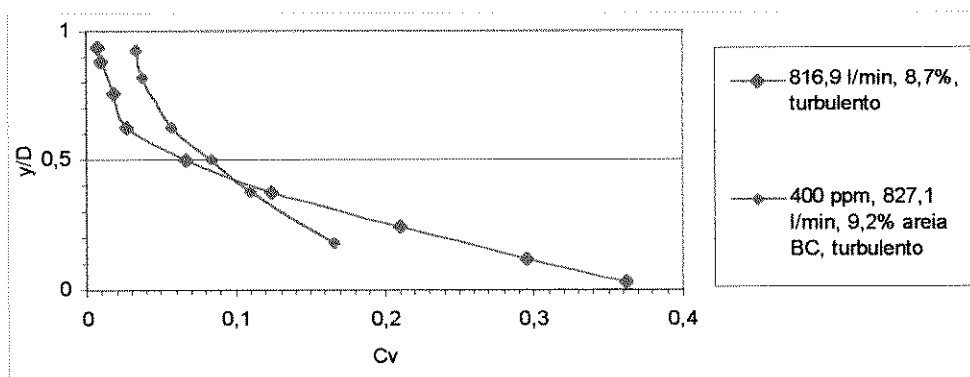


Figura 5.9.17 - Distribuição vertical de 9,0% de concentração média aproximada de areia BC em água ($Q = 816,9$ l/min) e em 100 ppm de polímero (827,1 l/min).

Na Figura 5.9.18, apresentam-se os valores de β de suspensões de 400 ppm de polímero. Os valores de β variaram de 0,12 a 0,24, do topo à base do tubo para $Q = 504,9$ l/min, $C_v = 4,3\%$ de areia BC. E variaram de 0,34 a 0,34, passando por um mínimo de 0,26 para $Q = 827,1$ l/min, $C_v = 9,2\%$ de areia BC. Observa-se que são muito reduzidos os valores de β para suspensões de polímero em relação aos valores da água. E observa-se que diferentemente do que ocorre em água, cujos valores de β aumentam gradativamente desde o topo à base do tubo, em presença de polímero os valores de β inicialmente passam por uma diminuição, por um mínimo e depois aumentam. Os valores de β para suspensões de

areia e polímero, em função de y/D , melhor se ajustaram à função polinomial de segunda ordem. A Figura 5.9.18 ilustra os polinômios ajustados aos valores de β em função de y/D .

Como os valores de β , em presença de polímero são sempre menores que a unidade pode-se concluir que o coeficiente de transferência de momento é sempre superior ao coeficiente de difusão de sólidos para as concentrações de 100, 200 e 400 ppm e para a areia BC.

A Figura 5.9.19 ilustra os valores de β para a condição de velocidade crítica, $C_v = 4,3\%$ de areia BC, sem e com 400 ppm de polímero. Em presença de polímero, $Q = 504,9$ l/min o coeficiente de transferência de momento é maior do que o coeficiente de difusão de sólidos em toda a vertical da seção do tubo. Porém, sem polímero, o comportamento de β , variando de 0,58 a 8,5 para $Q = 827,1$ l/min indica que do topo à base inferior do tubo o coeficiente de transferência de momento é maior, igual e menor do que o coeficiente de difusão de sólidos.

Na Figura 5.9.20 ilustra-se valores de β para vazão e concentração aproximadas de areia BC, em escoamento heterogêneo, sem e com 400 ppm de polímero. Observam-se idênticas conclusões sobre os valores de β da condição crítica de sedimentação e no

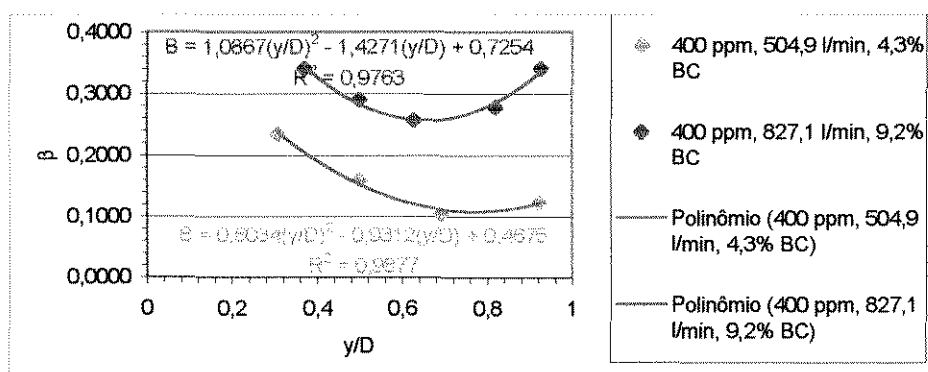


Figura 5.9.18 – Valores de β de escoamento de 400 ppm de polímero para $Q = 504,9$ l/min, $C_v = 4,3\%$ e para $Q = 827,1$ l/min, $C_v = 9,2\%$ de areia BC

escoamento heterogêneo apresentado. Em presença de polímero, $Q = 827,1$ l/min e $C_v = 9,2\%$, o coeficiente de transferência de momento é maior do que o coeficiente de difusão de sólidos em toda a vertical da seção do tubo. Os valores de β para escoamento sem polímero,

$Q = 816,9$ l/min e $C_v = 8,7\%$ variaram de 0,61 a 7,6 desde o topo à base do tubo. Conclui-se que do topo à base inferior do tubo o coeficiente de transferência de momento é maior, igual e menor do que o coeficiente de difusão de sólidos. Isto corresponde aproximadamente à afirmação de que na zona de fluido leve, para o escoamento de areia BC, o coeficiente de transferência de momento é maior que o de difusão de sólidos. E na zona de fluido pesado, para a areia BC, o coeficiente de transferência de momento é menor que o de difusão de sólidos.

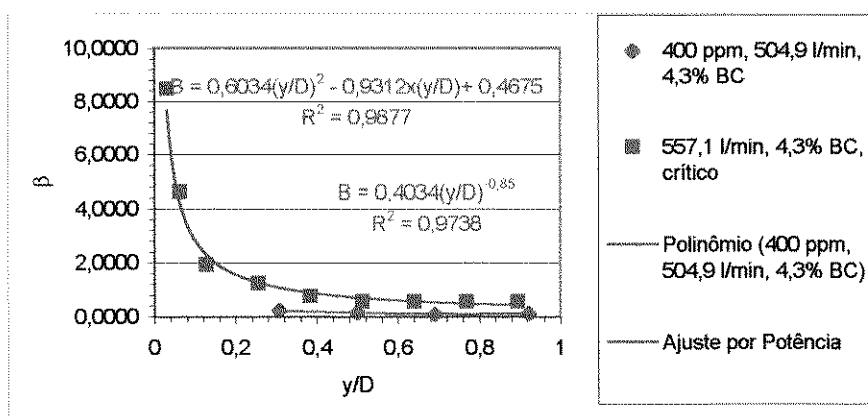


Figura 5.9.19 – Valores de β para a condição de velocidade crítica, $C_v = 4,3\%$ de areia BC, sem e com 400 ppm de polímero.

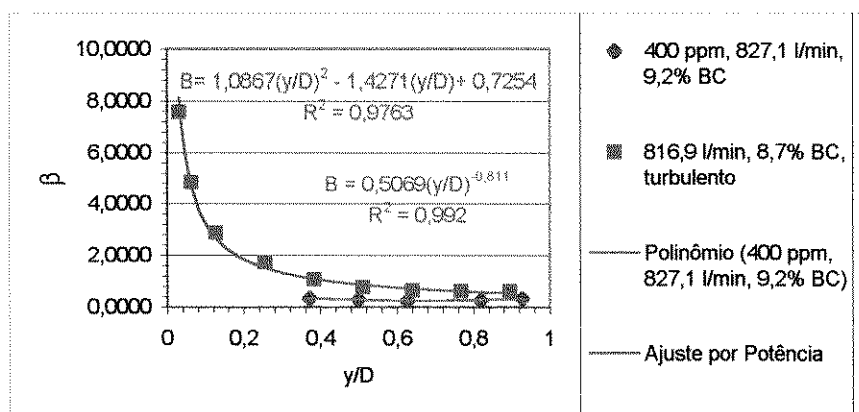


Figura 5.9.20 - Valores de β para vazão e concentração aproximadas de areia BC, em escoamento heterogêneo, sem e com 400 ppm de polímero.

Embora os valores de β não variem linearmente para soluções de polímero, como se pode verificar na Figura 5.9.18, porém, podem ser considerados praticamente constantes nas Figuras 5.9.19 e 5.9.20, devido aos grandes valores de β de mistura água e areia em comparação com os pequenos valores de β para solução de polímero com areia. Para melhor compreensão desta afirmação, verifica-se nas Figuras 5.9.19 e 5.9.20, que os valores de β para solução de polímero (400 ppm) com areia, apresentam-se praticamente constantes. Observação semelhante ocorre também para as outras concentrações de polímero (100 e 200 ppm) com areia BC.

Aplicando-se um valor de β constante e igual a 0,175 à solução de 400 ppm de polímero com areia BC, observou-se concordância entre os pontos experimentais e os da equação de Rouse. Além da aplicação deste valor de β , também aplicou-se correção na velocidade de sedimentação de acordo com a equação 5.9.1. Para concentração média de 4,4% e 9,2% de areia BC em 400 ppm de polímero, as Figuras 5.9.21a e 5.9.22 apresentam a concordância entre os pontos experimentais e os calculados da equação de Rouse.

Comparando as Figuras 5.9.21a e 5.9.21b, onde os valores de β são respectivamente 0,175 e 0,2, conclui-se que para altas vazões (em torno de 830 l/ min), menores concentrações de areia assumem maior valor de β , uma vez que há maior concordância entre valores teóricos e experimentais para o valor de $\beta = 0,2$ da Figura 5.9.21b.

Aplicando-se um valor de β constante e igual a 0,2 à solução de 100 ppm de polímero com areia BC, observou-se concordância entre os pontos experimentais e os da equação de Rouse. Além da aplicação deste valor de β , também aplicou-se correção na velocidade de sedimentação de acordo com a equação 5.9.1. Para concentração média de 10,6% e 6,1% de areia BC em 100 ppm de polímero, as Figuras 5.9.23 e 5.9.24 apresentam a concordância entre os pontos experimentais e os calculados da equação de Rouse.

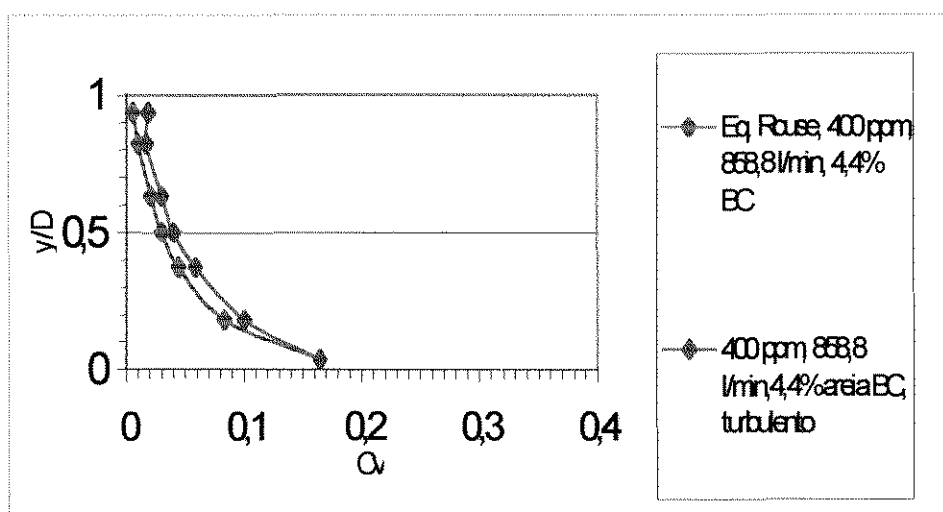


Figura 5.9.21a – Aplicação de valor constante de $\beta = 0,175$ à equação de Rouse, além da correção em w , devido à concentração.

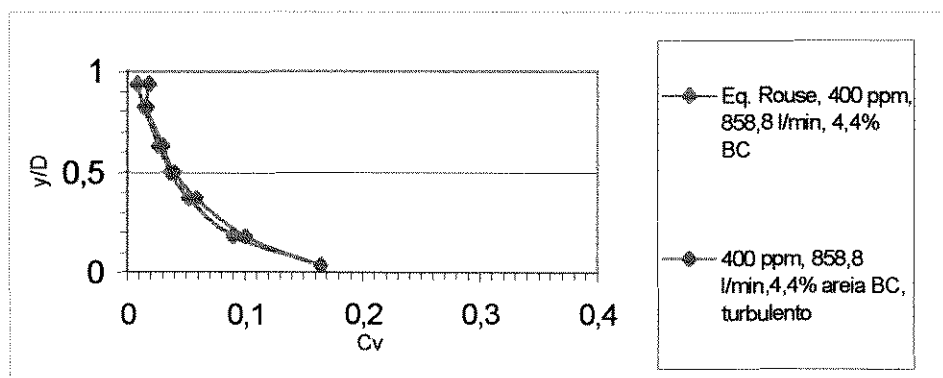


Figura 5.9.21b– Aplicação de valor constante de $\beta = 0,2$ à equação de Rouse, além da correção em w , devido à concentração.

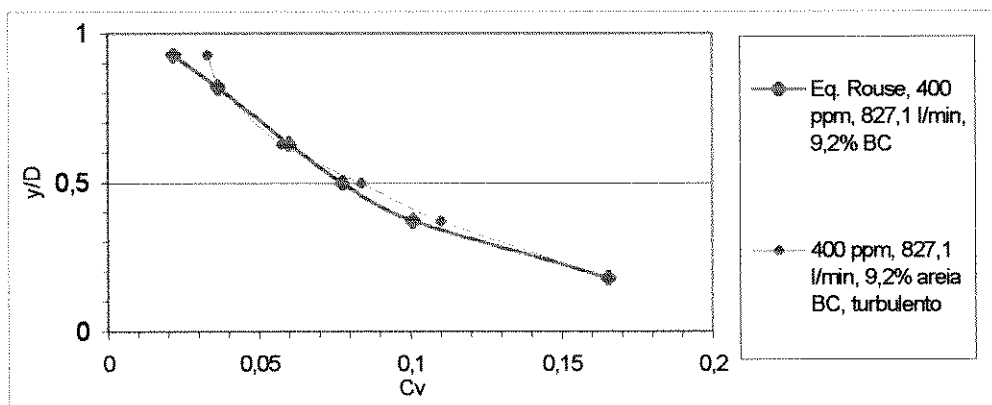


Figura 5.9.22 – Aplicação de valor constante de $\beta = 0,175$ à equação de Rouse, além da correção em w , devido à concentração.

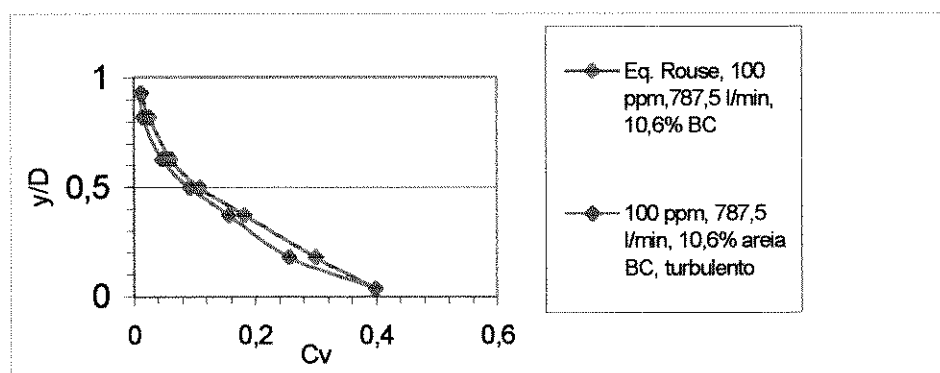


Figura 5.9.23 – Aplicação de valor de $\beta = 0,2$ à equação de Rouse, além da correção em w , devido à concentração.

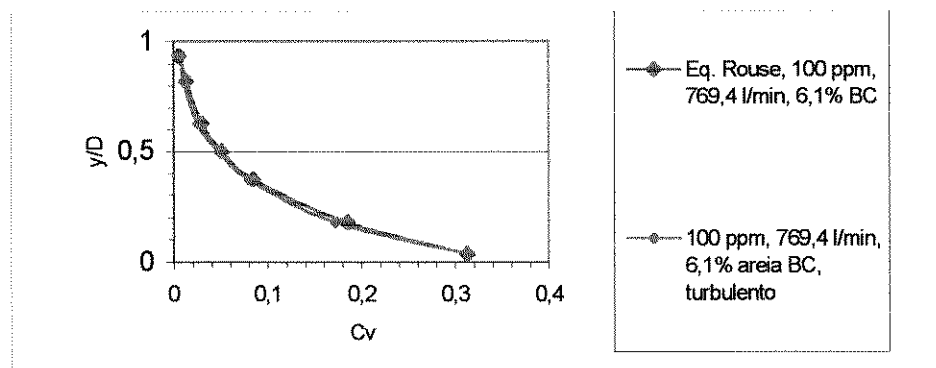


Figura 5.9.24 - Aplicação de valor constante de $\beta = 0,2$ à equação de Rouse, além da correção em w , devido à concentração.

Conclui-se que o valor de β (relação entre os coeficientes de difusão de sólidos e de transferência de momento) para soluções de polímero e areia BC é praticamente constante ($\beta = 0,175$ para 100 ppm e $\beta = 0,2$ para 400 ppm) e muito menor que os valores sem polímero.

Em misturas de solução de polímero e areia BC, a equação 5.9.1 de correção nos valores de velocidade de sedimentação foi previamente testada de acordo com valores do expoente n fornecidos por Cheng, Nian-Sheng (1997), porém estes valores de velocidade de sedimentação corrigidos pela concentração e pelo número de Reynolds da partícula, quando inseridos na equação de Rouse, não se ajustaram bem aos pontos obtidos experimentalmente. Assim optou-se pela adoção do expoente $n = 4,5$ de Wasp et al (1977) em todas as correções no valor da velocidade de sedimentação de acordo com a equação 5.9.1.(mesmo para as suspensões de polímero com areia). Esta opção indica que o valor de n de Cheng, Nian-Sheng (1997) válidos para água, quando utilizados para soluções de polímero, não fornece concordância imediata (aplicação dos valores corrigidos de velocidade de sedimentação através de n) na equação de Rouse.

5.10 – Lei da Diferença de velocidade (“Law of Deficiency”)

Aborda-se a lei de diferença de velocidade para os escoamentos de água e de água com areia BC e A.

5.10.1 - Lei da Diferença de velocidade (“Law of Deficiency”) para escoamento de água

As Figuras 5.10.1, 5.10.2 e 5.10.3 representam a Lei da Diferença de Velocidades ou “Law of Deficiency” ou “Defect Law” para os valores de velocidades pontuais, sem correção obtidos com o tubo de Pitot e correspondem respectivamente aos ensaios **Água 1**, **Água2** e **Água 3**.

Estas Figuras representam os valores do parâmetro $(u_{\max} - u)/u^*$ em função do parâmetro $2,5 \ln(R/y)$. A igualdade entre estes parâmetros corresponde à Lei de diferença de velocidades obtida a partir da equação adimensional para o centro turbulento e tubos lisos: $u^+ = 2,5 \ln y^+ + 5,5$.

Encontram-se apresentados nestes gráficos, as equações de ajuste linear. O inverso da constante de von Karman, 2,50, encontra-se mais próximos aos valores do ensaio **Água 3**, como pode-se verificar pela curva de ajuste deste ensaio. Isto deve-se provavelmente ao tempo de batelada maior deste ensaio. Doravante todos os ensaios com água seguiram aproximadamente este tempo de batelada.

As Figuras 5.10.4, 5.10.5 e 5.10.6 representam os valores de $(u_{\max} - u)/u^*$ em função de $1-(y/R)$, dos ensaios **Água 1**, **Água2** e **Água 3**. Observa-se que o ajuste polinomial indica a relativamente boa concordância dos dados obtidos com o tubo de Pitot à lei de diferença de velocidades, de acordo com as equações 3.3 e 3.3a.

5.10.2 – Lei da diferença de velocidade ou “Law of Deficiency” para **Água + Areia BC**

Utilizando-se dos valores de velocidade máxima obtidos das distribuições verticais de velocidade (sem fator de correção do Pitot) no tubo, foram determinados os valores

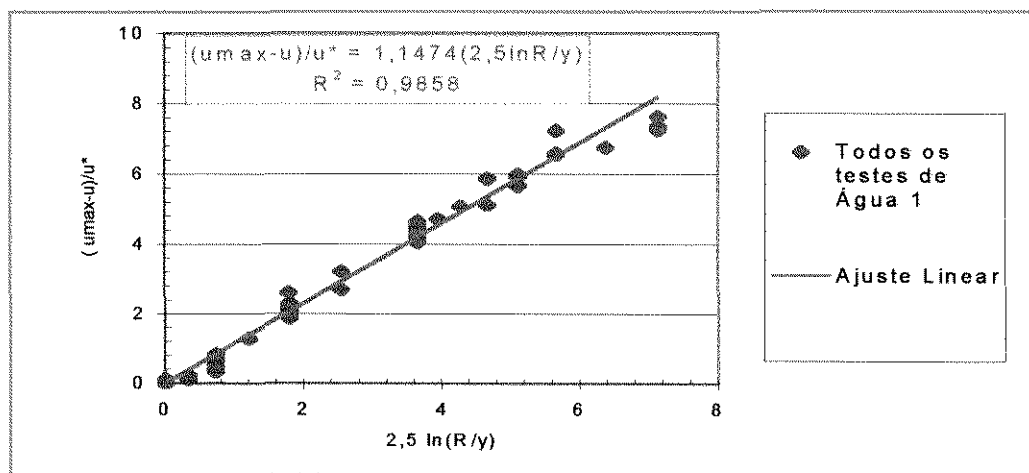


Figura 5.10.1 – Lei da diferença de velocidade para todos os testes de **Água 1. Valores experimentais de Pitot sem fator de correção.**

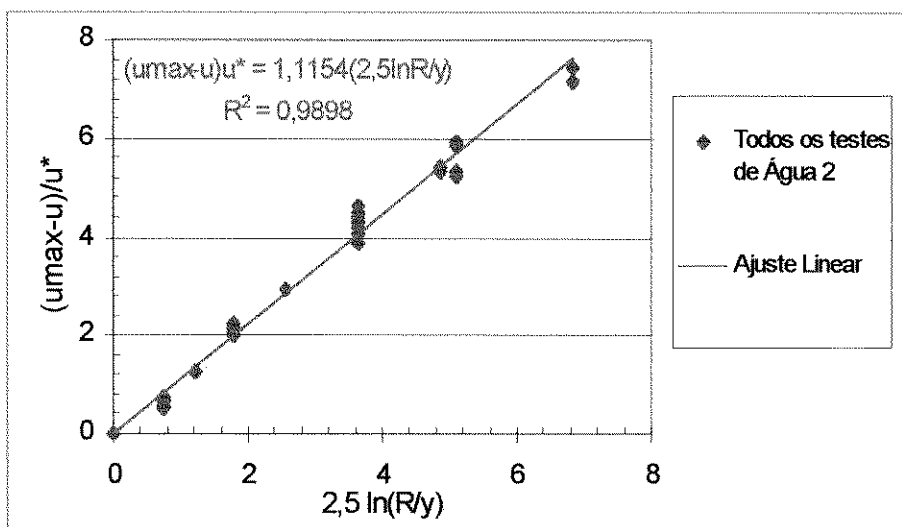


Figura 5.10.2 – Lei da diferença de velocidade para todos os testes de Água 2. Valores experimentais de Pitot sem fator de correção.

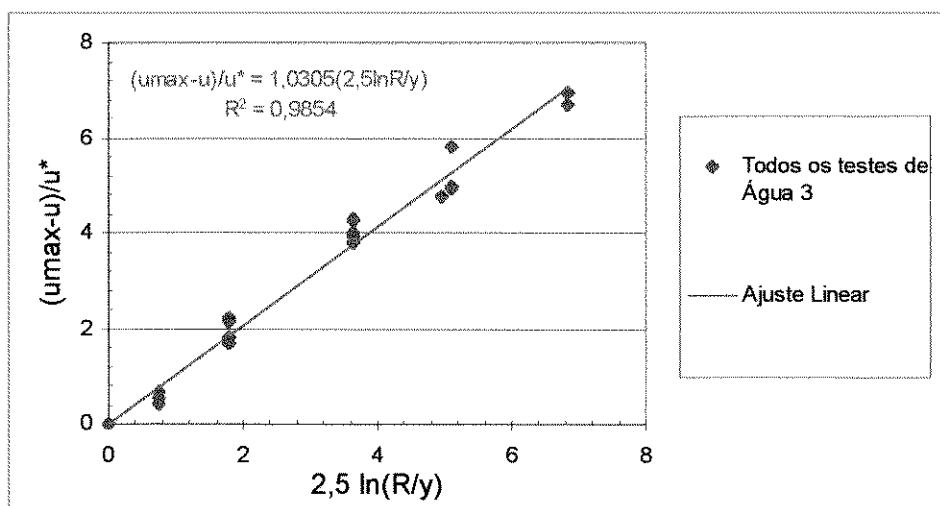


Figura 5.10.3 – Lei da diferença de velocidade para todos os testes de Água 3. Valores experimentais de Pitot sem fator de correção.

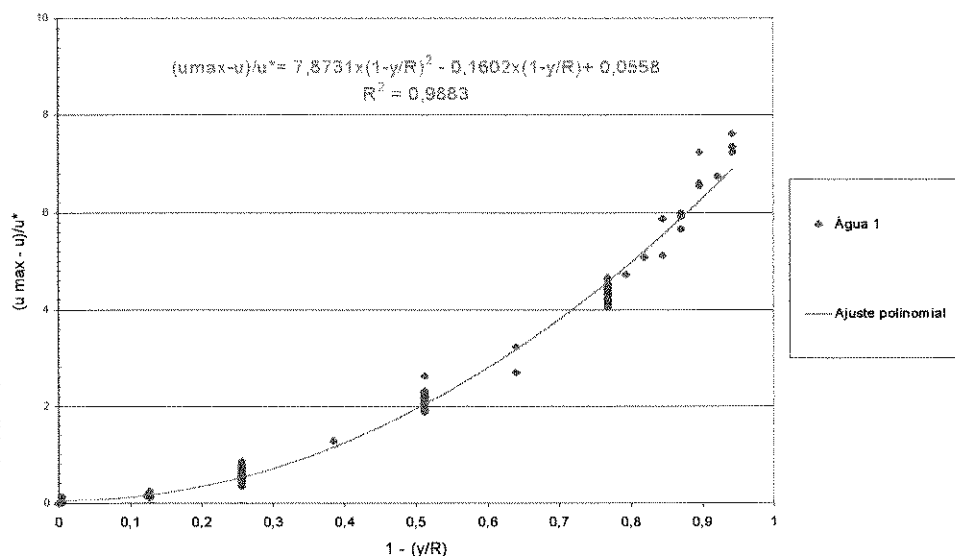


Figura 5.10.4 – Lei da diferença de velocidade para todos os testes de Água 1. Valores experimentais de Pitot sem fator de correção. Ajuste polinomial.

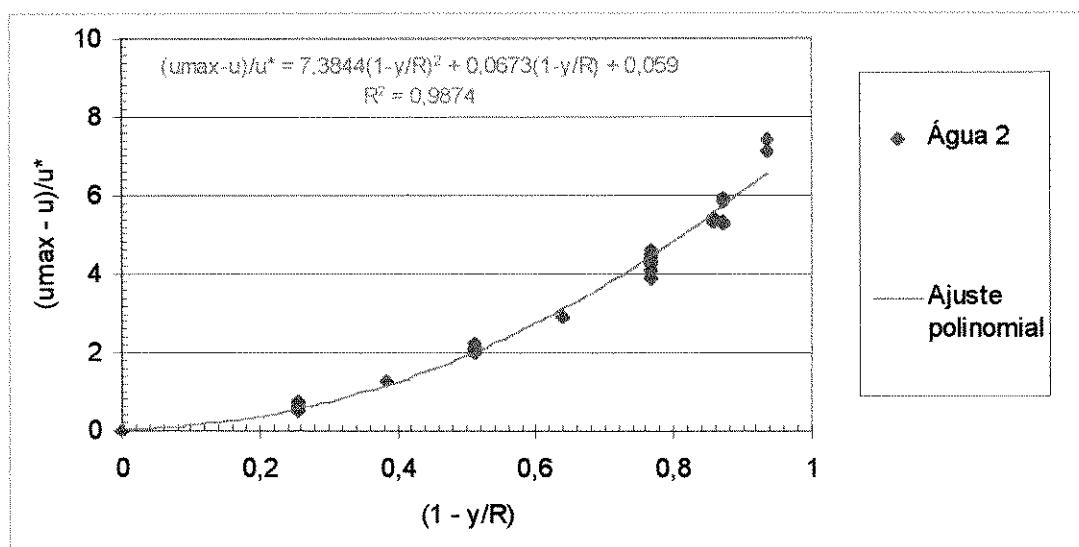


Figura 5.10.5 – Lei da diferença de velocidade para todos os testes de Água 2. Valores experimentais de Pitot sem fator de correção. Ajuste polinomial.

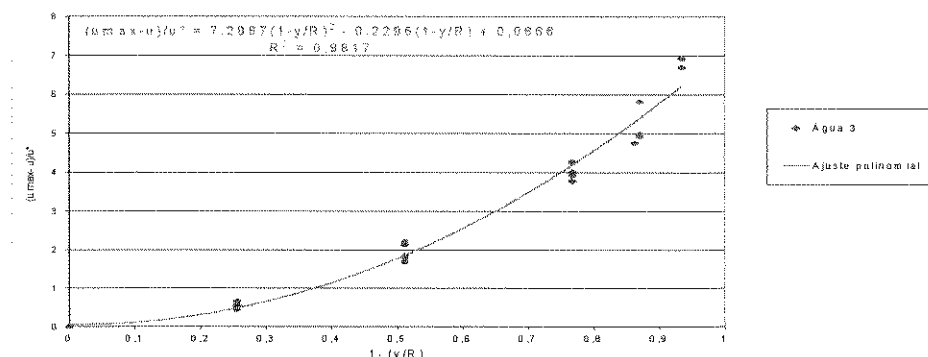


Figura 5.10.6 – Lei da diferença de velocidade para todos os testes de Água 3. Valores experimentais de Pitot sem fator de correção. Ajuste polinomial.

pontuais de $(u_{\max} - u) / u^*$. Estes foram plotados em função de y/D resultando na Figura 5.10.2.1

Na Figura 5.10.2.1 são apresentados todos os testes realizados com leito de sedimentos, na velocidade crítica de sedimentação e no regime heterogêneo (indicado como turbulento).

Observa-se a provável existência de função única a descrever a relação entre $(u_{\max} - u)/u^*$ e y/D para escoamento de mistura sólido-líquido.

Na figura 5.10.2.2 apresenta-se $(u_{\max} - u) / u^*$ em função de y/D para concentração aproximada de 15,3% de areia BC em três vazões diferentes do escoamento heterogêneo. Verifica-se uma certa semelhança entre as três curvas, o que indica a possibilidade de existência de uma função única de $(u_{\max} - u) / u^*$ em função de y/D para uma determinada concentração de sólidos.

5.10.3 – Lei da diferença de velocidades ou “Law of Deficiency” para Água + Areia A

A Figura 5.10.3.1 representa valores de $(u_{\max} - u) / u^*$ em função de y/D para os ensaios de misturas de água e areia A.

Observa-se a provável existência de função única para escoamento com mistura sólido-líquido.

Durand (1953) obteve diversas curvas $(u_{\max}-u)/U$ em função de y/D para areias de diâmetro igual a 0,18 mm. E para areia de diâmetro 2,04 mm a função torna-se independente da velocidade, e obteve também que a distribuição de concentração também é independente da velocidade. Assim obteve função única $(u_{\max}-u)/U$ em função de y/D para a areia de 2,04 mm.

Durand (1953) concluiu que para altas velocidade do escoamento, e areia de 0,18 mm de diâmetro, a curva de $(u_{\max}-u)/U$ em função de y/D para fluxo de areia aproxima-se da curva para água limpa, enquanto para menores velocidades, afasta-se.

A Figura 5.10.3.2 representa $(u_{\max} - u)/u^*$ em função de y/D para concentração média aproximada de 1,0% e vazões no escoamento com leito de sedimentos e na condição crítica. Observa-se um pequeno desvio entre as curvas apenas na região inferior a $y/D = 0,5$.

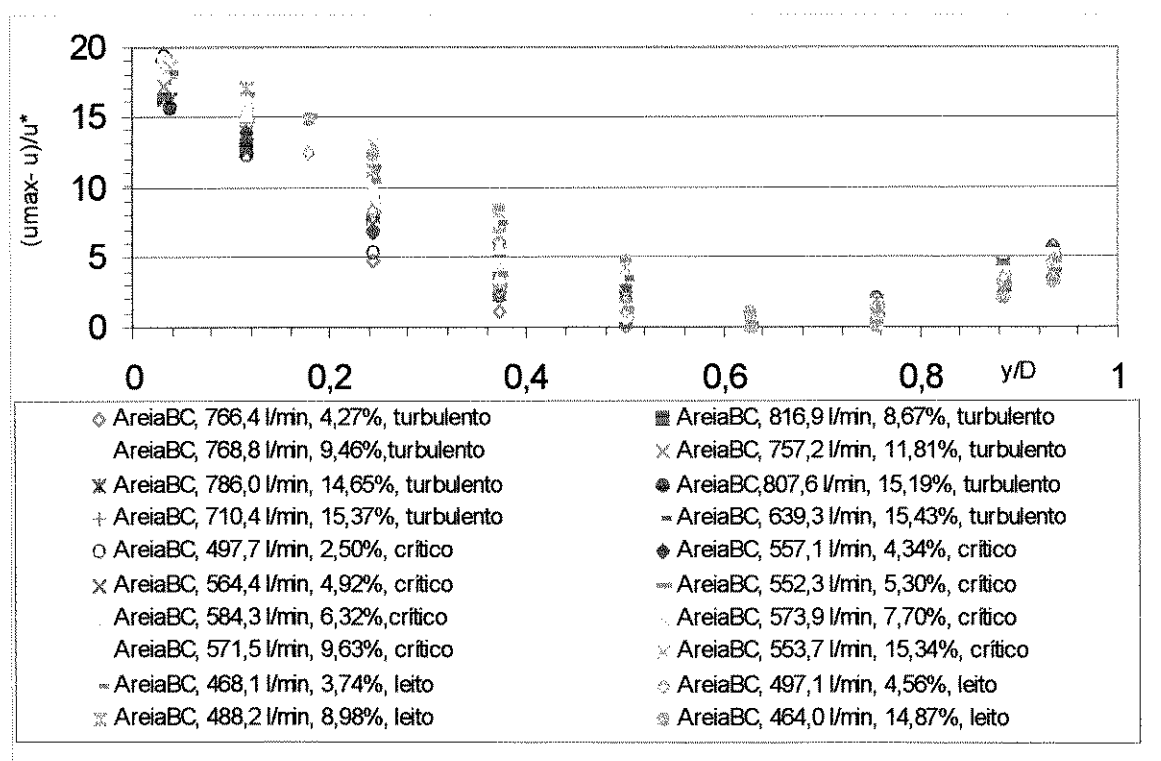


Figura 5.10.2.1 Lei de diferença de velocidade para fluxo de água e areia BC.

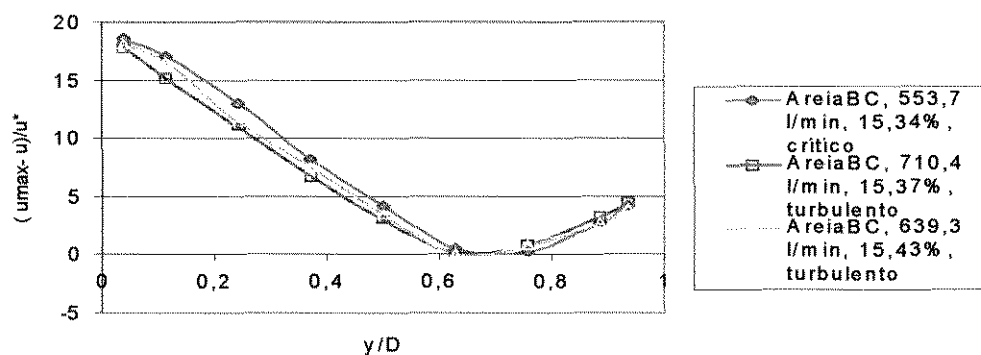


Figura 5.10.3.1 – Lei de diferença de velocidade para escoamento de areia BC em concentração aproximada de 15,3% e vazões no escoamento heterogêneo.

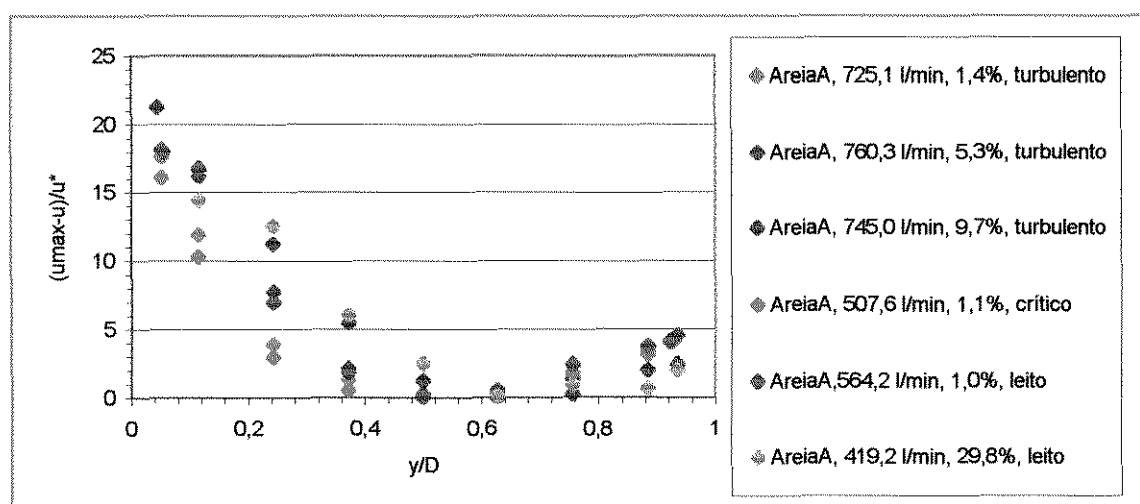


Figura 5.10.3.1 – Lei da diferença de velocidade para fluxo água e areia A

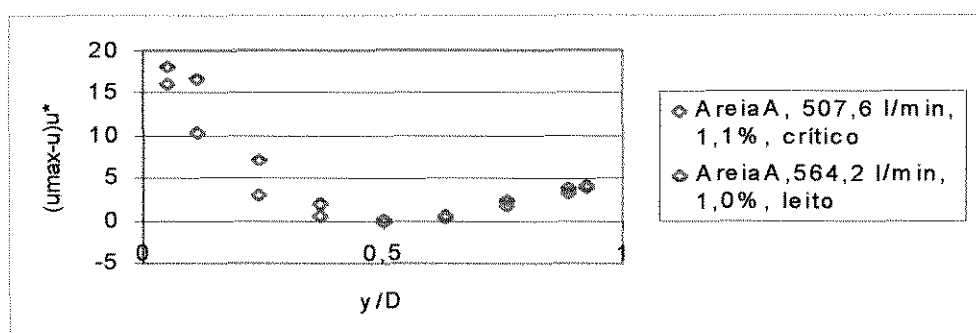


Figura 5.10.3.2 – Lei de diferença de velocidade para concentração aproximada de 1,0% de areia A.

6 - CONCLUSÕES

O ensaio (**Água + Areia BC**) provocou polimento da parede da tubulação de PVC e de acrílico, tornando-os mais lisos, e diminuindo o fator de atrito. Enquanto o ensaio (**Água + Areia A**) provocou, aumento da rugosidade relativa média da tubulação e aumento do fator de atrito.

Para a areia BC, a velocidade crítica de sedimentação encontra-se à direita do ponto de mínima perda de carga, enquanto que para a areia A, excetuando a concentração de 2,0%, ela se encontra à esquerda do ponto de mínima perda de carga. O que indica a não coincidência entre a velocidade crítica (ponto de mínima perda de carga) e a velocidade crítica de sedimentação (ponto em que se inicia o processo de deposição de material no fundo do tubo).

Concluiu-se que o aumento de viscosidade da solução fresca devido ao aumento da concentração do polímero, provoca uma maior dificuldade de suspensão das partículas presentes no tanque, ou seja, o aumento da viscosidade do fluido provoca menor homogeneização da mistura dentro do tanque principal.

Sobre degradação da solução de polímero (numeradas de 1 a 6):

1) Da análise das Figuras 5.3.2.1.30 até 5.3.2.1.35, observou-se que a solução degradada transporta em suspensão mais facilmente, maior quantidade de partículas sólidas do que a solução fresca, uma vez que para uma mesma vazão do fluxo, a solução degradada

transporta sempre maior concentração de areia do que a solução fresca. Esta observação é válida para todas as concentrações de polímero em ensaio, de 200 ppm, 400 ppm e 1200 ppm e de 5%, 10% e 15% de areia BC (ver conclusão anterior).

2) Sobre a degradação da solução de 400 ppm de NALCO 4045 em testes realizados por diminuição da velocidade do fluxo, observou-se que apesar de deixado em repouso por cerca de 206,5 horas, 2 horas em bombeamento constante e sete bateladas de cerca de 30 minutos cada, a solução ainda não atinge em altas velocidades, os mesmos valores de perda de carga do fluxo de água.

3) Conclui-se que para a vazão aproximada de 875 l/min, a solução de 400 ppm degrada-se (por horas de repouso) apresentando maior perda de carga, diminuindo a subcamada elástica (e a velocidade nesta subcamada) e aumentando a velocidade no centro turbulento.

4) Foram determinados valores de perda de carga unitária em função da velocidade em testes de aumento de velocidade pelo aumento da rotação do motor. Observou-se que, para uma dada velocidade do fluxo e concentração de polímero, as perdas de carga são maiores do que no teste por diminuição da rotação do motor, fenômeno este denominado histerese, e que se verificou neste tipo de polímero. O que sugere que as operações de sistemas de bombeamento utilizando soluções poliméricas, devem preferencialmente se iniciar com velocidade alta.

5) Testes de aumento e diminuição da rotação do motor, foram realizados para verificação de degradação mecânica por constante bombeamento da solução. Verificou-se que a solução à 1200 ppm apresentou insignificante degradação quando comparada às demais concentrações. Verificou-se também que apesar dos graduais aumentos e diminuições da rotação do motor, ainda as soluções apresentam elevados valores de redução de arraste em altas velocidades.

6) Verificou-se que só após 42 horas em repouso, em velocidade de 5,4 m/s, o transporte de cerca de 15% de areia BC em 1200 ppm, atingiu o valor de perda de carga igual à da água limpa.

Dos ensaios com mistura de água + areia A apresentam-se as seguintes conclusões (numeradas de 1 a 7):

1) Para uma mesma velocidade média, verificam-se aumentos significativos da perda de carga à medida que se eleva a concentração da mistura, principalmente para o intervalo de velocidades próximo à velocidade crítica de sedimentação.

2) Tem-se para as velocidades mais baixas grandes acréscimos na perda de carga, e a medida que se aumenta a velocidade as diferenças percentuais relativas vão diminuindo. Ou seja, à medida que a mistura vai tornando-se homogênea as curvas de perda de carga das isoconcentrações aproximam-se da curva de perda de carga da água limpa.

3) Para efeito de dimensionamento da instalação deve-se tomar a velocidade crítica como parâmetro, uma vez que, além de se ter a condição de mínima energia dissipada, tem-se assegurada também a não formação do leito estacionário e conseqüentemente a não obstrução da canalização.

4) A velocidade crítica, para a faixa de concentrações da mistura de 1,1% a 12,8%, encontra-se entre os valores 1,45 a 1,80 m/s. Para este intervalo, tem-se os seguintes acréscimos médios da perda de carga unitária: para concentração de 2%, 171,5%; para a concentração de 5%, 283,1%, e para a concentração de 10%, 492,0%.

5) O aumento da energia dissipada, ao elevar a concentração do sólido da mistura, na faixa de dimensionamento da instalação, leva o projetista a utilizar mecanismo que amenize estes aumentos. Um dos mecanismos é adicionar substâncias redutoras de arraste como os polímeros.

6) Observou-se redução da velocidade crítica de sedimentação ao aumentar a concentração do sólido da mistura.

7) Foram obtidas as equações que permitem calcular a velocidade crítica de sedimentação e crítica para a concentração desejada de areia A.

Dos ensaio com mistura de água + areia BC resume-se as seguintes conclusões (numeradas de 1 a 5):

1) A velocidade crítica de sedimentação e a velocidade crítica aumentam ao se elevar a concentração do sólido da mistura. Foram obtidas as equações dessas velocidades em função da concentração desejada de areia BC

2) Para uma mesma velocidade média, tem-se aumentos da perda de carga à medida que se eleva a concentração da mistura, principalmente para o intervalo de velocidades próxima à velocidade crítica de sedimentação. A medida que se aumenta a velocidade de escoamento há uma tendência das curvas de isoconcentrações aproximarem da curva referente a água limpa.

3) Para as concentrações ensaiadas, as velocidades crítica de sedimentação e crítica encontram-se na faixa entre 1,30 m/s e 2,10 m/s. Para esta faixa de velocidades tem-se os seguintes acréscimos médios na perda de carga unitária, expressos em diferenças percentuais relativas: para a concentração de 2%, 56,0%; para a concentração de 5%, 105,0%, para a concentração de 10%, 135,9%, e para a concentração de 15%, 194,2%.

4) A curva referente à velocidade crítica está a esquerda da curva correspondente à velocidade crítica de sedimentação, isto indica que, para o dimensionamento de instalações de recalque de misturas constituídas de água e areia BC, deve-se tomar como parâmetro a velocidade crítica de sedimentação. Caso se tome a velocidade crítica como parâmetro de dimensionamento corre-se o risco de formação de leito estacionário e consequentemente obstrução da tubulação.

5) Dos valores de v_{cs} obtidos por **Durand, R. (1953)**, e dos obtidos para as areias A e BC, observa-se que a areia A de maior tamanho apresenta menor valor de v_{cs} do que a areia BC, nas concentrações médias de 5 e 10%.

Quanto à influência do tamanho do grão do sólido na perda de carga, na velocidade crítica de sedimentação, e na velocidade crítica, foram obtidas as seguintes conclusões (numeradas de 1 a 3):

1) A areia A, de maior diâmetro, mantidas constantes a velocidade e a concentração, provoca perdas de carga maiores. À medida que se diminui a velocidade a diferença entre as perdas aumentam. Para velocidades maiores a diferença vai se reduzindo.

2) Para uma mesma concentração, a velocidade crítica de sedimentação aumenta ao se reduzir o tamanho do grão de areia. À medida que a concentração assume valores muito baixos há a tendência de não influência do tamanho do grão de areia na velocidade crítica de sedimentação.

3) Para uma mesma concentração, a velocidade crítica aumenta ao se elevar o tamanho do grão de areia. À medida que a concentração assume valores muito baixos há a tendência de não influência do tamanho do grão de areia na velocidade crítica.

Dos ensaios sobre perda de carga com soluções de polímero, obteve-se as seguintes conclusões:

1) Verificam-se reduções significativas na perda de carga à medida que se aumenta a concentração do polímero. As reduções vão se tornando mais expressivas para velocidades mais altas, demonstrando que esta solução tem mais eficiência no escoamento turbulento.

2) Os valores médios das reduções foram os seguintes: para $C_p=100$ ppm, 27%; para $C_p=400$ ppm, 56,1%, e para $C_p=600$ ppm, 57,3. Apresenta-se equação de cálculo de reduções de perda de carga em função da concentração do polímero.

Dos ensaios de perda de carga com soluções de água – polímero - areia BC foram obtidas as seguintes conclusões:

1) Para concentrações: areia a 2%, e polímero a 100ppm e 400ppm:

1.1) O polímero a 100 ppm, praticamente não provocou redução na perda de carga, enquanto que para a concentração de 400 ppm notou-se uma razoável redução.

1.2) Os valores das reduções médias, expressas em diferenças percentuais relativas, para o intervalo de velocidades considerados, de 0,5 a 5,0 m/s, provocadas pela adição do polímero a 100, e 400 ppm, foram de 1,3; e 21,9%.

1.3) As perdas de carga unitária, correspondentes às velocidades crítica de sedimentação e crítica, devido ao escoamento da mistura do sólido a 2%, ao adicionar o polímero sofreram as seguintes reduções: no caso das soluções de polímero a 400 ppm, redução na perda de carga de 31,4 %, se considerar a velocidade crítica de sedimentação, e de 33,3 %, se considerar a velocidade crítica.

2) Para concentrações: areia a 5%, e polímero a 100ppm, 200 e 400ppm:

2.1) O polímero a 100 ppm, praticamente não provocou redução na perda de carga, enquanto que para a concentração de 400 ppm nota-se uma razoável redução.

2.2) Os valores das reduções médias, expressas em diferenças percentuais relativas, para o intervalo de velocidades considerados, de 0,5 a 5,0 m/s, provocadas pela adição do polímero a 200, e 400 ppm, foram de 35,8; e 48,8%.

2.3) As perdas de carga unitária, referentes às velocidades crítica de sedimentação e crítica, devido ao escoamento da mistura do sólido a 5%, sofreram, no caso das soluções de polímero a 200 ppm, redução de 30,1%, se considerar a velocidade crítica de sedimentação, e de 24,%, se considerar a velocidade crítica. Para a concentração de polímero a 400 ppm,

tem-se redução na perda de carga de 52,7%, se considerar a velocidade crítica de sedimentação, e de 53,6%, ao considera a velocidade crítica.

3) Para concentrações: areia a 10%, e polímero a 100ppm, 200 e 400ppm:

3.1) As reduções provocadas pelas soluções de polímero a 100 ppm e 200 praticamente são as mesmas, havendo razoável redução para a concentração de 400 ppm.

3.2) Os valores das reduções médias, expressas em diferenças percentuais relativas, para o intervalo de velocidades considerados, de 0,5 a 5,0 m/s, provocadas pela adição do polímero são as seguintes: a 100 ppm, 10,4%; a 200 ppm, 9,1%; e a 400 ppm, 28,1%.

3.3) As perdas de carga unitária, correspondentes às velocidades crítica de sedimentação e crítica, devido ao escoamento da mistura do sólido a 10%, sofreram, ao adicionar o polímero no a 100 ppm, redução de 1,5 %,quando se considera a velocidade crítica de sedimentação, e de 8,0 %, ao se considerar a velocidade crítica. Para a concentração de polímero a 200 ppm, tem-se redução na perda de carga de 5,6 %, quando se considera a velocidade crítica de sedimentação, e de 8,0 %, ao se considerar a velocidade crítica. Para a concentração de polímero a 400 ppm, tem-se redução na perda de carga de 22,6 %, quando se considera a velocidade crítica de sedimentação, e de 21,8 %, ao se considerar a velocidade crítica.

4) Para concentrações: areia a 15%, e polímero a 100ppm, 200 e 400ppm:

4.1) As reduções maiores, devido a adição do polímero independente da sua concentração, ocorrem para velocidades mais baixas, no escoamento heterogêneo com leito estacionário, ou mais elevadas com tendência ao regime de escoamento homogêneo. Os valores das reduções, expressas em diferenças percentuais relativas, para o intervalo de velocidades considerados, de 0,5 a 5,0 m/s, as reduções médias, provocadas pela adição do polímero são as seguintes: a 100 ppm, 14,0%; a 200 ppm, 18,3%; e a 400 ppm, 29,4%.

4.2) As perdas de carga unitária, correspondentes às velocidades crítica de sedimentação e crítica, devido ao escoamento da mistura do sólido a 15%, sofreram, ao adicionar o polímero no a 100 ppm, redução na perda de carga de 7,8 %, quando se considera a velocidade crítica de sedimentação, e de 4,2% ao se considerar a velocidade crítica. Para as concentrações de polímero a 200 ppm, e 400 ppm tem-se a redução na perda de carga de 19,2%, quando se considera a velocidade crítica.

5) Para concentrações: areia a 7,2% e 14%, e polímero a 1.200ppm:

5.1) O aumento médio da perda de carga, ao praticamente dobrar a concentração do sólido de 7,2% para 14%, para a faixa de velocidades de 0,5 m/s à 5,0 m/s, e polímero a 1200 ppm foi de 25,6%.

6) Para concentrações: areia a 8,1% e polímero a 600 ppm:

6.1) Para a faixa de velocidades de 0,5 m/s a 5,0 m/s a redução média foi de 42,4%.

Em relação à velocidade crítica de sedimentação – escoamento de misturas com polímero, foram tiradas as seguintes conclusões:

1) A velocidade crítica de sedimentação resulta bons ajustes do tipo logarítmico em relação à concentração do sólido, apresenta-se a equação obtida.

2) Em relação à perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, obteve-se bons ajustes à equação do tipo potência em relação à concentração do sólido.

Em relação à velocidade crítica— escoamento de misturas com polímero, foram obtidas as seguintes conclusões:

- 1) A velocidade crítica resulta ajustes perfeitos do tipo linear em relação à concentração do sólido.
- 2) A perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica, resulta bons ajustes à equação do tipo logarítmica em relação à concentração do sólido.

Quanto à influencia do polímero na velocidade crítica de sedimentação e na correspondente perda de carga unitária tem-se as seguintes conclusões:

- 1) Das Figuras 5.7.3, 5.7.4 e 5.7.5, para a areia BC, pode-se observar que em presença de polímero, a vazão correspondente à velocidade crítica de sedimentação é menor do que em presença de água. Conclui-se portanto que para igual concentração de sólidos, a solução polimérica necessita de menor velocidade média de transporte do que o fluxo de água sem polímero.
- 2) A velocidade crítica de sedimentação eleva-se ao aumentar a concentração do sólido. Para uma determinada concentração do sólido a velocidade crítica de sedimentação diminui ao aumentar a concentração do polímero. Esta redução na velocidade crítica de sedimentação não é tão significativa.
- 3) As reduções médias da velocidade crítica de sedimentação, devido ao polímero, considerando a faixa de concentração do sólido de 2% a 18% em volume, foram as seguintes: para a concentração do polímero de 100 ppm, 6,2%, para 200 ppm, 5,0%, e para 400 ppm, 8,8%.

4) A perda de carga unitária, correspondente à velocidade crítica de sedimentação, eleva-se ao aumentar a concentração do sólido. Para uma determinada concentração do sólido a perda de carga unitária diminui ao aumentar a concentração do polímero.

5) As reduções médias da perda de carga unitária, devido ao polímero, considerando a faixa de concentração do sólido de 2% a 18% em volume, foram as: para a concentração do polímero de 100 ppm, 7,9%, para 200 ppm, 13,8%, e para 400 ppm, 23,3%.

6) As diferenças relativas percentuais entre as velocidades críticas de deposição com e sem polímero, expressas por $(V^* = ((V_{cp} - V_c)/V_c).100)$, e as correspondentes diferenças relativas percentuais entre perdas de carga com e sem polímero, dadas por $(J^* = ((J_{cp} - J_c)/J_c).100)$, decrescem ao aumentar a concentração do polímero, com tendências de se manterem constantes para concentrações mais altas de polímero.

7) A partir de determinado valor da concentração de polímero, incrementos da concentração desta substância, não provocarão reduções de V^* e J^* , ou seja, dependendo da concentração do sólido a ser transportado, existirá uma concentração limite de polímero.

8) Do ponto de vista de operação do sistema de recalque de sólido, a adição de polímero proporciona benefícios a serem considerados, tais como: o transporte de determinado volume de sólido pode ser feito com velocidades menores reduzindo os desgastes abrasivos, e conseqüentemente os custos de manutenção; o transporte de determinado volume de sólido pode ser feito com dissipação de energia reduzida, diminuindo os custos operacionais.

9) No transporte de mistura água-areia na concentração de 10% em volume da mistura foram as seguintes as variações das velocidades críticas de deposição e correspondentes perda de carga unitária expressas em diferenças relativas percentuais: para $C_p = 100$ ppm, $V^* = +9,0 \%$, $J^* = +3,0 \%$; para $C_p = 200$ ppm, $V^* = +5,3 \%$, $J^* = -4,6 \%$; para $C_p = 400$ ppm, $V^* = +2,1 \%$, $J^* = -19,8 \%$; para $C_p = 600$ ppm, $V^* = -17,0 \%$, $J^* = -50,0 \%$; para $C_p = 800$ ppm, $V^* = -20,2 \%$, $J^* = -56,5 \%$; para $C_p = 1200$ ppm, $V^* = -24,5 \%$, $J^* = -65,1 \%$.

10) No transporte de mistura água-areia na concentração de 15 % em volume da mistura foram as seguintes as variações das velocidades críticas de deposição e respectivas perda de carga unitária expressas em diferenças relativas percentuais: para $C_p = 100$ ppm, $V^* = 0,0 \%$, $J^* = -8,4 \%$; para $C_p = 200$ ppm, $V^* = -7,0 \%$, $J^* = -22,9 \%$; para $C_p = 400$ ppm, $V^* = -16,0 \%$, $J^* = -34,5 \%$; para $C_p = 800$ ppm, $V^* = -24,5 \%$, $J^* = -61,5 \%$; para $C_p = 1200$ ppm, $V^* = -29,5 \%$, $J^* = -63,6 \%$.

Em relação à influencia do polímero na velocidade crítica e na correspondente perda de carga unitária tem-se as seguintes conclusões:

1) A velocidade crítica eleva-se ao aumentar a concentração do sólido. Para uma determinada concentração do sólido a velocidade crítica somente sofre redução para a concentração do polímero a 400 ppm. Para as concentrações do polímero menores que 400 ppm a velocidade crítica aumenta com a redução da concentração do polímero.

2) As reduções médias da velocidade crítica, devido ao polímero, considerando a faixa de concentração do sólido de 2% a 18% em volume, foram as seguintes: para a concentração do polímero de 100 ppm, -21,4%, para 200 ppm, -18,5%, e para 400 ppm, 1,5%.

3) A perda de carga unitária eleva-se ao aumentar a concentração do sólido. Para uma determinada concentração do sólido a perda de carga unitária diminui ao aumentar a concentração do polímero.

4) As reduções médias da perda de carga unitária, devido ao polímero, considerando a faixa de concentração do sólido de 2% a 18% em volume, foram as seguintes: para a concentração do polímero de 100 ppm, 9,0%, para 200 ppm, 18,3%, e para 400 ppm, 25,4%.

Comparação entre V_{cs} obtido experimentalmente e através de correlações de diversos pesquisadores:

1) Observou-se diferença entre os valores de V_{cs} obtidos de diversas correlações existentes e para a areia BC em água. A V_{cs} experimental em menor concentração de 2%, assume aproximadamente o maior valor de V_{cs} de Wilson, W.E.(1942) e em maior concentração, em cerca de 10%, assume o valor de Durand & Condolios (1952).

2) Concluiu-se que para a areia BC, pode-se estimar o valor de u_0^* pelo processo de intersecção das curvas de $J = f(V)$ para a água limpa e para a velocidade crítica de sedimentação em função da concentração. E para a areia A, o processo mais adequado de determinação de u_0^* é através do cálculo direto das Equações de THOMAS.

3) Conclui-se assim que para a areia BC, a velocidade crítica de sedimentação da areia BC por aumento de velocidade do escoamento aparentemente não difere da velocidade crítica de sedimentação da areia BC por diminuição da velocidade do escoamento

4) A velocidade crítica de sedimentação e a correspondente perda de carga elevam-se ao aumentar a concentração do sólido transportada mistura.

5) Para a areia BC, os valores de perda de carga unitária experimentais são menores que os calculados pelas equações de Turian et al (1977).

6) Para a areia A, os valores de perda de carga unitária experimentais são menores que os calculados pelas equações de Turian et al (1977) para valores de velocidade maiores que 2m/s, sendo que para velocidades menores que 2m/s os valores de J são aproximadamente iguais.

7) Os resultados experimentais indicaram a convergência das curvas de equiconcentrações de $J = f(v)$, em altas velocidade em direção à curva de água limpa. Esta convergência foi verificada em aproximadamente 5 m/s para a areia BC e em aproximadamente 5,5 m/s para a areia A. Porém as equações de Turian et al (1977) indicam convergência em velocidades muito superiores.

Fator de atrito de Fanning

1) O fator de atrito de Fanning assume valores muito maiores do que os obtidos para água limpa no escoamento com leito de sedimentos e diminui consideravelmente no escoamento de maiores velocidades até assintoticamente atingir os valores da água limpa.

2) Para velocidades altas o fator de atrito independe da concentração e da velocidade.

3) Para velocidades baixas o fator de atrito depende da concentração e da velocidade.

4) De modo semelhante ao que se verificou para fluxo de água e areia BC, o fator de atrito possui função semelhante ao que se observa em fluidos não Newtonianos, tipo plástico de Bingham.

5) A Figura 5.6.4.1 apresenta o fator de atrito de Fanning em função da velocidade média do fluxo de solução de polímero a 100 ppm, 200 ppm e 400 ppm. Verifica-se neste gráfico que para toda a faixa obtida de velocidade, as soluções de polímero apresentam fator de atrito menor do que a água limpa. Maiores concentrações de polímero e maiores velocidades médias do fluxo, apresentam menor fator de atrito.

6) As Figuras 5.6.4.2 e 5.6.4.3 apresentam o fator de atrito de Fanning em função da velocidade média do fluxo para concentrações aproximadas de areia BC iguais a 5% e 15% em respectivamente 100 ppm e 400 ppm de polímero. Nestes gráficos se observa o alto fator de atrito no escoamento com leito de sedimentos. Para 100 ppm e 15% de areia BC, o fator de atrito atinge os valor da água em alta velocidade média de aproximadamente 6 m/s (Figura 5.6.4.2). Para 100 ppm e 5% de areia BC, atinge o valor da água em velocidade de 2,6 m/s e diminui em velocidades maiores (Figura 5.6.4.2).

7) Na Figura 5.6.4.3 observa-se que a 400 ppm, o transporte de 5% de areia BC apresenta redução do fator de atrito para valores menores do que os da água em velocidades superiores a 2,1 m/s. O transporte de 15% de areia BC apresenta valores de fator de atrito menores que os da água para velocidade superiores a 2,7 m/s. O que indica que maiores

concentrações de areia exigem maior turbulência para garantir redução de arraste de valor menor que o arraste da água.

Distribuição vertical de velocidades

1) Para mistura de água e areia BC, observa-se nas Figuras de distribuição vertical de velocidade, a não simetria em relação ao eixo central e longitudinal do tubo, como se verifica no escoamento de água sem areia.

2) Nas Figuras 5.7.1 e 5.7.2, observa-se que adição de 100 ppm de polímero à água com areia BC, causa uma distribuição de velocidade pontual de água e areia BC igual à distribuição de velocidade pontual de solução à 100 ppm com areia BC, para as vazões e concentrações médias indicadas. Embora as distribuições de velocidade sejam praticamente iguais, deve-se notar que para mesma vazão, a adição de polímero permite o transporte de maior concentração média de sólido. Na Figura 5.7.1, este aumento de concentração foi de 4,27% para 6,1%, ou seja, o aumento foi de 40%. Na Figura 5.7.2, o aumento foi de 9,46% para 10,6%, ou seja, o aumento foi de 12%.

3) Quando se compara os perfis de velocidade de areia com o perfil da água, observa-se que devido à distribuição de concentração de areia, crescente desde o topo à base do tubo, ocorre um retardamento na velocidade do fluido na base do tubo, com compensação de aumento de velocidade na parte superior da tubulação.

4) Na Figura 5.7.1, com concentração média de 5,0%, os perfis de velocidade da areia BC sem e com polímero, têm uma vazão média de 768 l/min, e a da areia A tem uma vazão de 760 l/min, portanto uma redução de 1% na vazão. Se compararmos as velocidades pontuais médias máximas dos perfis de areia BC (sem e com polímero) com a da areia A, observa-se que esta redução é cerca de 6%. Isto deve-se à maior granulometria da areia A do que da areia BC, que devido ao atrito, retarda a velocidade do fluxo da água.

5) Na Figura 5.7.2, com concentração média 10%, observa-se que para uma redução de 4% na vazão da areia BC (sem e com polímero) em relação a da areia A, observa-se uma redução de 17% na velocidade pontual máxima do fluxo com areia A.

6) Na Figura 5.7.2, a vazão média para fluxo de areia A igual a 745,0 l/min é menor do que a vazão de água, 787,5 l/min, porém ainda pode-se observar que a areia A causa diminuição de velocidade na base do tubo e uma compensação de aumento de velocidade na parte superior do tubo.

7) Comparando-se as Figuras 5.7.1 (5%) e 5.7.2 (10%), os perfis de velocidade da areia BC (sem e com polímero) e a da areia A ficam cada vez mais distintas da forma parabólica com o aumento da concentração, particularmente na parte inferior do tubo onde há uma tendência de distribuição linear de velocidade. Deve-se observar que nos dois gráficos, a vazão da areia A é menor que da areia BC e que a concentração da areia A é maior que da areia BC. De modo que as diferenças nos dois perfis deve também ser atribuída a estes fatores.

8) Na Figura 5.7.3 apresentam-se as distribuições verticais de velocidade pontual de fluxo de água e areia BC, de fluxo de água e areia A e de fluxo de 400 ppm de polímero com areia BC, na condição de velocidade crítica de sedimentação para concentrações aproximadas. Para concentração em torno de 4% de areia, a vazão média é maior para a areia BC do que para a areia A, ou seja, a velocidade crítica de sedimentação da areia BC ($d_{50} = 0,20$ mm) é maior que a velocidade crítica de sedimentação da areia A ($d_{50} = 1,30$ mm).

9) Da Figura 5.7.4, concentração de 10%, observa-se que os perfis de velocidade para a areia BC (sem e com polímero) são aproximadamente lineares na metade inferior do tubo. Já nas Figuras 5.7.5 e 5.7.6, para a concentração de 15%, estes perfis são aproximadamente lineares na região abaixo de $y/D = 0,6$. Este fato indica uma tendência de aumento da linearidade da distribuição de velocidade com o aumento da concentração.

10) O gradiente de concentração de sólidos ao longo da vertical deforma o perfil de velocidade. Tal perfil deixa de ser simétrico, apresentando velocidade máxima acima do

centro do tubo e em posição que depende da velocidade média e da concentração média de sólidos presente no fluxo.

Perfis adimensionais de velocidade

1) Os pontos u^+ e y^+ obtidos experimentalmente com a água, situaram-se sobre a curva $u^+ = 2,5 \ln y^+ + 5,5$. Para misturas de água e areia o gráfico da função $y^+ = f(u^+)$ não se apresenta através de uma única função. Pontos acima da posição y^+ correspondente ao máximo valor de u^+ definem praticamente uma função com mesma inclinação da obtida para a água limpa (ou seja $K =$ constante de Von Karman $= 0,4$). Pontos situados abaixo deste máximo valor de u^+ definem outra função com diferente inclinação e função da velocidade média do fluxo e da concentração média de sólidos.

2) Para as diversas vazões ensaiadas, baixas e altas vazões e concentrações médias de areia BC menores que 14,7%, o perfil adimensional de velocidades para fluxo de água e areia BC parece apresentar-se composto das seguintes camadas, desde a posição superior do tubo até a mínima posição inferior do tubo: subcamada viscosa até $y^+ = 11,6$; centro turbulento com comprimento de mistura constante (constante de Von Karman igual a 0,4) até o ponto de velocidade pontual máxima ; centro turbulento com comprimento de mistura (kks) constante e menor que 0,4 ; e subcamada laminar com equacionamento do tipo : $u^+ = (kls) y^+$; para pontos próximos à parede, podendo ou não se estender à parede, o que não pode ser definitivamente afirmado uma vez que o tubo de Pitot possui a limitação de não efetuar medições muito próximas à parede do tubo..

3) Para vazões baixas ou altas e grandes concentrações médias no tubo superiores a 14,7% de areia BC, observa-se a partir dos valores obtidos experimentalmente, que pontos de velocidade adimensional u^+ situados em posições inferiores ao seu valor máximo, definem uma função que diferencia-se daquela verificada para a água limpa e apresentam comportamento semelhante ao da subcamada laminar de água limpa. Para a água limpa a equação da subcamada laminar é a seguinte: $u^+ = y^+$. O comportamento semelhante

observado em presença de areia BC pode ser equacionado da seguinte forma : $u^+ = (kls) y^+$, onde kls é um valor constante..

4) Na Figura 5.8.1.4 referente ao fluxo de água e areia BC, observa-se que na velocidade crítica de sedimentação e no turbulento existe uma função entre a constante de Von Kármán (kks) e a concentração média de sólidos (C_v). Os polinômios apresentados como resultado de ajuste aos diversos pontos de vazão da tabela 5.8.1.1, tanto para o escoamento na crítica de sedimentação como no turbulento, são portanto polinômios obtidos para uma vazão média respectivamente igual a (557 ± 28) l/min e (784 ± 24) l/min.

5) Nesta pesquisa, para fluxo de água e areia BC, verificou-se que para concentrações médias superiores a aproximadamente 14,7%, na zona de fluido pesado, a função de velocidade adimensional diferencia-se de uma lei logarítmica e apresenta comportamento semelhante ao da subcamada laminar de água limpa. Para a água limpa a equação da subcamada laminar é a seguinte: $u^+ = y^+$. O comportamento semelhante observado em presença de areia BC pode ser equacionado da seguinte forma : $u^+ = (kls) y^+$, conforme verificado anteriormente.

6) De todos os testes realizados com água e areia A, conclui-se que na zona de fluido leve tem-se comprimento de mistura constante, ou seja constante de Von Karman igual a 0,40. Conclusão idêntica foi observada no escoamento de água e areia BC e também no escoamento de soluções de polímero com areia BC.

7) Na zona de fluido leve, para uma mesma vazão média, quanto maior for a concentração média transportada, menores são as velocidades adimensionais pontuais, para os escoamentos leito de sedimentos e heterogêneo (Figuras A2-12 e A2-13, ANEXO 2).

8) Na zona de fluido pesado, pequenas concentrações em torno de 1% de areia A em água, mantém comprimento de mistura praticamente constante até u^+ aproximadamente igual a 5 (Figura A2-10, ANEXO 2).

9) Na Figura A2-11, ANEXO 2, observa-se que em concentração aproximada de 5% de areia A, no escoamento turbulento, tem-se comprimento de mistura constante na zona de

fluido pesado até $u^+ = 7$, aproximadamente o que indica uma função $u^+ = f(y^+)$ do tipo logarítmica. E na condição de velocidade crítica de sedimentação, escoamento com menor velocidade média, a zona de fluido pesado adquire forma diferenciada com $u^+ = f(y^+)$ do tipo linear (semelhante ao comportamento da subcamada viscosa).

10) Na Figura A2-12, ANEXO 2, pode-se observar o efeito do aumento da concentração nas zonas de fluido leve e fluido pesado. A região de comprimento de mistura igual a 0,4 (zona de fluido leve), torna-se mais estreita com o aumento da concentração média. Na zona de fluido pesado, as concentrações de 4,1% e 29,8% apresentam $u^+ = f(y^+)$ do tipo linear (semelhante ao comportamento da subcamada viscosa).

11) Observa-se nos perfis adimensionais de velocidade, o comprimento de mistura constante na zona de fluido leve para todos os tipos de mistura sólido-líquido. A velocidade adimensional u^+ em presença de polímero é sempre maior do que na mistura sem polímero. Na zona de fluido pesado observa-se a diminuição do comprimento de mistura em todos os tipos de mistura apresentados (redução na constante de Von Karman).

12) Nas Figuras 5.8.3.1 e 5.8.3.2 apresenta-se o perfil adimensional de velocidade $u^+ = f(y^+)$ para vazão e concentração aproximadas no escoamento heterogêneo de areias A e BC em água e em solução de 100 ppm de polímero. Nestes gráficos, observa-se na zona de fluido leve que a areia BC possui maior velocidade adimensional u^+ do que a areia A. Este efeito é atribuído à diferença entre as granulometrias das areias BC e A. Na zona de fluido leve, a velocidade pontual do fluxo de areia BC é maior que a velocidade pontual do fluxo de areia A, enquanto que a perda de carga do fluxo de areia A é maior que a da areia BC. Observa-se que estes dois efeitos são somados causando a maior velocidade adimensional do fluxo de areia BC.

Na zona de fluido pesado, a areia BC também apresenta maior velocidade adimensional do que a areia A. Devido ao maior atrito, a areia A causa maior retardamento na velocidade do fluxo da água do que a areia BC.

13) Na Figura 5.8.3.1, observa-se na zona de fluido pesado que o comprimento de mistura para a concentração aproximada de 5%, para todas as misturas permanece praticamente constante e de mesmo valor para todas as misturas.

14) Na Figura 5.8.3.2, observa-se na zona de fluido pesado que o comprimento de mistura para a concentração aproximada de 10%, para todas as misturas permanece praticamente constante e de mesmo valor para todas as misturas até o valor aproximado de $u^+ = 15$.

15) Na Figura 5.8.3.3 apresenta-se o perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ para a condição de velocidade crítica de sedimentação de areias A e BC em água e em solução de 400 ppm de polímero. Neste gráfico observa-se que na condição crítica de sedimentação e nas zonas de fluido leve e de fluido pesado, a areia BC apresenta maior velocidade adimensional que a areia A. Este fato ocorre porque a areia A retarda a velocidade do fluido mais que a areia A e também porque a perda de carga do fluxo de areia A é maior que a perda de carga do fluxo de areia BC.

16) Nas Figuras 5.8.3.4 e 5.8.3.5, apresenta-se o perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ na condição de velocidade crítica de sedimentação de areia BC em água e em concentrações aproximadas de 10% e 16% de areia respectivamente em solução de 200 ppm e 400 ppm de polímero. Nestes gráficos, observa-se que a adição de polímero diminui a vazão de transporte para uma mesma concentração de sólidos, além de diminuir o atrito e aumentar a velocidade adimensional do fluxo.

17) Na Figura 5.8.3.5 observa-se que a adição de polímero modifica a forma da função $u^+ = f(y^+)$ transformando-a de linear para logarítmica, aumentando a região de comprimento de mistura constante.

18) A Figura 5.8.3.6 ilustra o perfil adimensional de velocidades $u^+ = f(y^+)$ para vazão e concentração aproximadas no escoamento heterogêneo de areia BC em água e em solução de 400 ppm de polímero. Observa-se que a adição de polímero neste escoamento aumenta a velocidade adimensional tanto na zona de fluido leve como na zona de fluido pesado, de modo que na zona de fluido pesado a função $u^+ = f(y^+)$ segue à da água limpa.

19) De modo geral pode-se afirmar que os perfis adimensionais de velocidade $u^+ = f(y^+)$, para soluções de polímero com areia BC, nas concentrações ensaiadas de 5% a 15% de areia e de 100 a 1200 ppm de polímero, tem o seguinte comportamento:

- 1) Para pontos acima da máxima velocidade adimensional, o comprimento de mistura permanece constante e igual a 0,4.,
- 2) Para uma mesma concentração de sólidos, a subcamada elástica é maior em maior concentração de polímero,
- 3) Em 100 ppm, e posições abaixo da velocidade u^+ máxima, o comprimento de mistura é constante e menor que 0,4 para concentrações de até 6,1% de areia, enquanto para 400 ppm, ocorre para até cerca de 9,2%,
- 4) Para posições abaixo da velocidade u^+ máxima, o comportamento semelhante ao de uma subcamada viscosa ocorre para 100 ppm, em concentração aproximadamente superior a 10,6% e para 400 ppm em concentrações aproximadamente superiores a 15,7%.

Distribuição vertical de concentração de areia BC

1) Na Figura 5.9.4 para vazões na condição de velocidade crítica de sedimentação, e diferentes concentrações médias, observa-se o desenvolvimento da função concentração pontual. Os perfis mantêm-se semelhantes, aumentando a concentração no fundo da tubulação ao se elevar a concentração média de transporte.

2) Para todas as distribuições de concentração obtidas experimentalmente, observou-se a não concordância com a equação teórica de Rouse, equações 3.9 e 3.9a.

3) Nas Figuras 5.9.6, 5.9.7 e 5.9.8 podem ser observados os efeitos da correção nos valores da velocidade de sedimentação w sobre a equação de Rouse. Nestas Figuras também se apresenta a equação de Rouse para valor constante da velocidade de sedimentação w_0 em água limpa e em repouso. Nota-se perfeita concordância entre pontos

experimentais e a equação de Rouse com valores corrigidos de w na zona de fluido pesado em velocidade crítica e no escoamento heterogêneo. No escoamento com leito de sedimentos tal concordância não se apresenta. Estas conclusões foram verificadas em todos os testes realizados experimentalmente e podem ser verificadas nas Figuras A4.1, A4.2, A4.3 e A4.4 do APÊNDICE 4. O que sugere que esta concordância ocorre mesmo para concentrações baixas de 2,5% de areia BC e velocidades baixas do escoamento heterogêneo como na velocidade crítica de sedimentação.

4) Na zona de fluido leve, observa-se na Figura 5.9.6, praticamente não houve alteração entre as equações de Rouse com e sem correção em w . Nesta zona portanto, como já observado nos perfis adimensionais de velocidade, a constante de Von Karman permanece igual a $\kappa = 0,4$, e o valor de w permanece quase inalterado devido às pequenas concentrações nesta zona de fluido leve. Assim, assumindo a validade da equação de Rouse, nesta zona de fluido leve, conclui-se que o coeficiente β deve assumir valores entre 0,57 e 0,85, correspondendo respectivamente ao ponto superior da tubulação até um ponto próximo à máxima velocidade do fluxo.

5) Admitindo-se a validade da equação de Rouse, conclui-se que o valor do β , em toda a seção do tubo, da parte superior para a inferior, varia de 0,57 a 0,85, até um certo ponto próximo à velocidade máxima e depois varia de 1,5 a 8,1. Estes valores foram determinados para a Figura 5.9.6, ou seja, para o ponto de velocidade crítica de sedimentação, $Q = 571,5$ l/min e $C_v = 9,6\%$ de areia BC em água.

6) Na Figura 5.9.9 são representados estes valores de β em função de y/D . Um ajuste por potência foi realizado aos pontos, encontrando-se : $\beta = 0,5113(y/D)^{-0,919}$, com $R^2 = 0,9723$.

7) A observação de que na zona de fluido pesado, a equação de Rouse determinada com a correção sobre w , ajusta-se perfeitamente aos dados experimentais, indica uma preponderância da velocidade de sedimentação (ou seja dos efeitos de arraste e da gravidade), corrigida pelos efeitos da concentração, sobre a turbulência, na zona de fluido pesado.

8) Na tabela 5.9.1, apresenta-se valores de β para escoamento de água e areia BC, ou seja, a faixa de variação de β obtida nas três Figuras 5.9.6, 5.9.7 e 5.9.8. Esta faixa de variação de β refere-se à valores desde a parte superior para a base inferior do tubo. Observa-se que na região de fluido leve e próximo à parede superior do tubo, β assume sempre valor próximo a 0,6.

9) Observa-se na Figura 5.9.12, nenhuma concordância da equação de Rouse sobre os valores experimentais de fluxo de areia BC em soluções poliméricas. Este fato ocorre porque o valor de w na equação de Rouse exerce importante função, assim devido aos altos valores de viscosidade das soluções poliméricas, os valores de w se tornam muito pequenos o que provoca o grande desvio entre os valores experimentais e os teóricos, e devido à turbulência do escoamento, ocorre provavelmente a alteração nos valores da viscosidade e a ação da subcamada elástica sobre a distribuição de concentração.

10) Nas Figuras 5.9.15, 5.9.16 e 5.9.17, pode-se avaliar o desempenho da concentração do polímero e da turbulência sobre as distribuições de concentração. Na Figura 5.9.15 quase não há diferença entre as distribuições de concentração, em vazão aproximada de 770 l/min e em 100 ppm de polímero, porém na Figura 5.9.17, para concentração aproximadamente igual, e em vazão aproximada de 820 l/min, e 400 ppm, observa-se que a maior velocidade da solução polimérica causa uma distribuição de concentração mais uniforme.

11) Nas Figuras 5.9.16 e 5.9.17, observa-se que a adição de 400 ppm de polímero aumenta a concentração de areia na parte superior do tubo e diminui a concentração de areia na parte inferior do tubo, tornando o perfil de concentração mais uniforme. Na Figura 5.9.16, observa-se que a adição de polímero em 400 ppm, causou uma diminuição de cerca de 50% na concentração da base inferior do tubo.

12) Na Figura 5.9.18, apresentam-se os valores de β de suspensões de 400 ppm de polímero. Os valores de β variaram de 0,12 a 0,24, do topo à base do tubo para $Q = 504,9$ l/min, $C_v = 4,3\%$ de areia BC. E variaram de 0,34 a 0,34, passando por um mínimo de 0,26 para $Q = 827,1$ l/min, $C_v = 9,2\%$ de areia BC. Observa-se que são muito reduzidos os

valores de β para suspensões de polímero em relação aos valores da água. E observa-se que diferentemente do que ocorre em água, cujos valores de β aumentam gradativamente desde o topo à base do tubo, em presença de polímero os valores de β inicialmente passam por uma diminuição, por um mínimo e depois aumentam. Os valores de β para suspensões de areia e polímero, em função de y/D , melhor se ajustaram à função polinomial de segunda ordem. A Figura 5.9.18 ilustra os polinômios ajustados aos valores de β em função de y/D .

13) Como os valores de β , em presença de polímero são sempre menores que a unidade pode-se concluir que o coeficiente de transferência de momento é sempre superior ao coeficiente de difusão de sólidos para as concentrações de 100, 200 e 400 ppm e para a areia BC.

14) A Figura 5.9.19 ilustra os valores de β para a condição de velocidade crítica, $C_v = 4,3\%$ de areia BC, sem e com 400 ppm de polímero. Em presença de polímero, $Q = 504,9$ l/min o coeficiente de transferência de momento é maior do que o coeficiente de difusão de sólidos em toda a vertical da seção do tubo. Porém, sem areia, o comportamento de β , variando de 0,58 a 8,5 para $Q = 827,1$ l/min indica que do topo à base inferior do tubo o coeficiente de transferência de momento é maior, igual e menor do que o coeficiente de difusão de sólidos.

15) Na Figura 5.9.20 ilustra-se valores de β para vazão e concentração aproximadas de areia BC, em escoamento heterogêneo, sem e com 400 ppm de polímero. Observam-se idênticas conclusões sobre os valores de β da condição crítica de sedimentação e no escoamento heterogêneo apresentado. Em presença de polímero, $Q = 827,1$ l/min e $C_v = 9,2\%$, o coeficiente de transferência de momento é maior do que o coeficiente de difusão de sólidos em toda a vertical da seção do tubo. Os valores de β para escoamento sem polímero, $Q = 816,9$ l/min e $C_v = 8,7\%$ variaram de 0,61 a 7,6 desde o topo à base do tubo. Conclui-se que do topo à base inferior do tubo o coeficiente de transferência de momento é maior, igual e menor do que o coeficiente de difusão de sólidos. Isto corresponde aproximadamente à afirmação de que na zona de fluido leve, para o escoamento de areia BC, o coeficiente de transferência de momento é maior que o de difusão de sólidos. E na

zona de fluido pesado, para a areia BC, o coeficiente de transferência de momento é menor que o de difusão de sólidos.

16) Embora os valores de β não variem linearmente para soluções de polímero, como se pode verificar na Figura 5.9.18, porém, podem ser considerados praticamente constantes nas Figuras 5.9.19 e 5.9.20, devido aos grandes valores de β de mistura água e areia em comparação com os pequenos valores de β para solução de polímero com areia. Para melhor compreensão desta afirmação, verifica-se nas Figuras 5.9.19 e 5.9.20, que os valores de β para solução de polímero (400 ppm) com areia, apresentam-se praticamente constantes. Observação semelhante ocorre também para as outras concentrações de polímero (100 e 200 ppm) com areia BC.

17) Aplicando-se um valor de β constante e igual a 0,175 à solução de 400 ppm de polímero com areia BC, observou-se concordância entre os pontos experimentais e os da equação de Rouse. Além da aplicação deste valor de β , também aplicou-se correção na velocidade de sedimentação de acordo com a equação 5.9.1. Para concentração média de 4,4% e 9,2% de areia BC em 400 ppm de polímero, as Figuras 5.9.21a e 5.9.22 apresentam a concordância entre os pontos experimentais e os calculados da equação de Rouse.

18) Comparando as Figuras 5.9.21a e 5.9.21b, onde os valores de β são respectivamente 0,175 e 0,2, conclui-se que para altas vazões (em torno de 830 l/ min), menores concentrações de areia assumem maior valor de β , uma vez que há maior concordância entre valores teóricos e experimentais para o valor de $\beta = 0,2$ da Figura 5.9.21b.

19) Aplicando-se um valor de β constante e igual a 0,2 à solução de 100 ppm de polímero com areia BC, observou-se concordância entre os pontos experimentais e os da equação de Rouse. Além da aplicação deste valor de β , também aplicou-se correção na velocidade de sedimentação de acordo com a equação 5.9.1. Para concentração média de 10,6% e 6,1% de areia BC em 100 ppm de polímero, as Figuras 5.9.23 e 5.9.24 apresentam a concordância entre os pontos experimentais e os calculados da equação de Rouse.

20) Conclui-se que o valor de β (relação entre os coeficientes de difusão de sólidos e de transferência de momento) para soluções de polímero e areia BC é praticamente constante ($\beta = 0,175$ para 100 ppm e $\beta = 0,2$ para 400 ppm) e muito menor que os valores sem polímero.

Lei da diferença de velocidades ou “Defect Law”

1) Os valores de $(u_{\max} - u)/u^*$ em função de $1-(y/R)$, dos ensaios **Água 1**, **Água2** e **Água 3** apresentaram-se em concordância com os dados obtidos com o tubo de Pitot.

2) Observou-se a possibilidade de provável existência de função única a descrever a relação entre $(u_{\max} - u)/u^*$ e y/D para escoamento de misturas sólido-líquido.

7 – RECOMENDAÇÕES OU SUGESTÕES

Apresenta-se algumas sugestões ou recomendações à continuidade da pesquisa:

Pesquisa experimental relativa a fluxo de misturas sólido-líquido tipo água e areia com outras granulometrias, e com sólidos de outras densidades.

O tubo de Pitot, apresentou-se como um excelente medidor de velocidades, porém para condições mais sofisticadas e modernas, pode-se sugerir a utilização de anemômetro Laser- Doppler que realiza medições muito mais próximas à parede do tubo.

O tubo de Pitot, apresentou-se como um excelente medidor de concentrações, porém para condições mais sofisticadas e modernas, pode-se sugerir a utilização de medidor de concentração por raio γ que realiza medições muito mais próximas à parede do tubo.

Desenvolvimento teórico, a partir das medidas experimentais obtidas, de perfil de velocidade e de concentração de misturas sólido-líquido.

Utilização de outros tipos de polímero.

Estudo do comprimento retilíneo da tubulação, a montante e jusante, de tomadas de pressão, necessário para estabilização do regime de escoamento de soluções poliméricas no transporte de sólidos.

Estudo da potência necessária para se manter misturas homogêneas no reservatório de bombeamento.

Estudo da influencia do diâmetro da tubulação no escoamento de soluções poliméricas aplicadas ao transporte de sólidos.

Estudar a influência da rugosidade da tubulação no escoamento de soluções poliméricas aplicadas ao transporte de sólidos.

Estudar as perdas singulares devido ao escoamento de soluções poliméricas com concentrações de sólidos.

ANEXO 1
Programa Fortran para Cálculo de Velocidade Crítica de Sedimentação

```

REAL AI,D,V,Q,G,AL,AJ,F,DS,CD,CV,DI,VM,RD,MU,P
OPEN (UNIT=1,FILE='C:\USUARIOS\VECRBC.FOR',ACCESS='SEQUENTIAL')

C   PROGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADE CRITICA DE SEDIMENTAÇÃO
C   SEGUNDO EQUAÇÕES DE OROSKAR E TURIAN.
C
C   PROGRAMA ORIGINAL RETIRADO DE SOLIMAN, R.H. AND COLLIER, P.B.,
C   "PRESSURE DROP IN SLURRY LINES",HYDROCARBON PROCESSING, V69, N.11,
C   NOV. 1990, P60-63.
C
C   OBSERVAR UM VALOR DE RUGOSIDADE DO TUBO.O VALOR PARA TUBO PVC FOI
C   IGUAL A 0,0002497 in, OU SEJA, 6,343.E-6 m.
C
C   SE NAO HOUVER SOLIDO, F=0, O FLUXO E COMPOSTO SO DE LIQUIDO, EN
C   TAO COLOCAR A DENSIDADE DO LIQUIDO EM D NA ENTRADA DOS DADOS, OU
C   SEJA SO ENTRAR COM OS VALORES DE AI, D, V, Q, COLOCANDO ZEROS EM
C   G,AL,AJ,F,DS.
C
C   SE O FLUXO FOR DO TIPO SOLIDO-LIQUIDO, COLOCAR NA ENTRADA DOS DA-
C   DOS Q=0 E D=0.
C
CCC-----OBSERVAR QUE A TRANSFORMACAO DE UNIDADES DE PSI/100FT PARA m/m
CCC----- OCORREU PARA DENSIDADE DA AGUA IGUAL A 1000 kg/m3, SE NECESSA
CCC-----RIO EFETUAR CORRECAO.
C
C   OS DADOS DE ENTRADA E DE SAIDA ENCONTRAM-SE EM SISTEMA SI.
C
C-----
C   DADOS DE ENTRADA AO PROGRAMA, NO SISTEMA SI:
C
C   AI = DIAMETRO INTERNO DO TUBO (m)
C   D = DENSIDADE MEDIA DO FLUIDO (kg/m3)
C   V = VISCOSIDADE DO LIQUIDO (N.s/m2)
C   Q = VAZAO TOTAL (SOLIDO + LIQUIDO) (kg/h)
C   G = VAZAO SOLIDA (kg/h)
C   AL = VAZAO LIQUIDA (kg/h)
C   AJ = DENSIDADE DO SOLIDO (kg/m3)
C   F = DENSIDADE DO LIQUIDO (kg/m3)
C   DS = DIAMETRO MEDIO DA PARTICULA (m)
C-----
C   O PROGRAMA PROCESSA NO SISTEMA INGLES:
C
C   AI = DIAMETRO INTERNO DO TUBO (in)
C   D = DENSIDADE MEDIA DO FLUIDO (lb/ft3)
C   V = VISCOSIDADE DO LIQUIDO (cP)
C   Q = VAZAO (lb/h)
C   G = VAZAO SOLIDA (lb/h)
C   AL = VAZAO LIQUIDA (lb/h)
C   AJ = DENSIDADE DO SOLIDO (lb/ft3)
C   F = DENSIDADE DO LIQUIDO (lb/ft3)
C   DS = DIAMETRO MEDIO DA PARTICULA (in)
C-----
C   TABELA DE TRANSFORMACAO DE UNIDADES DO SI PARA O SISTEMA INGLES:
C
C   1 m      = 39.370 079 in
C   1 kg/m3   = 0.062 428 3 lb/ft3
C   1 cP      = 0.01 P = 0.01 (g/cm.s) = 0.001 (N.s/m2)
C   1 N.s/m2  = 1000 cP
C   1 kg/h    = 2.204 622 6 lb/h
C   1 stokes  = 0.000 1 m2/s
C   1 ft      = 0.304 801 m
C   1 m       = 3.280 839 9 ft
C   1 PSI/100FT= 0.0230822 m/m
C-----
C   DADOS DE ENTRADA AO PROGRAMA (NO SISTEMA SI):
C
C   DATA AI/0.0781/
C   DATA D/0/
C   DATA V/0.001/
C   DATA Q/0/
C   DATA G/11448/
C   DATA AL/82080/
C   DATA AJ/2652/
C   DATA F/1000/
C   DATA DS/0.0002019/
C-----
C   IMPRESSAO DOS DADOS DE ENTRADA NO SISTEMA SI:
C   WRITE(1,3333)
C   3333 FORMAT(1X,/, 'IMPRESSÃO DOS RESULTADOS:',//)

```

```

WRITE(1,3335)
3335 FORMAT(1X,/, 'DADOS DE ENTRADA NO SISTEMA SI',/)
WRITE(1,1)AI
1 FORMAT(1X,/, 'AI, DIÂMETRO INTERNO TUBO (m)=' ,F20.10,/)
WRITE(1,2)V
2 FORMAT(1X,/, 'V, VISCOSIDADE (N.s/m2) =' ,F20.10,/)
WRITE(1,3)G
3 FORMAT(1X,/, 'G, VAZÃO SÓLIDA (kg/h) =' ,F20.10,/)
WRITE(1,4)AL
4 FORMAT(1X,/, 'AL, VAZÃO LÍQUIDA (kg/h) =' ,F20.10,/)
WRITE(1,5)AJ
5 FORMAT(1X,/, 'AJ, DENSIDADE DO SÓLIDO (kg/m3) =' ,F20.10,/)
WRITE(1,6)F
6 FORMAT(1X,/, 'F, DENSIDADE DO LÍQUIDO (kg/m3) =' ,F20.10,/)
WRITE(1,7)DS
7 FORMAT(1X,/, 'DS, DIÂMETRO DA PARTÍCULA (m) =' ,F20.10,/)

```

C TRANSFORMACAO DE UNIDADES DE SISTEMA SI PARA INGLES:

```

AI = AI*39.370079
D = D*0.0624283
V = V* 1000
Q = Q*2.2046226
G = G*2.2046226
AL = AL*2.2046226
AJ = AJ*0.0624283
F = F*0.0624283
DS = DS*39.370079

```

C IMPRESSAO DOS DADOS DE ENTRADA NO SISTEMA INGLES:

```

WRITE(1,3334)
3334 FORMAT(1X,/, 'DADOS DE ENTRADA NO SISTEMA INGLES',/)
WRITE(1,11)AI
11 FORMAT(1X,/, 'AI, DIÂMETRO INTERNO TUBO (IN)=' ,F20.8,/)
WRITE(1,12)V
12 FORMAT(1X,/, 'V, VISCOSIDADE (cP) =' ,F20.8,/)
WRITE(1,13)G
13 FORMAT(1X,/, 'G, VAZÃO SÓLIDA (LB/HR) =' ,F20.8,/)
WRITE(1,14)AL
14 FORMAT(1X,/, 'AL, VAZÃO LÍQUIDA (LB/HR) =' ,F20.8,/)
WRITE(1,15)AJ
15 FORMAT(1X,/, 'AJ, DENSIDADE DO SÓLIDO (LB/CFT) =' ,F20.8,/)
WRITE(1,16)F
16 FORMAT(1X,/, 'F, DENSIDADE DO LÍQUIDO (LB/CFT) =' ,F20.8,/)
WRITE(1,17)DS
17 FORMAT(1X,/, 'DS, DIÂMETRO DA PARTÍCULA (IN) =' ,F20.8,/)

```

C INÍCIO DO PROGRAMA

```

E=((AI/24)**2)*3.14
MU=V
IF (Q.EQ.0) THEN
    WRITE(1,18)
18 FORMAT(1X,/, 'SLURRY TURIAN CORRELATION',/)
    IF (Q.EQ.0) THEN
        CALL TSLUR(AI,D,V,Q,G,AL,AJ,F,DS,CD,CV,DI,VM,RD)
    IF (Q.EQ.0) THEN
        CALL TSDLTP(AI,D,V,Q,AL,F,CD,CV,DI,VM,RD,E,U,W,P)
    IF (F.EQ.0) THEN
        GO TO 9230
    ELSE
        GO TO 9231
    ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDIF
9230 CALL SING(AI,U,Q,D,E,V,P)
WRITE(1,19)U
19 FORMAT(1X,/, 'MEAN VELOC.OF FLUID (FPS) =' ,F20.8,/)
UX=U*0.304801
WRITE(1,191)UX
191 FORMAT(1X,/, 'VELOC.MEDIA LIQUIDO (m/S) =' ,F20.8,/)
WRITE(1,20)P
20 FORMAT(1X,/, 'BPRES.DROP (PSI/100FT)=' ,F20.8,/)
PX=P*0.0230822
WRITE(1,201)PX
201 FORMAT(1X,/, 'BPERDA DE CARGA (m/m)=' ,F20.8,/)
9231 STOP
END

```

C FIM DO PROGRAMA


```

SUBROUTINE SING(AI,U,Q,D,E,V,P)
REAL AI,U,Q,D,E,V,P
U=Q/(3600*D*E)
R=123.9*AI*U*D/V
A=((LOG(1/((7/R)**0.9)+(0.0000674/AI))))*2.457)**1.6
B=(37530/R)**1.6
W=8*((8/R)**1.2)+(1/((A+B)**1.5))**0.83
P=0.129*W*D*(U**2)/AI
RETURN
END

SUBROUTINE TSDLTE(AI,D,V,Q,AL,F,CD,CV,DI,VM,RD,E,U,W,P)
REAL AI,D,V,Q,F,CD,CV,DI,VM,RD,E,U,W,P,ZZ,Z,ZA
INTEGER K
SLDN=D
Q=AL
D=F
U=Q/(3600*D*E)
R=123.9*AI*U*D/V
A=((LOG(1/((7/R)**0.9)+(0.0000674/AI))))*2.457)**1.6
WRITE (1,497)A
497 FORMAT(1X,/, ' A= ',G20.6,/)
B=(37530/R)**1.6
WRITE (1,498)B
498 FORMAT(1X,/, ' B= ',G20.6,/)
ZZ=(A+B)**1.5
Z=1/ZZ
ZA=(8./R)**1.2
W=8.*(ZA+Z)**0.083
WRITE (1,499)W
499 FORMAT(1X,/, ' W= ',G20.6,/)
P=0.129*W*D*(U**2)/AI
WRITE (1,500)P
500 FORMAT(1X,/, ' P= ',G20.6,/)
FW=W/4
TT=0.1*VM**2/(DI*(RD-1))
T=DI*(RD-1)
WRITE (1,501)TT,T
501 FORMAT(1X,/, ' TT= ',F20.10,/, ' T =',F20.10,/)
R01=0.03*TT*(CD**0.062)/((100*CV)**1.083*FW**1.064)
R12=0.41*TT*(FW**0.233*CD**0.384)/((100*CV)**0.226)
R23=3.5*TT*(FW**0.67*CD**0.938)/((100*CV)**1.075)
WRITE (1,20)R01,R12,R23
20 FORMAT(1X,/, 'R01 =',F20.8,/, 'R12 =',F20.8,/, 'R23 =',F20.8,/)
IF (R01.LE.1) THEN
    K=1
ELSE
    IF (R12.LE.1) THEN
        K=2
    ELSE
        IF (R23.LE.1) THEN
            K=3
        ELSE
            K=4
        ENDIF
    ENDIF
ENDIF
ENDIF
IF (K.EQ.4) THEN
    GO TO 5800
ELSE
    IF (K.EQ.1) THEN
        GO TO 5811
    ELSE
        IF (K.EQ.2) THEN
            GO TO 5815
        ELSE
            GO TO 5820
        ENDIF
    ENDIF
ENDIF
WRITE(1,21)
21 FORMAT(1X,/, 'HETEROGENEOUS FLOW REGIME', /)
FF=FW+.5513*(100*CV)**0.869*FW**1.2*((T*9.8)/VM**2)**0.694/CD**0.1
$68
GO TO 5820
5800 WRITE(1,22)
22 FORMAT(1X,/, 'HOMOGENEOUS FLOW REGIME', /)
FF=FW+1.891*(100*CV)**0.502*FW**1.43*(T/VM**2)**0.353*CD**0.152
GO TO 5820
5811 WRITE(1,23)
23 FORMAT(1X,/, 'STATIONARY BED FLOW REGIME', /)
FF=FW+0.404*(100*CV)**0.739*FW**0.77*((T*9.8)/VM**2)**1.096/(CD**0.405)

```

```

      GO TO 5820
5815 WRITE(1,24)
      24 FORMAT(1X,/, 'SALTATION BED REGIME',/)
      FF=FW+0.986*(100*CV)**1.018*FW**1.046*((T*9.8)/VM**2)**1.354/(CD**
      S0.42)
5820 P=0.142*FF*F*VM**2/DI
      WRITE(1,25)P
      25 FORMAT(1X,/, 'PRESSURE DROP OF SLURRY (PSI/100FT), P = ',F20.9,/)
      PC=P*0.0230822
      WRITE(1,251)PC
      251 FORMAT(1X,/, 'PERDA DE CARGA DA MISTURA (m/m), PC = ',F20.9,/)
      WRITE(1,26)SLDN
      26 FORMAT(1X,/, 'SLURRY DENSITY (LB/CFT), SLDN = ',F20.9,/)
      SLDNA=SLDN/0.0624283
      WRITE(1,261)SLDNA
      261 FORMAT(1X,/, 'DENSIDADE DA MISTURA (kg/m3), SLDNA = ',F20.9,/)
      WRITE(1,27)FF,FW
      27 FORMAT(1X,/, 'SLURRY FRICTION FATOR, FF = ',F20.9,/, 'LIQUID FRICTI
      SON FATOR, FW = ',F20.9)
      WRITE(1,28)DI,T,TT,K
      28 FORMAT(1X,/, 'DI = ',F20.9,/, 'T = ',F20.9,/, 'TT = ',F20.9,/, 'K =
      S',I12,/)
      RETURN
      END

      SUBROUTINE TSLUR(AI,D,V,Q,G,AL,AJ,F,DS,CD,CV,DI,VM,RD)
      REAL AI,D,V,Q,G,AL,AJ,F,DS,CD,CV,DI,VM,RD,MU,NRE
      DI=AI/39.37
      RDL=F/62.4
      RDS=AJ/62.4
      RD=RDS/RDL
      MU=V/100
      DP=DS*2.54
      Q=G+AL
      D=((G+AL)/((AL/F)+(G/AJ)))
      CV=(G/AJ)/(Q/D)
      WRITE(1,221)RD,MU,DP,D,CV
      221 FORMAT (1X,/, 'RD = ',F20.10,/, 'MU = ',F20.10,/, 'DP = ',F20.10,/, 'D
      S = ',F20.10,/, 'CV = ',F20.10,/)
      AJU=DP**3*RDL*(RDS-RDL)/MU**2
      WRITE(1,222)AJU
      222 FORMAT (1X,/, 'AJU = ',F20.10,/)
      A=36.17*SQRT(AJU)
      WRITE(1,223)A
      223 FORMAT (1X,/, 'A = ',F20.10,/)
      X=LOG(A)/2.3
      B=1.94*X-1.38-0.086*X**2-0.025*X**3+0.0009*X**4+0.0005*X**5
      WRITE(1,224)B
      224 FORMAT (1X,/, 'B = ',F20.10,/)
      NRE=10**B
      CD=(A/NRE)**2
      WRITE(1,29)NRE
      29 FORMAT(1X,/, 'NRE (FALLING PARTICLES) = ',G20.11,/)
      WRITE(1,30)CD,CV
      30 FORMAT(1X,/, 'DRAG COEFF, CD = ',F20.9,/, 'SOLID VOLUME RATIO, CV =
      S',F15.9,/)
      WRITE(1,31)A,B
      31 FORMAT(1X,/, 'A ',F20.9,/, 'B = ',F20.9)
      MU=V/1000
      DP=DS/39.37
      Y=3.13*SQRT(DP*(RD-1))
      SNRE=DI*1000*RDL*Y/MU
      VC=Y*1.85*CV**0.15*(1-CV)**0.36*(DI/DP)**0.38*SNRE**0.
      S09
      VCR=3.281*VC
      E=0.00545*AI**2
      U=Q/(D*3600*E)
      WRITE(1,32)U,VCR,E
      32 FORMAT(1X,/, 'MEAN VELOC. U (FPS) = ',F20.9,/, 'CRITICAL VELOCITY (
      SFPS) = ',F20.9,/, 'E = ',F20.10)
      UA=U*0.304801
      VCRA=VCR*0.304801
      WRITE(1,321)UA,VCRA,E
      321 FORMAT(1X,/, 'MEAN VELOC. UA (m/s) = ',F20.9,/, 'CRITICAL VELOCITY (
      Sm/s) = ',F20.9,/, 'E = ',F20.10)
      VM=U/3.281
      WRITE(1,33)SNRE
      33 FORMAT(1X,/, 'MODIFIED REYNOLDS NUMBER SNRE = ',F20.8,/)
      Q=0
      RETURN
      END

```

IMPRESSÃO DOS RESULTADOS:

DADOS DE ENTRADA NO SISTEMA SI

AI, DIÂMETRO INTERNO TUBO (m)= .0781000000

V, VISCOSIDADE (N.s/m2) = .0010000000

G, VAZÃO SÓLIDA (kg/h) = 11448.0000000000

AL, VAZÃO LÍQUIDA (kg/h) = 82080.0000000000

AJ, DENSIDADE DO SÓLIDO (kg/m3) = 2652.0000000000

F, DENSIDADE DO LÍQUIDO (kg/m3) = 1000.0000000000

DS, DIÂMETRO DA PARTÍCULA (m) = .0002019000

DADOS DE ENTRADA NO SISTEMA INGLES

AI, DIÂMETRO INTERNO TUBO (IN)= 3.07480300

V, VISCOSIDADE (cP) = 1.00000000

G, VAZÃO SÓLIDA (LB/HR) = 25238.52000000

AL, VAZÃO LÍQUIDA (LB/HR) = 180955.40000000

AJ, DENSIDADE DO SÓLIDO (LB/CFT) = 165.55980000

F, DENSIDADE DO LÍQUIDO (LB/CFT) = 62.42830000

DS, DIÂMETRO DA PARTÍCULA (IN) = .00794882

SLURRY TURIAN CORRELATION

RD = 2.6520000000

MU = .0100000000

DP = .0201900000

D= 67.5811800000

CV = .0499641800

AJU = .1360858000

```

A =      13.3430400000

B =      .6629264000

NRE (FALLING PARTICLES) =      4.6017860000

DRAG COFF, CD =      8.407305000

SOLID VOLUME RATIO, CV =      .049964180

A      13.343040000
B =      .662926400
MEAN VELOC. U (FPS)=      16.448120000
CRITICAL VELOCITY (FPS) =      4.454856000
E =      .0515265700
MEAN VELOC. UA (m/s)=      5.013404000
CRITICAL VELOCITY (m/s) =      1.357845000
E =      .0515265700
MODIFIED REYNOLDS NUMBER SNRE =      4466.49400000

A=      .726707E+22
B=      .117436E-15
W=      .151828E-01
P=      9.70501

TT=      19.4786300000
T =      .1290215000

R01 =      43.953700000
R12 =      3.43153400
R23 =      2.12824200

HOMOGENEOUS FLOW REGIME

PRESSURE DROP OF SLURRY (PSI/100FT), P =      11.725730000

PERDA DE CARGA DA MISTURA (m/m), PC =      .270655600

SLURRY DENSITY (LB/CFT), SLDN =      67.581180000

DENSIDADE DA MISTURA (kg/m3), SLDNA =      1082.541000000

SLURRY FRICTION FATOR, FF =      .004110566
LIQUID FRICTION FACTOR, FW =      .003795691

DI =      .078100160
T =      .129021500
TT =      19.478630000
K =      4

```

ANEXO 2

Perfil Adimensional de Velocidade Para Água e Areias BC e A.

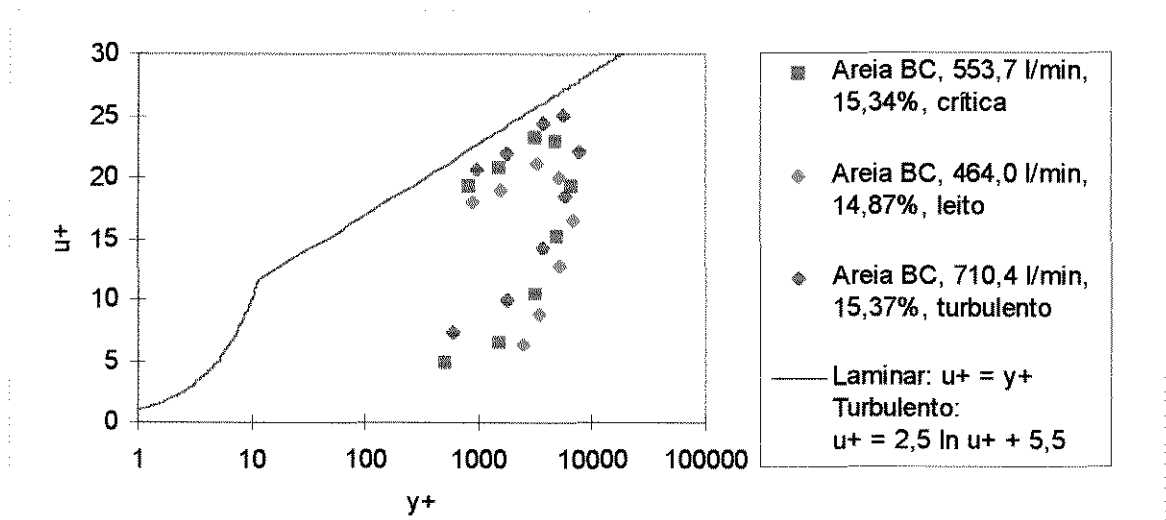


Figura A2.1 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.

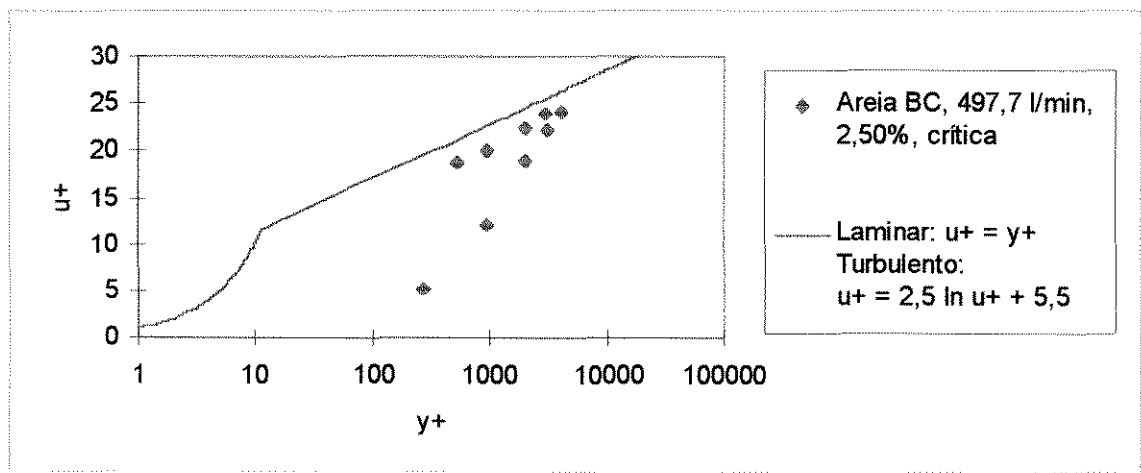


Figura A2.2 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.

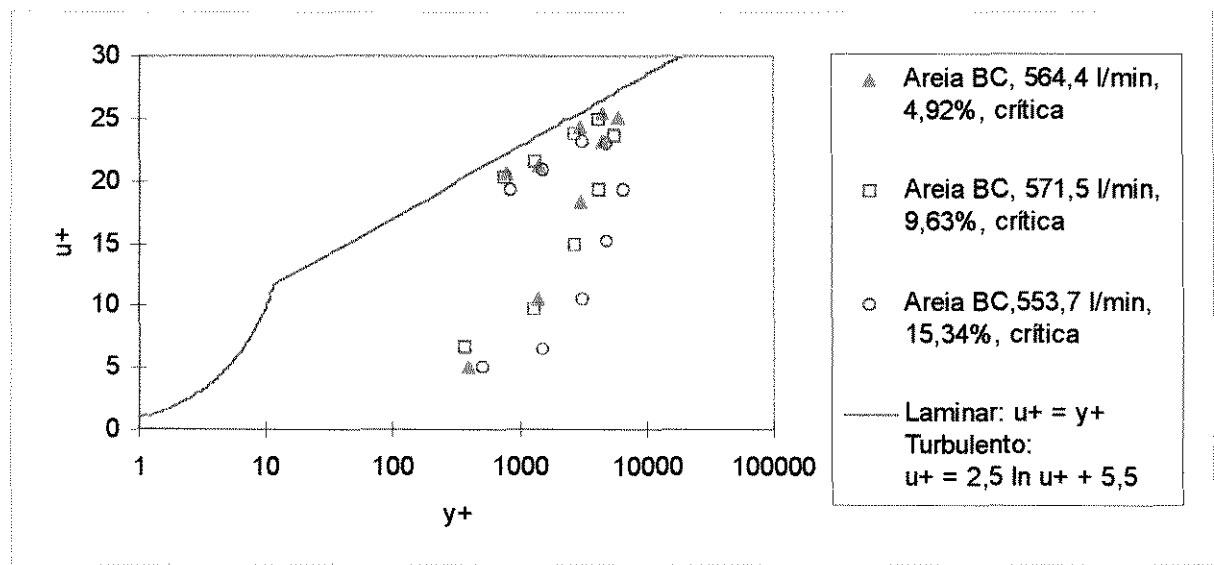


Figura A2.3 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.

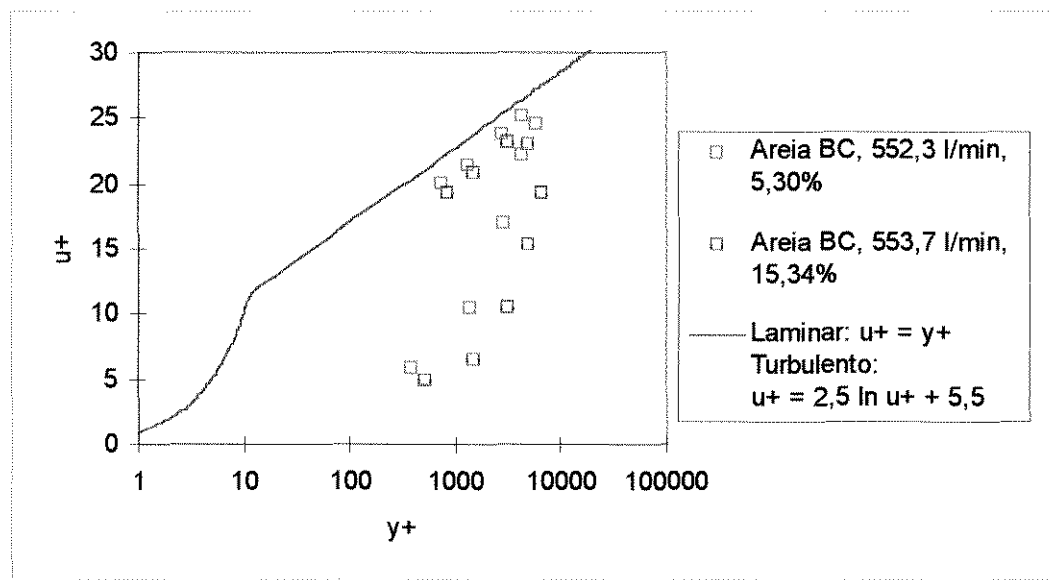


Figura A2.4 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.

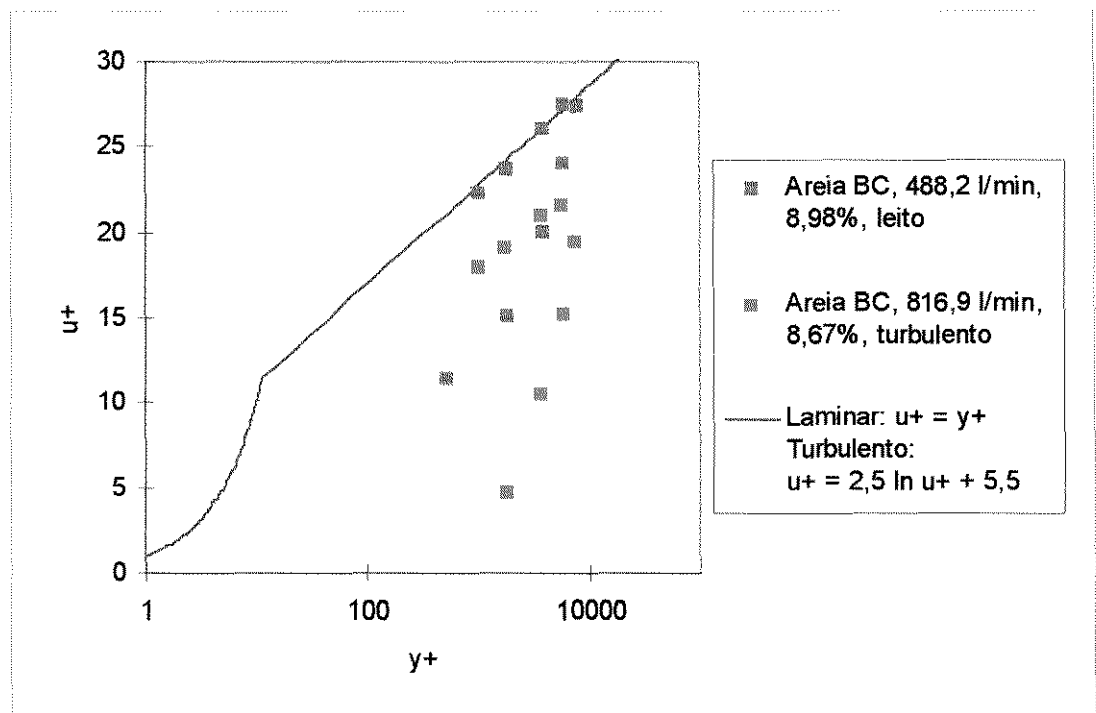


Figura A2.5 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.

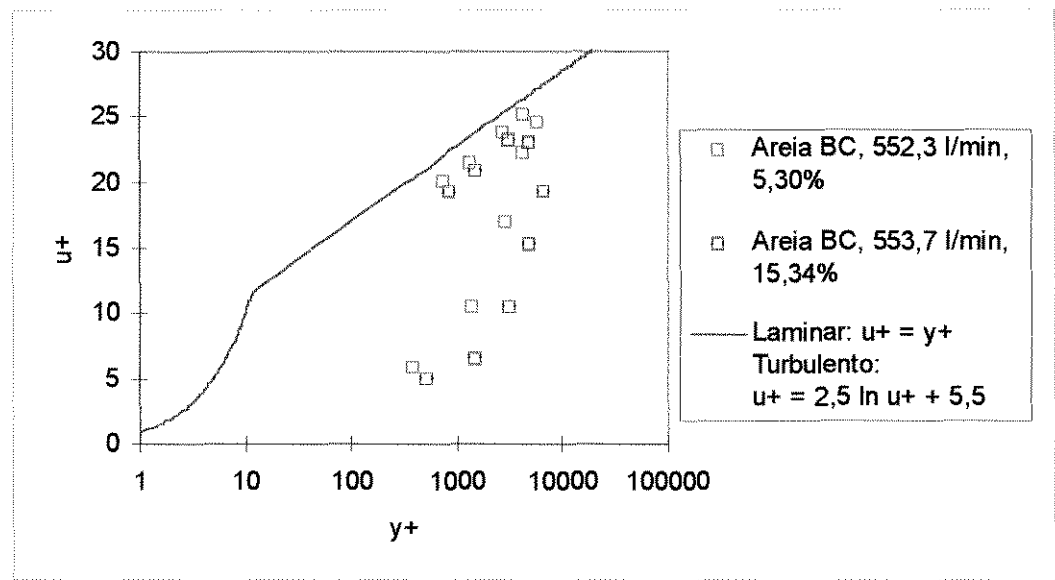


Figura A2.6 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.

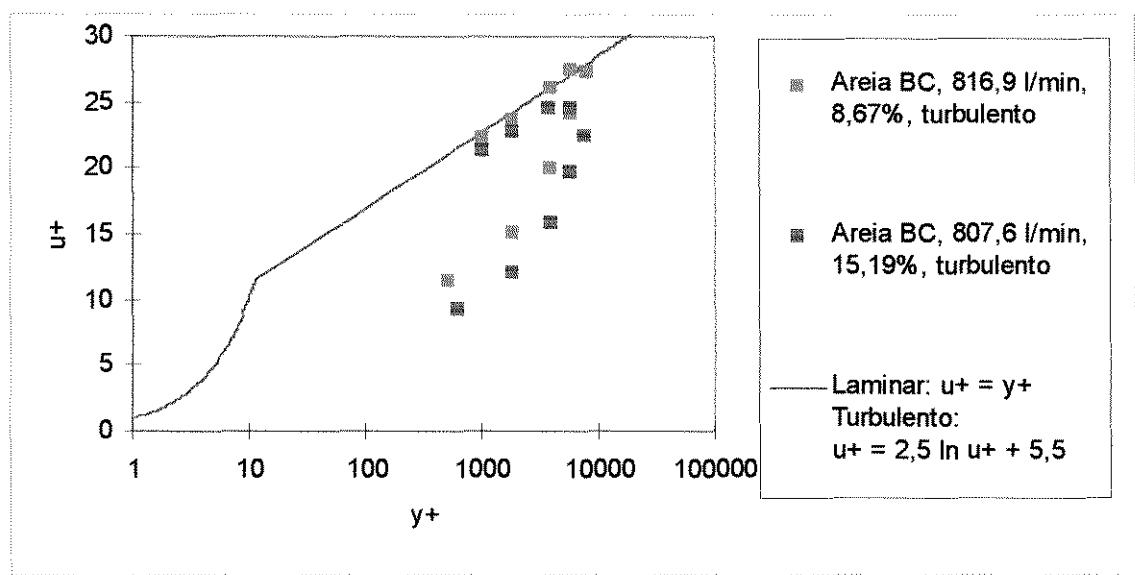


Figura A2.7 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.

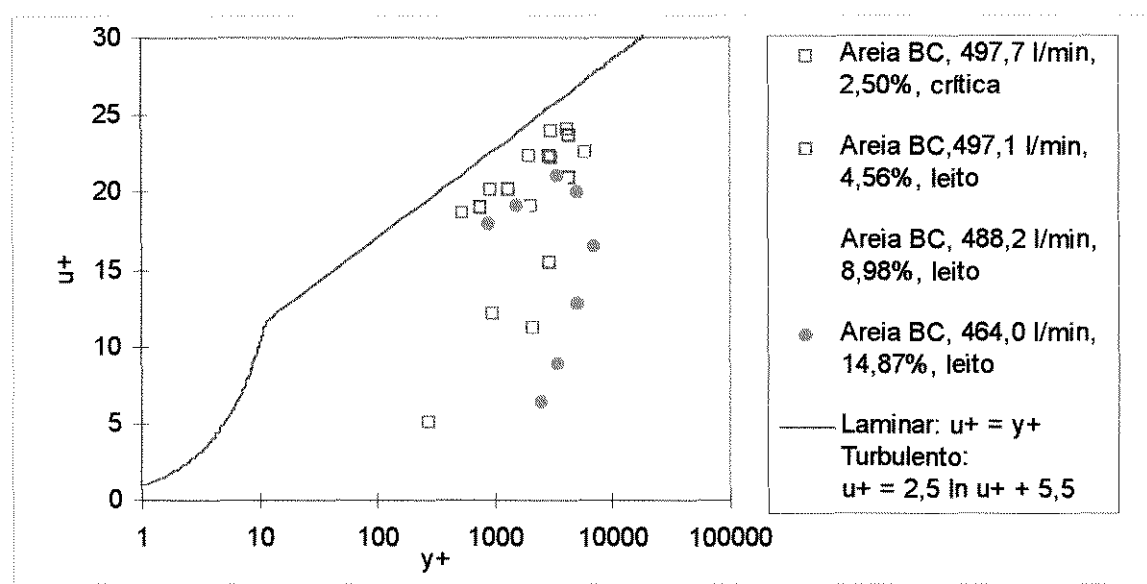


Figura A2.8 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.

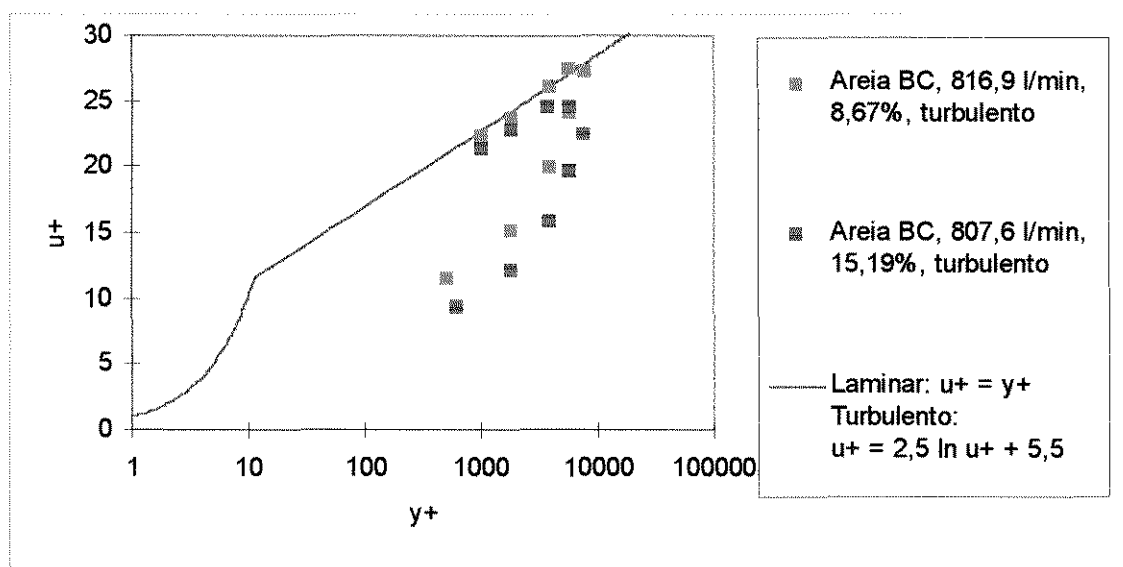


Figura A2.7 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.

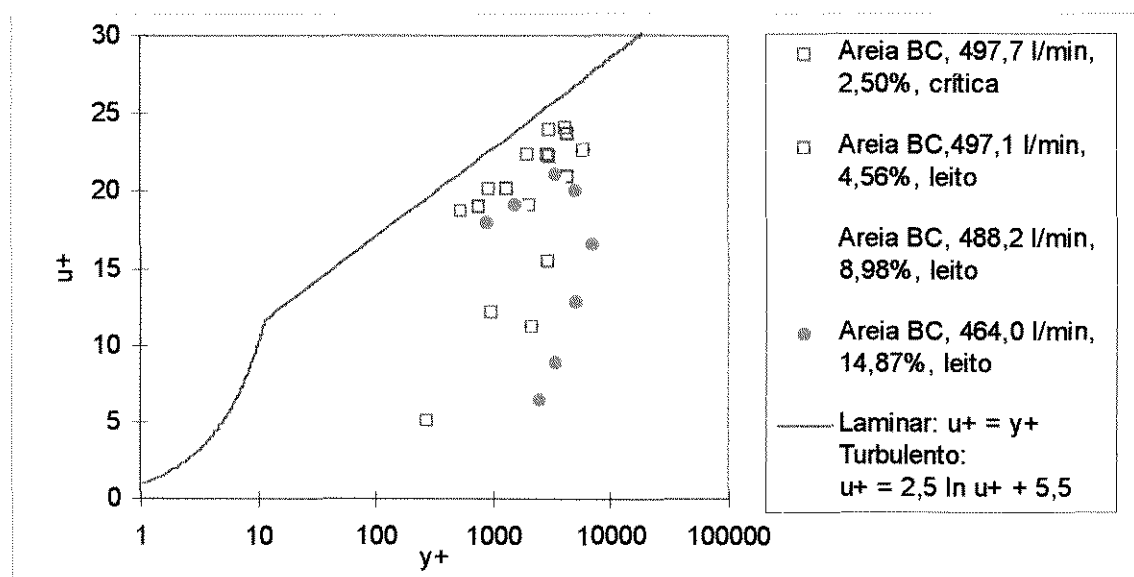


Figura A2.8 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.

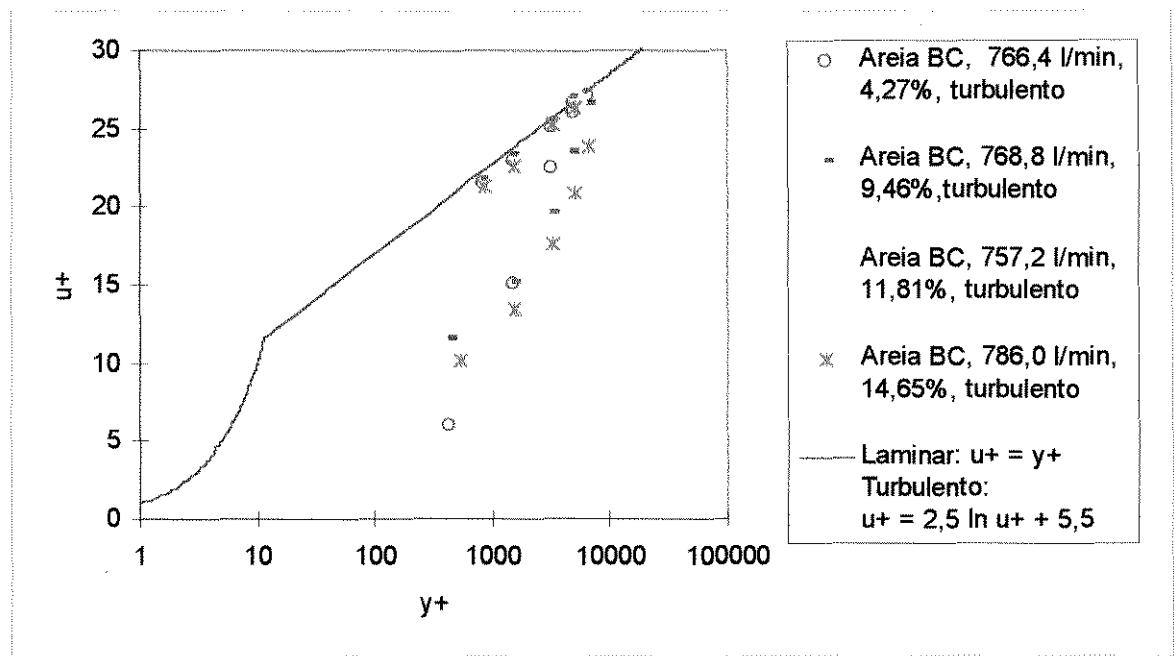


Figura A2.9 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia BC.

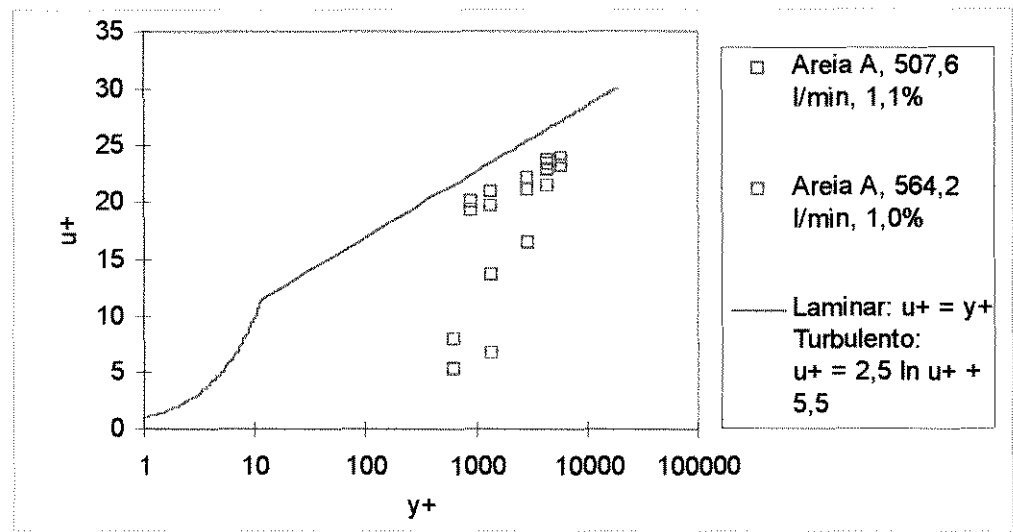


Figura A2.10 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia A.

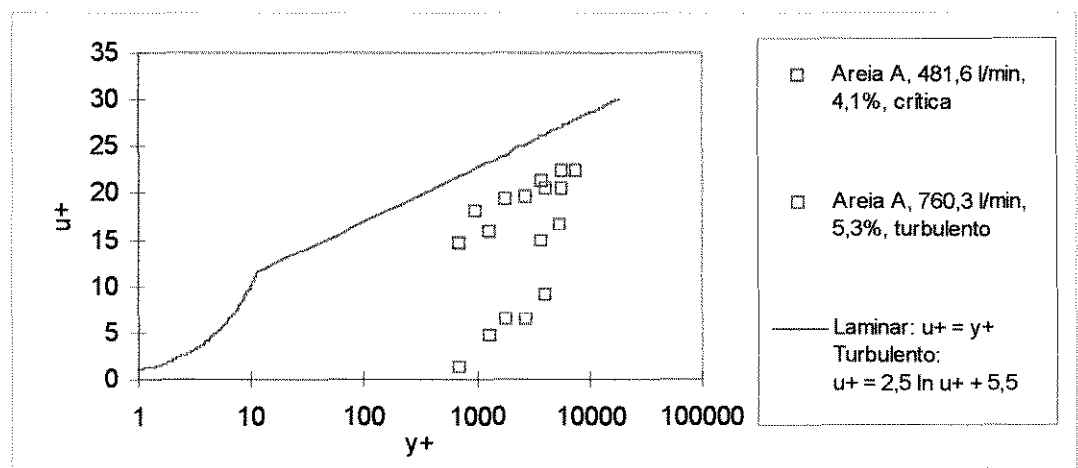


Figura A2.11 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia A.

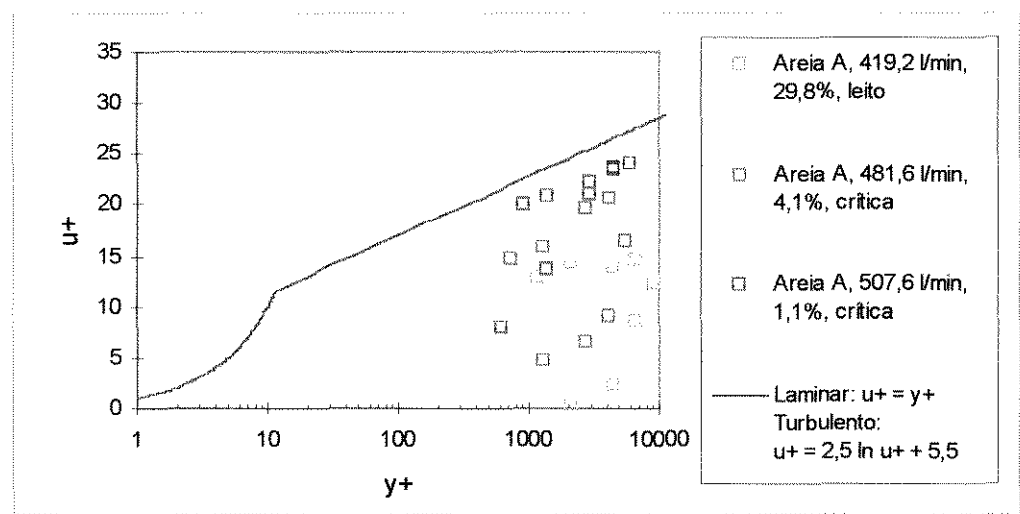


Figura A2.12 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia A.

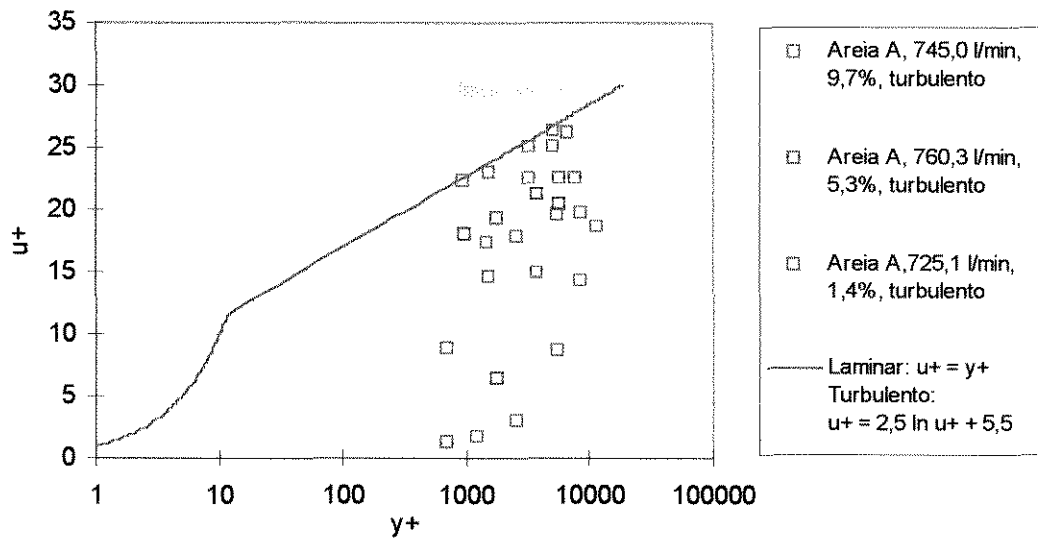


Figura A2.13 – Perfil adimensional – Modelo Newtoniano de duas camadas de fluxo de água e areia A.

ANEXO 3

Distribuição Vertical de Velocidade para Água e areia BC

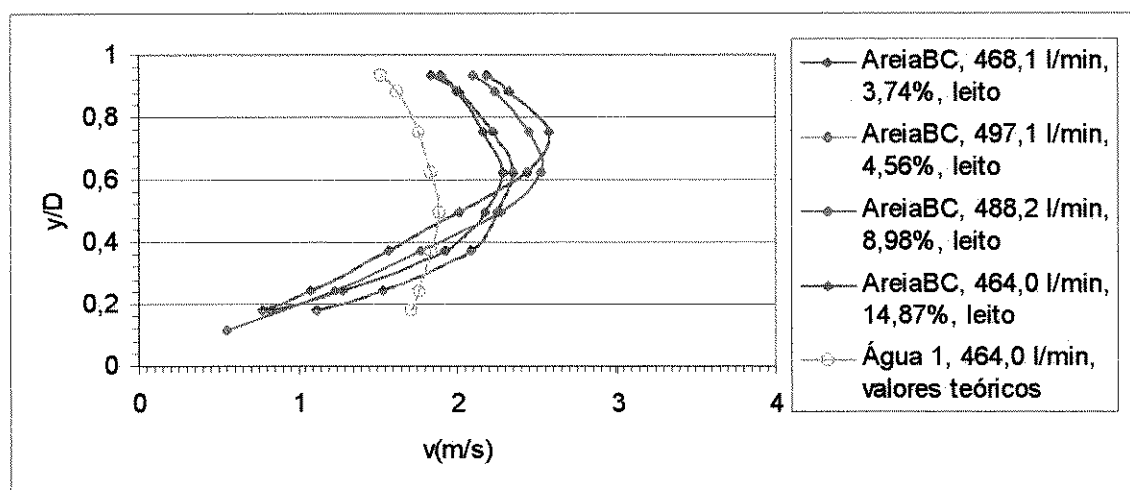


Figura A3.1 – Distribuição vertical de velocidades para água e areia BC, com leito de sedimentos.

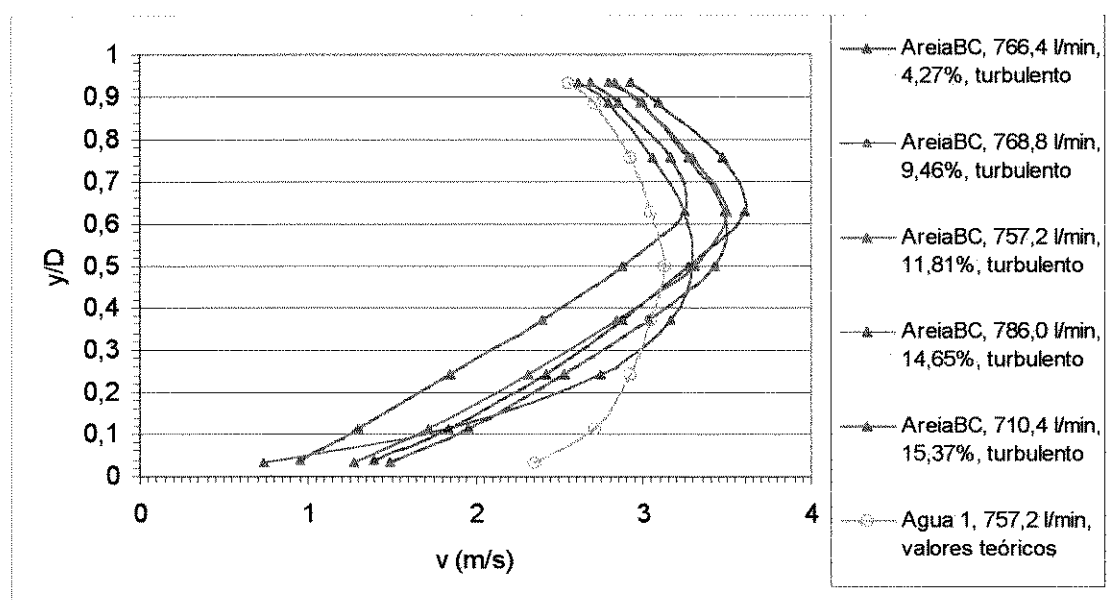


Figura A3.2 – Distribuição vertical de velocidades para água e areia BC, escoamento heterogêneo.

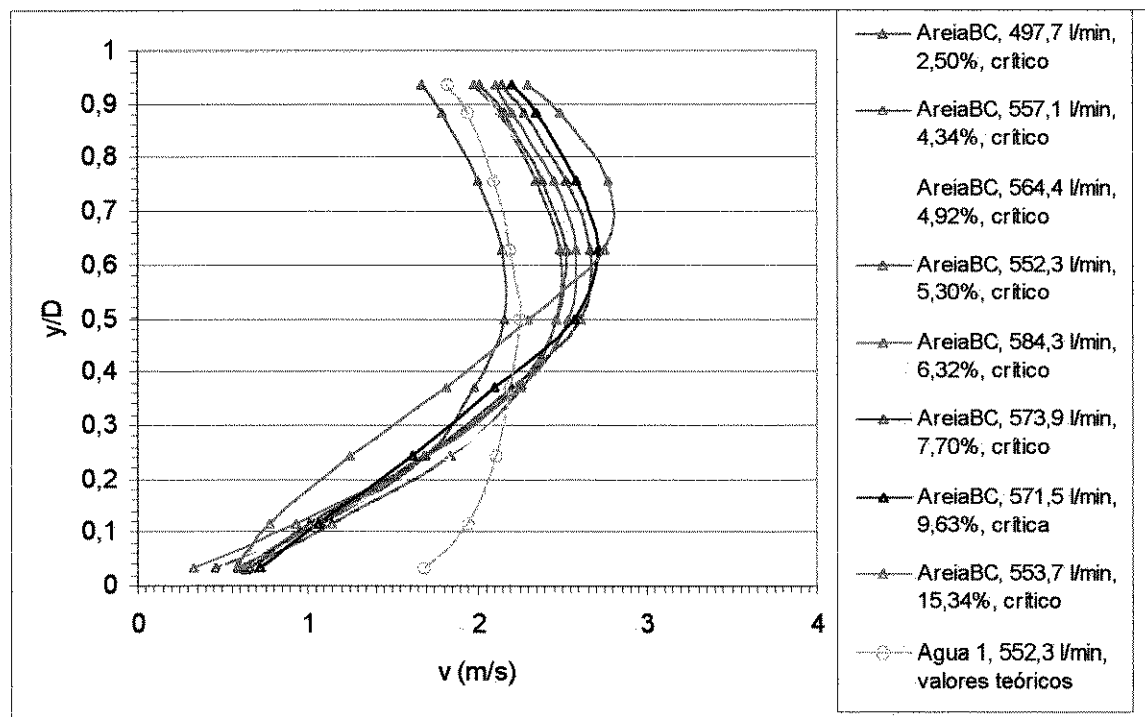


Figura A3.3 – Distribuição vertical de velocidades para água e areia BC, escoamento heterogêneo, condição de velocidade crítica de sedimentação.

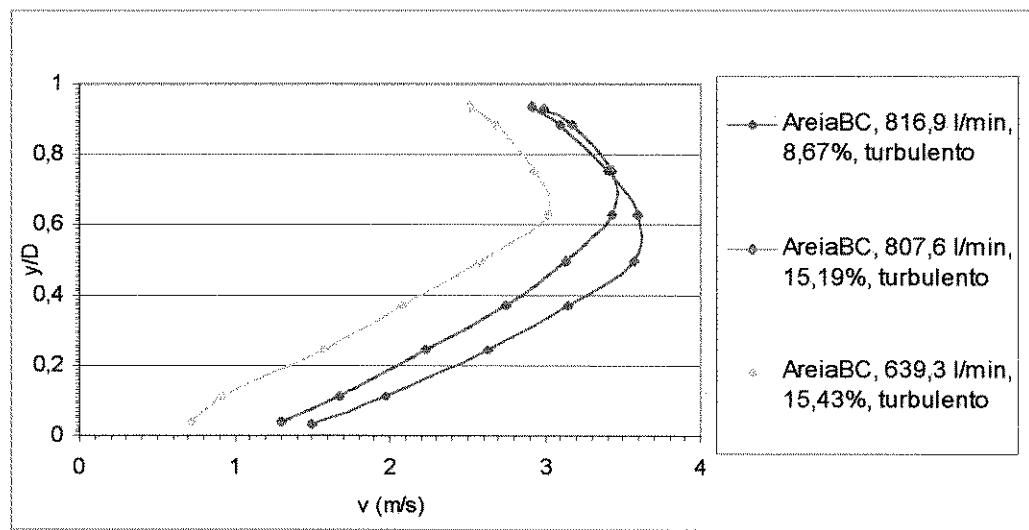


Figura A3.4 – Distribuição vertical de velocidades para água e areia BC, escoamento heterogêneo.

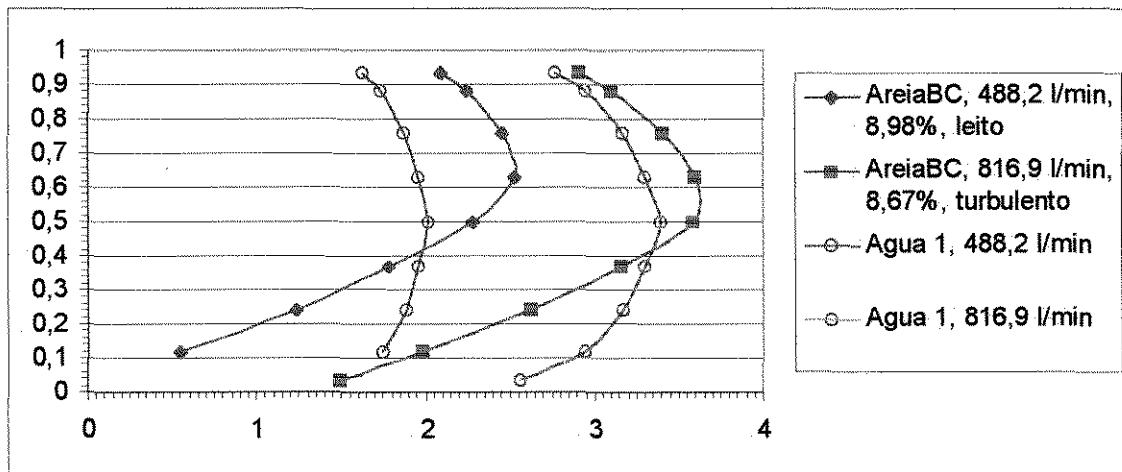


Figura A3.4 – Distribuição vertical de velocidades para água e areia BC, para concentração média aproximada de 8,8% de areia BC.

ANEXO 4

· Distribuição Vertical de Concentração Pontual

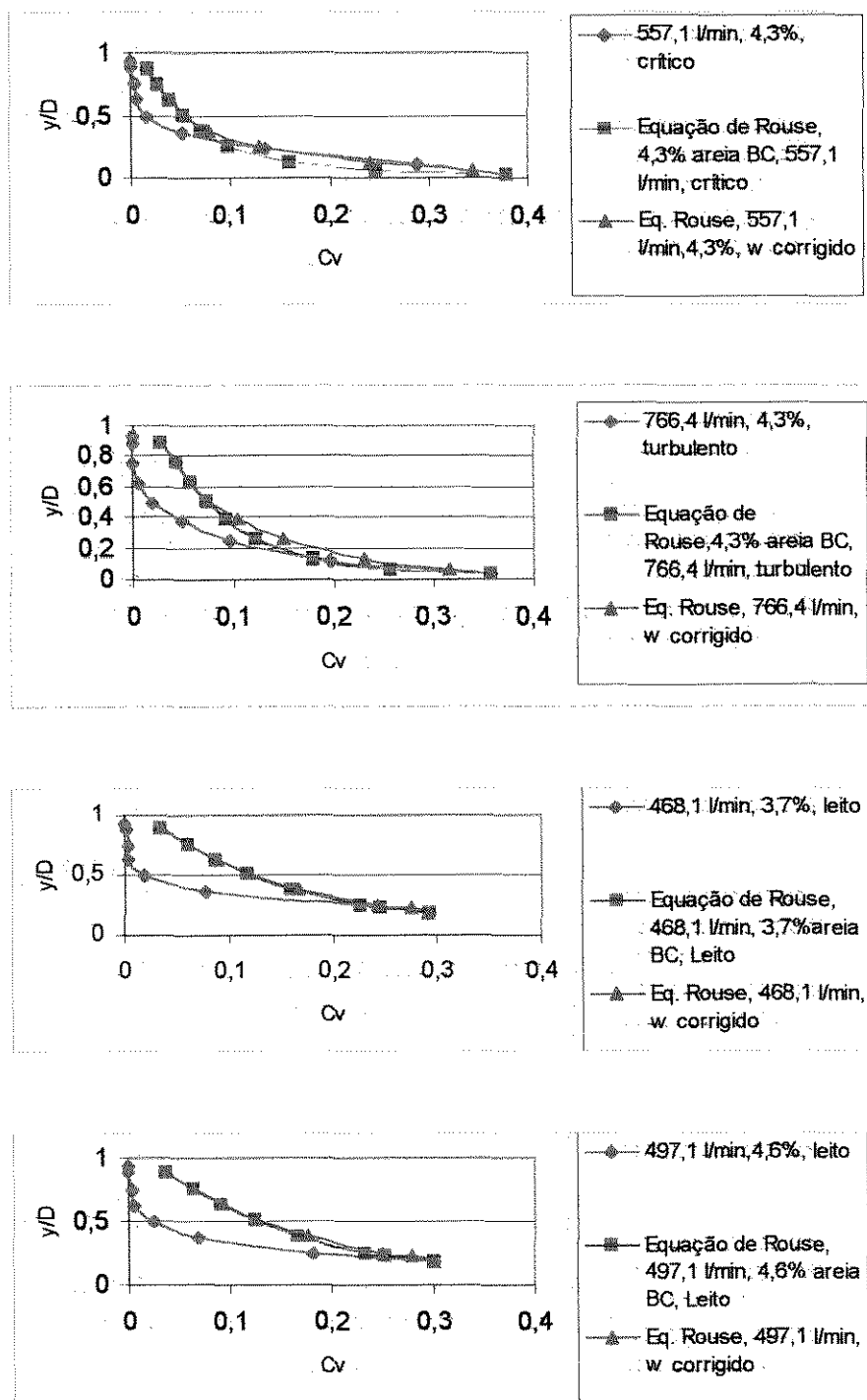


Figura A4.1 – Distribuição de concentração pontual de água e areia BC.

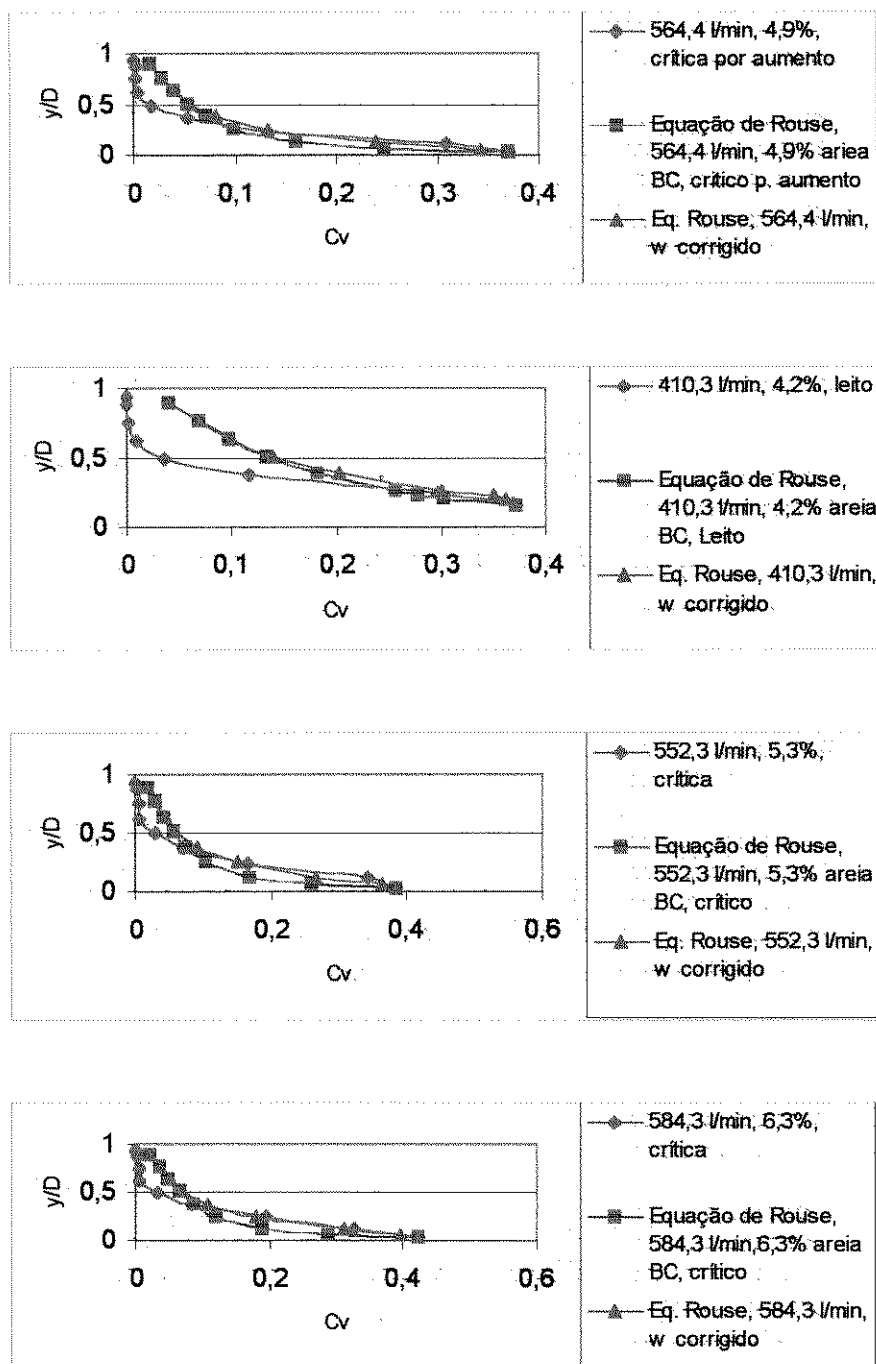


Figura A4.2 – Distribuição de concentração pontual de água e areia BC.

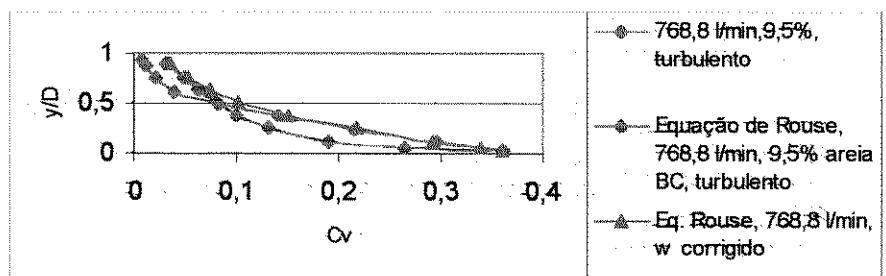
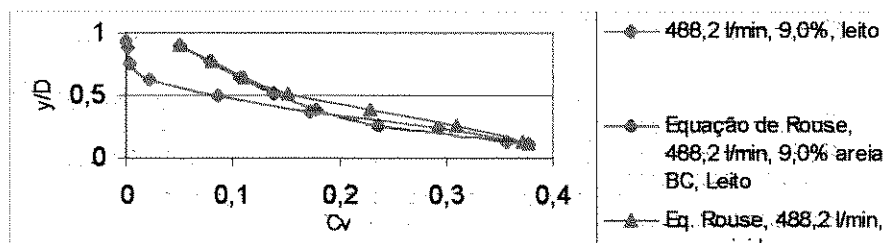
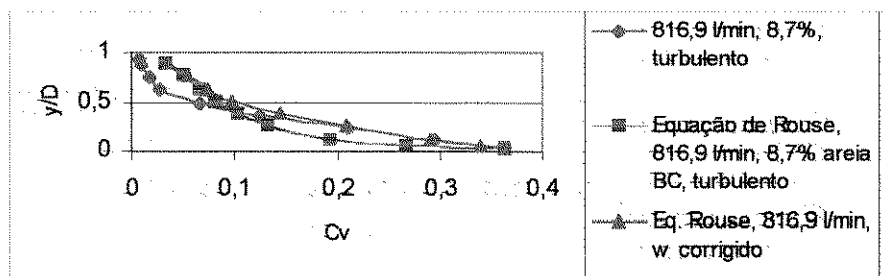
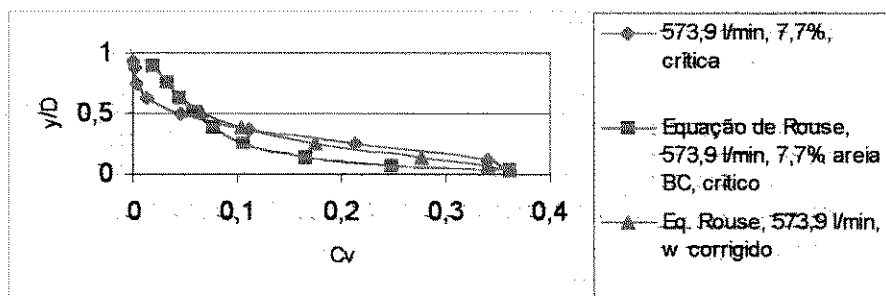


Figura A4.3 – Distribuição de concentração pontual de água e areia BC.

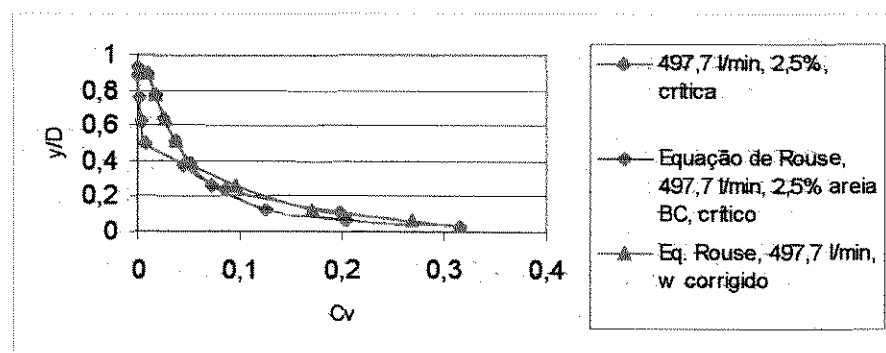
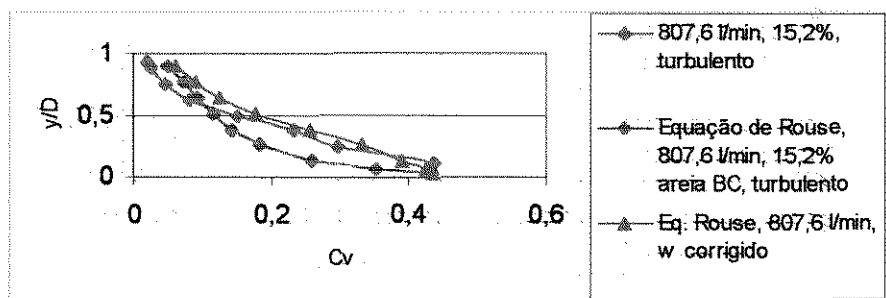
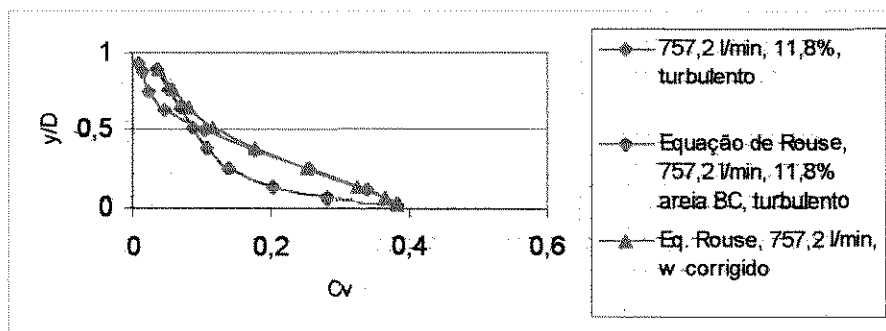
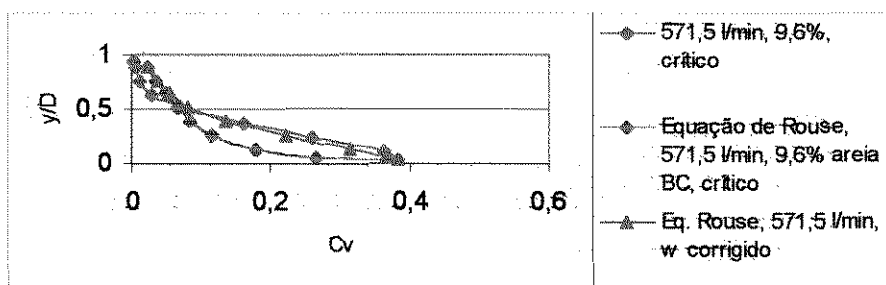


Figura A4.4 – Distribuição de concentração pontual de água e areia BC.

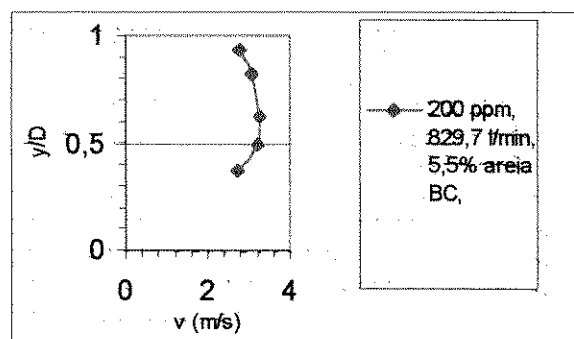
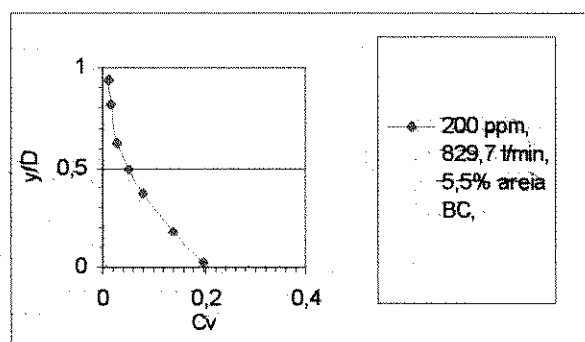
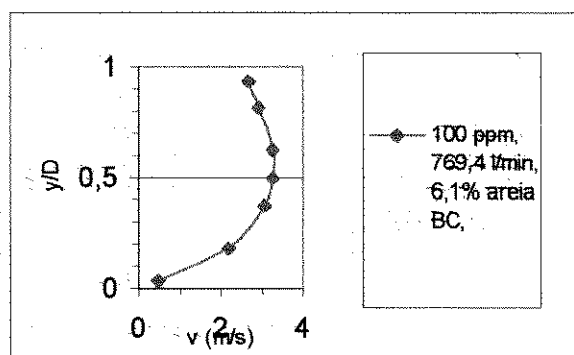
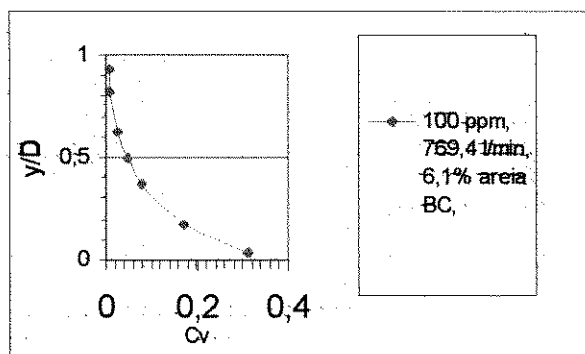


Figura A4.5 Distribuição vertical de concentração e de velocidade pontuais no tubo para fluxo de solução de polímero e areia BC.

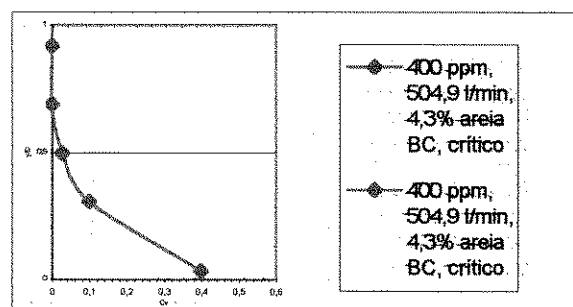
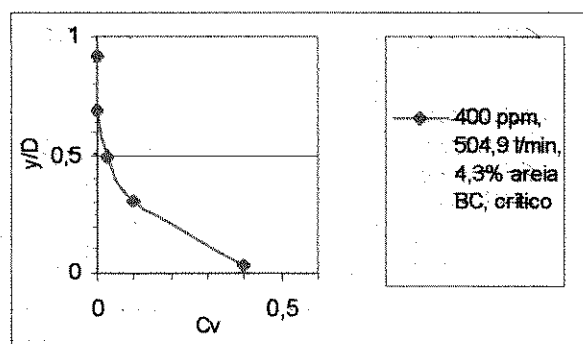
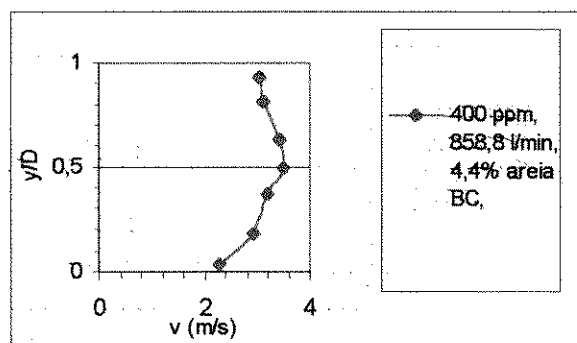
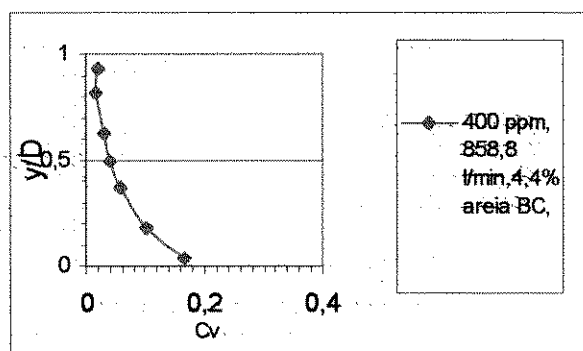


Figura A4.6 Distribuição vertical de concentração e de velocidade pontuais no tubo para fluxo de solução de polímero e areia BC.

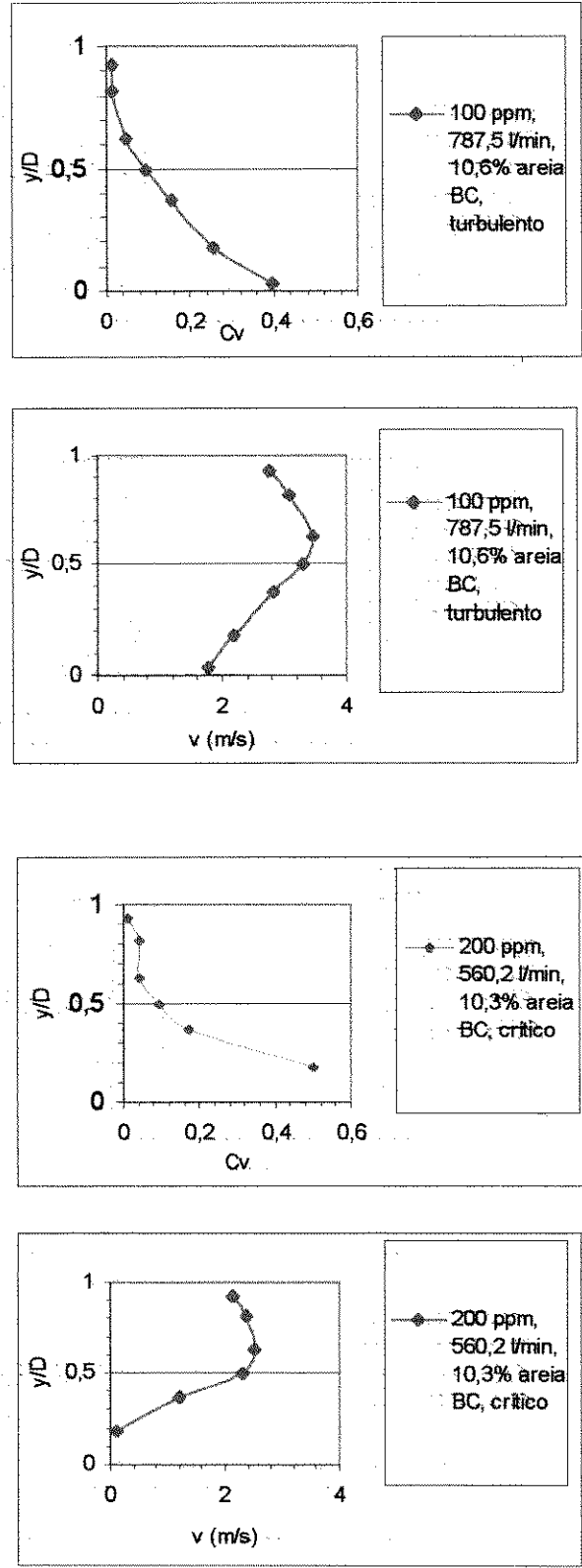


Figura A4.7 Distribuição vertical de concentração e de velocidade pontuais no tubo para fluxo de solução de polímero e areia BC.

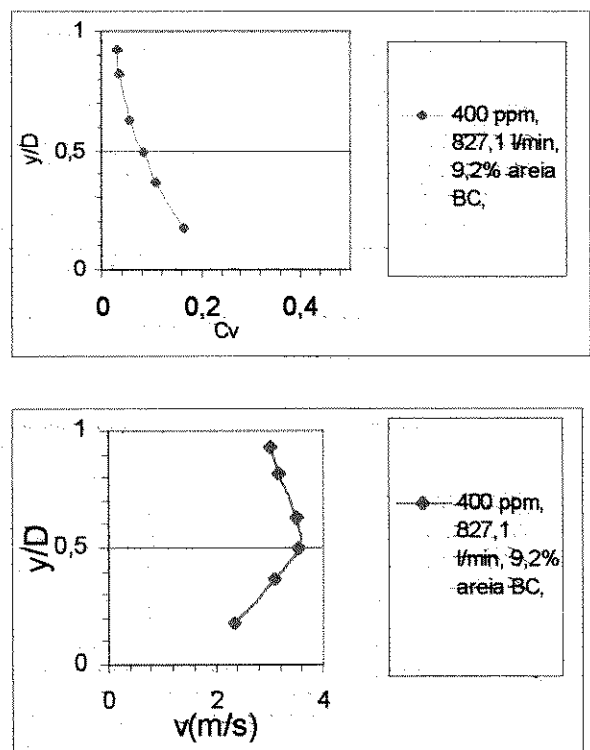
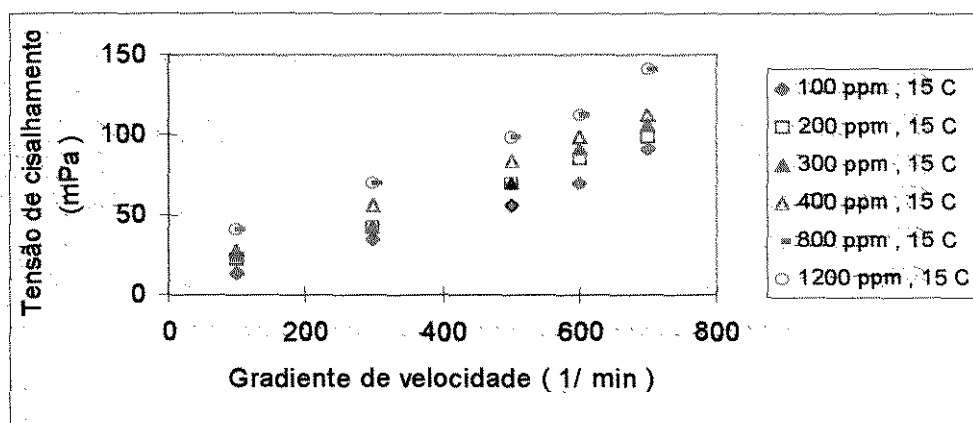


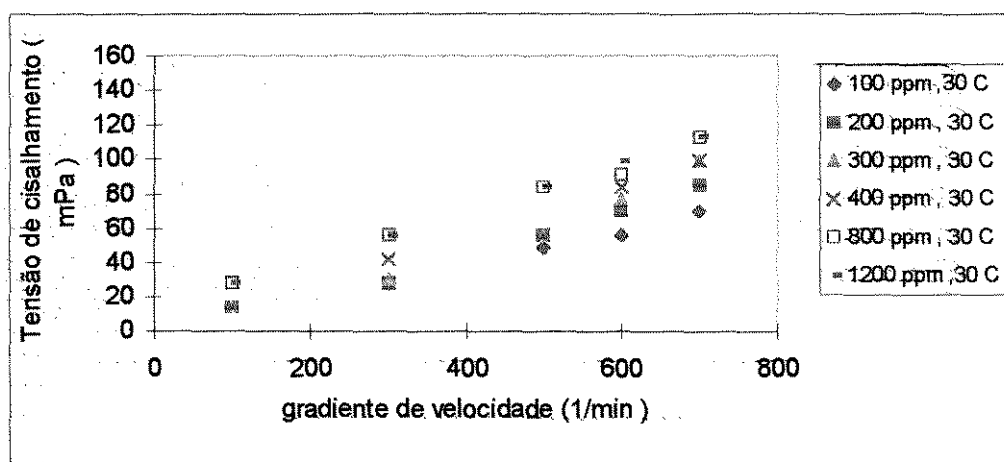
Figura A4.8 Distribuição vertical de concentração e de velocidade pontuais no tubo para fluxo de solução de polímero e areia BC.

ANEXO 5

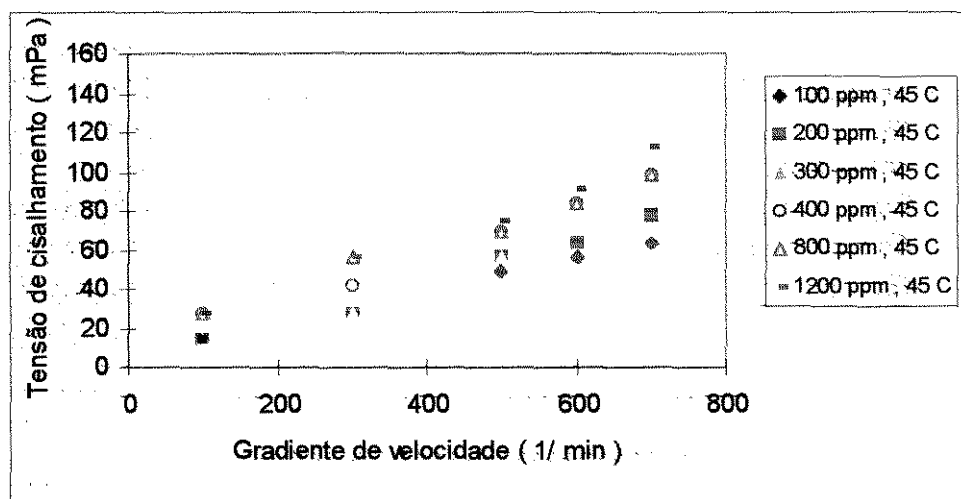
Reologia das Suspensões de Polímero



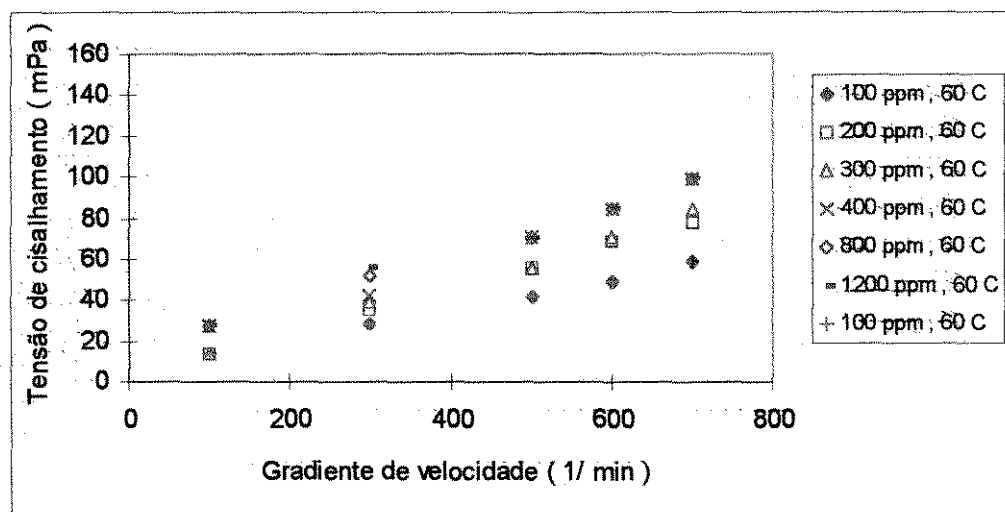
A5.1 – Tensão de cisalhamento em função do gradiente de velocidade para 100, 200, 300, 400, 800, e 1200 ppm de polímero à 15°C.



A5.2 – Tensão de cisalhamento em função do gradiente de velocidade para 100, 200, 300, 400, 800, e 1200 ppm de polímero à 30°C.



A5.3 – Tensão de cisalhamento em função do gradiente de velocidade para 100, 200, 300, 400, 800, e 1200 ppm de polímero à 45°C.



A5.4 – Tensão de cisalhamento em função do gradiente de velocidade para 100, 200, 300, 400, 800, e 1200 ppm de polímero à 60°C.

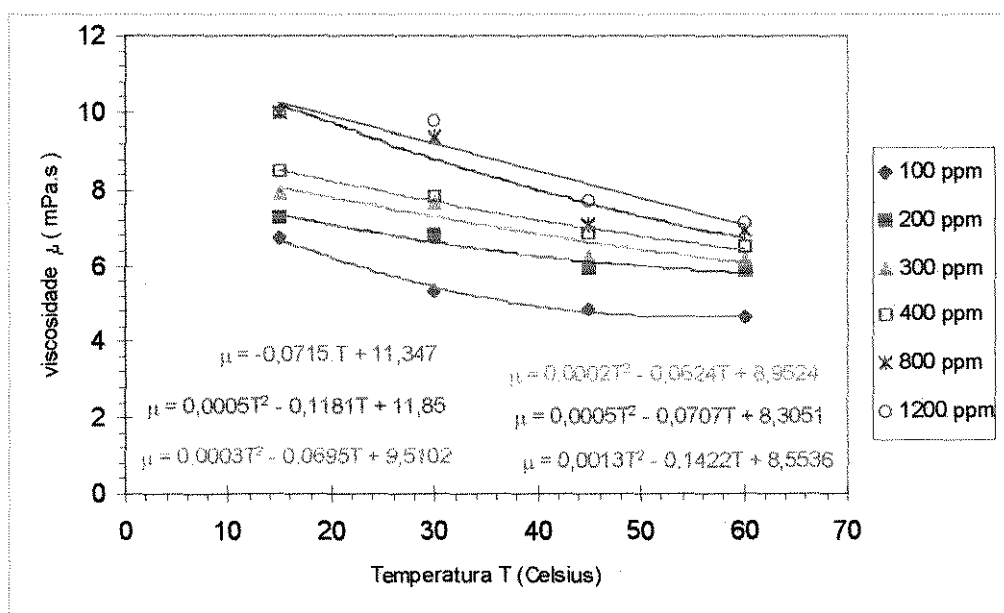


Figura A5.5 – Viscosidade em função da temperatura para 100, 200, 300, 400, 800, e 1200 ppm de polímero.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

Anderson, G.W., Rohr,J.J. and Stanley, S.D., "The combined drag effects of riblets and polymers in pipe flow", Journal of Fluids Engineering- Transactions of the ASME, June 1993, v.115, p.213-221.

Bain, A. G. and Bonnington. S.T., "The Hydraulic Transport of Solids by Pipeline", Pergamon Press 1970.

Bewersdorff, H.W. and Thiel, H., "Turbulence structure of dilute polymer and surfactant solutions in artificially roughened pipes", Applied Scientific Research 50: 347-368, 1993.

Cebeci,T. and Smith,A.M.O., Analysis of Turbulent Boundary Layers, Academic Press Inc., 1974.

Cheng, Nian-Sheng, "Effect of Concentration on Settling Velocity of Sediment Particles", Journal of Hydraulic Engineering, august, 1997, vol.123, n.8, p.728-731.

Coiado,E.M., "Escoamento de misturas sólido- líquidas através de condutos forçados- (Aplicação às instalações de recalque)", São Paulo, Escola Politécnica da USP, 1985, 503 p, vol I, Tese de Doutorado.

Coiado, E.M., "Redução de energia consumida por uma instalação de recalque através da adição de polímeros", Tese de Livre- Docência, 1989, UNICAMP.

Coiado, E. M. & Nogueira, A.A.S. - Influência de polímeros redutores de arraste nas distribuições verticais, de velocidade, de concentração e do tamanho do grão sólido. Escoamento de misturas bi-fásicas em condutos. XIV Congresso Latino

Americano de Hidráulica. IAHR-International Association for Hydraulic Research. Montevideo. Uruguai. Vol. 1, pp.25-36., 1990.

Coiado, E. M. & Nogueira, A.A.S. -Influência de polímeros redutores de arraste nos fatores de atrito, devido a escoamentos, de água limpa e de misturas sólido-líquidas. XIV Congresso Latino Americano de Hidráulica. IAHR-International Association for Hydraulic Research. Montevideo. Uruguai. Vol. 1, pp.73-84., 1990.

Coiado, E. M. & Nogueira, A.A.S. -Redução da perda de carga em canalização, transportando misturas sólido-líquidas ou água limpa, pela adição de polímeros redutores de arraste. XIV Congresso Latino Americano de Hidráulica. IAHR-International Association for Hydraulic Research. Montevideo. Uruguai. Vol. 1, pp.97-108., 1990.for Hydraulic Research. Montevideo. Uruguai. Vol. 1, pp.73-84., 1990.

Coiado, E. M. & Nogueira, A.A.S. - Influência de polímeros redutores de arraste nas curvas características de bombas centrífugas. XIV Congresso Latino Americano de Hidráulica. IAHR-International Association for Hydraulic Research. Montevideo. Uruguai. Vol. 3, pp.1647-1658., 1990.

Coiado, E. M. & Nogueira, A.A.S. - O Uso de polímeros redutores de arraste em instalações de recalque. I Congresso Brasileiro de Polímeros. São Paulo. Vol. 1. pp. 41 - 46. 1991.

Coiado, E. M. & Nogueira, A.A.S. - Redução de desgastes abrasivos em bombas centrífugas pelo uso de polímeros redutores de arraste. Anais do XV Congresso Latinoamericano de Hidráulica. IAHR-International Association Coiado, E. M. & Nogueira, A.A.S. - Influência de um polímero redutor de arraste nas perdas de carga distribuídas e localizadas. XVI Congreso Latinoamericano e Hidráulica.

IAHR-International Association for Hydraulic Research. Santiago do Chile. Chile. Vol. 1,pp.57-67, 1994.

Colwell, J.M. and Shook, C.A., "The entry lenght for slurries in horizontal pipeline flow", The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol 66, october 1988, p 714-720.

Condolios, E and Chapus, E.E., "Designing Solids-Handling Pipelines", Chemical Engineering, july 8, 1963, pp131-138.

Cooke, R. and Lazarus, J. H. , "Isokinetic Sampling Probe for Slurry Flows"11 TH International Conference on the Hydraulic Transport of solids in Pipes", October 1988, pp 117-130.

Darby, R., "Hydrodynamics of Slurries and Suspensions", Encyclopedia of Fluid Mechanics, Gulf Publishing Company, vol 5, 1986, Chapter 2, p.49-91.

Durand, R., "Basic Relationships of the Transportation of Solids in Pipes - Experimental Research", Proc. Minnesota International Hydraulics Convention, Minneapolis, 1953, pp 89-103.

Garde, R.J. and Ranga Raju, K.G., "Mechanics os Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems", Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1985.

Gillies,R.G. and Shook, C.A., "A deposition velocity correlation for water slurries",The Canadian Journal of Chemical Engineering, volume 69, October 1991, p.1225-1227.

Gögüs, M. and Kökpınar, M.A., "Determination of critical flow velocity in slurry transporting pipeline systems", 12 TH International Conference on Slurry Handling and Pipeline Transport, Hydrotransport 12, p 743-757.

Govier, G.W. and Azia, K., "The Flow of Complex Mixtures in Pipes", Van Nostrand Reinhold Company, 1972.

Handbook of Chemistry and Physics - 1° Student Edition, CRC –Press Inc. Boca Raton, Florida, 1987.

Hattori, H, Yamauchi, T, Tanabe, S. and Matsuda H., "Turbulent Drag Reduction in a Dilute Polymeric Solution Flowing Through a Fiber Implanted Circular Pipe", Journal of Chemical Engineering of Japan, vol 21, n 4, 1988.

Heywood, N.I., "A Review of Techniques for Reducing Energy Consumption in Slurry pipelining", 10 th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes", Hydrotransport 10, Innsbruck, Austria: 29-31, October 1986, paper K13, p 319-332.

Larras, Jean; "Hydraulique et Granulats", Eyrolles, 1972, Collection Du Centre De Recherches et D'essais De Chatou.

Lodes, A. and Macho, V., "The influence of polyvinylacetate additive in water on turbulent velocity field and drag reduction", Experiments on Fluids 7, 383-387 (1989).

Lodesova, D. and Lodes, A., "Thickness of the elastic sublayer in the velocity field of diluted polymeric solutions", Experiments on Fluids, 7, 379-382, (1989).

-
- NG,K.S., Cho,Y.I. and Hartnett, J.P., "Heat transfer performance of concentrated polyethylene oxide and polyacrylamide solutions", AIChE Symposium Series, Heat Transfer-Orlando 1980,n.199, vol.76, p.250-256.
- Oroskar, A.R. and Turian, R.M., "The critical velocity in pipeline flow of slurries", AIChE Journal, vol 26, n.4,july,1980, pp 550-558.
- Paradine,C.G. e Rivett, B.H., "Métodos Estatísticos para Tecnologistas", Editora da Universidade de São Paulo, 1974.
- Pinho, F. T. and Whitelaw, J.H., "Flow of non Newtonian Fluids in a Pipe", Journal of non Newtonian Fluid Mechanics, 34 (1990) 129- 144.
- Poreh, M., Zakin, J.L., Brosh, A. and Warshavsky, M., "Drag Reduction in Hydraulic Transport of Solids", Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, HY 4, April 1970, p.903-909.
- Rocco, M. C. and Shook, C. A., "Dispersive Stress in Shear Slurry Flows", Multiphase Flow and Heat Transfer III, Part B: Applications , 1984, p 487-501.
- Satto, J., "Caracterização Hidráulica do Transporte de Vinhaça em Tubulações", Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1994.
- Satto, M.Y.U. e Coiado, E.M., "Influência de polímero redutor de arraste na velocidade crítica de sedimentação", XVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, AMH, OAXACA, MÈXICO, Outubro, 1998, p 163-171.
- Schlichting, H., "Teoria de la capa limite", Version Espanola de la 5a. Edicion Alemana por Francisco Moran Samaniego -Ediciones Urmo - 1972.

Sedov, L. I., Ioselevich, V.A., Pilipenko, V.N. and Vasetskaya, N.G., "Turbulent Diffusion and degradation of polymer molecules in a pipe and boundary layer", J. Fluid Mech. (1979) vol 94, part 3, p 561- 576.

Sellin et al, "The Effect o Drag-Reducing Additives On Fluid Flows And Their Industrial Applications - Part I: Basics Aspects", Journal of Hydraulic Research, 20 (1982) n. 1, pp 29-68.

Sellin et al, "The Effect o Drag-Reducing Additives On Fluid Flows And Their Industrial Applications - Part II: Present Applications And Future Proposals", Journal of Hydraulic Research, 20 (1982) n. 3, pp 235-291.

Serghides, T.K., "Estimate friction factor accurately", Chemical Engineering, march 5, 1984, p 63-64.

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.

Smoldyrev,A.Y., Pipeline Transport Principles Of Design, Published by Terraspace Inc., Rockville, Maryland, USA,1982.

Soliman, R. H. and Collier, P. B., "Pressure drop in slurry lines",Hydrocarbon Processing, v 69, n 11, November 1990, p 60-63.

Soo, S.L., Fluid Dynamics of Multiphase Systems, Blaidell Publishing Company, 1967.

Sze- Foo Chien, "Critical Velocity of Sand-Fluid Mixtures in Horizontal Pipe Flow", FED- vol189- Liquid Solid Flows- ASME 1994, pp 231-246.

The Condensed Chemical Dictionary, Tenth Edition, Revised by Gessener G. Hawley, Van Nostrand Reinhold Company, 1981.

Thomas, D.G., "Physical Properties and Laminar Transport Characteristics', Industrial and Engineering Chemistry, v.55, n.11, November 1963, p.18-29.

Thomas, D.G., "Non Newtonian Suspensions- Part II, Turbulent Transport Characteristics", Industrial and Engineering Chemistry, vol 55, n.12, december 1963, pp 27-35.

Thomas, D.G., "Transport Characteristics of Suspensions: Part IX, AIChE Journal, v.10,n.3,May 1964, p.303-308.

Thomas, D.G., "Transport Characteristics of Suspensions: Part VI, AIChE Journal, v.8,n.3, July 1962, p.373-378.

Thomas, D.G., "Transport Characteristics of Suspensions: Part IV", AIChE Journal, v.8, n.2, May 1962, p.266-271.

Thomas, D.G., "Transport Characteristics of Suspensions: Part II", AIChE Journal, v.7,n.3, September 1961, p.423-430.

Turian, Raffi M. and Yuan, Tran Fu, "Flow of slurries in pipelines", AIChE Journal , vol 23, N. 3, may 1977, p 232-243.

Turian, Raffi M., Yuan, Tran Fu, and Mauri, G, "Pressure drop correlation for pipeline flow of solid-liquid suspensions", AIChE Journal, 17, 809-817, (1971).

Vanoni, V.A., "Sedimentation Engineering", HEADQUARTERS OF THE SOCIETY, reprinted 1977, New York, p 244-349.

Vanoni, V.A., "Transportation of suspended sediment by water", Transactions ASCE, v.111, (1946), p.67-133.

Virk, P.S., "An elastic sublayer model for drag reduction by dilute solutions of linear macromolecules", J. Fluid Mech. (1971), vol 45, part 3, pp 417-440.

Virk, P.S., "Drag Reduction Fundamentals", AIChE Journal, vol 21, n 4, July 1975, p 625-656.

Virk, P. S., Merrill, E.W., Mickley, H.S. and Smith, K.A., "The Toms Phenomenon: Turbulent Pipe Flow of Dilute Polymer Solutions", J. Fluid Mech (1967) vol 30, part 2, pp 305-328.

Virk, P.S., Mickley, H.S. and Smith, K.A., "The ultimate asymptote and mean flow structure in Tom's phenomenon", Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME, June 1970, pp 488-493.

Wani, G. A., "Critical velocity in multisize particle transport through pipes", Encyclopedia of Fluid Mechanics, Gulf Publishing Company, vol 5, 1986, pp.181-184.

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.

YANG, CHIH TED "SEDIMENT TRANSPORT Theory and Practice", The McGraw-Hill Companies, Inc. , New York, 1996

Yu, Li-ren, "The formulas for velocity distribution over total flow sections and its application", Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 4 (1991), 34-42.

Zandi, I., Govatos, G., “Heterogeneous Flow of Solids in Pipelines”, Journal of The Hydraulics Division, Proceedings of the ASCE, may 1967 p 145-159.

ABSTRACT

In this study, results about an experimental investigation of water soluble anionic polyacrylamide effects on critical velocity, on critical limit deposit velocity and on another hydraulics parameters of solid-liquid flow, are described.

Experiments were performed using sand-water and sand-polymer solution, and the sand volumetric concentration were of about 2%, 5%, 10% and 15%. Polymer solution were utilized from 100 ppm up to 1200 ppm.

The experiments showed that a distinction is to be made among critical velocity (the velocity of minimum energy transport) and critical limit deposit velocity (the velocity identified by the appearance of a layer of stationary or sliding particles). The difference between them is presented.

Results obtained using a Pitot tube, about polymer effect on velocity, and concentration profiles are described.

Degradation of polymer solution in sand particles by flow and aging are presented.

The present study contains a review of hydrotransport of solids, experimental apparatus and procedure, experimental results and suggestions.